

X 57 C 10  
345 p

# VERSLAG

VAN DE

# STAATSCOMMISSIE

BENOEMD BIJ KONINKLIJK BESLUIT VAN 4 JULI 1918 No. 30

MET OPDRACHT TE ONDERZOEKEN

IN HOEVERRE, ALS GEVOLG VAN DE AFSLUITING VAN DE

## ZUIDERZEE,

INGEVOLGE DE WET VAN 14 JUNI 1918 (STAATSBLAD No. 354), TE  
VERWACHTEN IS, DAT TIJDENS STORM HOOGERE WATERSTANDEN  
EN EEN GROOTERE GOLFOPLOOP, DAN THANS HET GEVAL IS, ZULLEN  
VOORKOMEN VÓÓR DE KUST VAN HET VASTE LAND VAN NOORD-  
HOLLAND, FRIESLAND EN GRONINGEN, ALSMEDE VÓÓR DE DAARVOOR  
GELEGEN NOORDZEE-EILANDEN.

---

SEPTEMBER 1926.

---

*Band titel: Verslag van de Staatscommissie Zuid-  
1918 - 1926*

# INHOUD.

Bladz.

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| <b>I.</b>   | <b>Samenstelling en opdracht der Staatscommissie . . . . .</b>                              | 9  |
| <b>II.</b>  | <b>Beantwoording van de gestelde vragen en algemeen overzicht. . . . .</b>                  | 12 |
| <b>III.</b> | <b>Beschrijving van het beschouwde gebied . . . . .</b>                                     | 17 |
|             | § 1. Begrenzing en indeeling . . . . .  | 17 |
|             | § 2. De kom . . . . .   | 17 |
|             | § 3. De Waddenzee . . . . .   | 17 |
|             | § 4. Het overgangsgebied. . . . .   | 19 |
| <b>IV.</b>  | <b>De waarnemingen . . . . .</b>  | 22 |
|             | <b>A. De normale getijbeweging . . . . .</b>  | 22 |
|             | § 5. Aanwezige peilschalen . . . . .  | 22 |
|             | § 6. Registreerende peilschalen met electriche overbrenging. . . . .                        | 23 |
|             | § 7. Dieptemeters . . . . .   | 25 |
|             | § 8. Andere wijzen van waarneming . . . . .   | 25 |
|             | § 9. Nieuw opgerichte peilschalen in de Waddenzee. . . . .                                  | 26 |
|             | § 10. De Noordzeewaarnemingen . . . . .   | 27 |
|             | § 11. De bereikte resultaten . . . . .  | 29 |
|             | § 12. De stroommetingen . . . . .   | 35 |
|             | § 13. Het verband tusschen den stroom en het verticale getij . . . . .                      | 38 |
|             | § 14. Bepaling van de constante van EYTELWEIN. . . . .                                      | 41 |
|             | <b>B. De hoogteligging der peilschalen. . . . .</b>   | 44 |
|             | § 15. Waterpassingen . . . . .  | 44 |
|             | § 16. Overbrengen van het peil over het water . . . . .                                     | 46 |
|             | <b>C. De verschijnselen bij stormvloed. . . . .</b>   | 49 |
|             | § 17. Vóór 1918 verrichte waarnemingen . . . . .  | 49 |
|             | § 18. Uitbreiding van het waarnemingsmateriaal na 1918. . . . .                             | 53 |
|             | § 19. Waarnemingen omtrent de opwaaing . . . . .  | 55 |
|             | § 20. Laboratoriumproeven . . . . .   | 59 |
|             | § 21. De zeegaten . . . . .   | 61 |
|             | § 22. De stroom achter Ameland . . . . .  | 65 |
|             | § 23. De golfoploop . . . . .   | 66 |
| <b>V.</b>   | <b>De voornaamste stormvloeden en hun oorzaken . . . . .</b>                                | 67 |
|             | § 24. Inleiding. . . . .  | 67 |
|             | § 25. Kort overzicht van de in de periode 1824—1926 voorgekomen zware stormvloeden. . . . . | 69 |
|             | § 26. De stormvloed van 30/31 Januari 1877 . . . . .  | 74 |
|             | § 27. De stormvloed van 22/23 December 1894 . . . . .                                       | 79 |
| <b>VI.</b>  | <b>Overzicht der beschouwingen en berekeningen . . . . .</b>                                | 83 |
|             | § 28. Inleiding. . . . .  | 83 |
|             | <b>A. De derde methode en haar toepassing op de getijden . . . . .</b>                      | 84 |
|             | § 29. De richting der waterbewegingen veelal door de geulen bepaald . . . . .               | 84 |
|             | § 30. De voornaamste krachten die bij de waterbeweging werkzaam zijn. . . . .               | 84 |
|             | § 31. De weerstand die zich tegen de waterbeweging verzet. . . . .                          | 85 |
|             | § 32. De constante van EYTELWEIN . . . . .  | 86 |
|             | § 33. Invloed van de aswenteling der aarde . . . . .  | 86 |
|             | § 34. Krachten die van de tweede macht der snelheid afhangen. . . . .                       | 88 |
|             | § 35. Ongelijke snelheden op verschillende hoogten. . . . .                                 | 88 |
|             | § 36. De grondstellingen voor de beweging van het water in een geul. . . . .                | 89 |
|             | § 37. Superpositie van bewegingstoestanden . . . . .  | 90 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| § 38. | Verbetering van een benaderde oplossing. . . . .  | 92  |
| § 39. | Een reciprociteitsstelling. . . . .   | 92  |
| § 40. | Nadere beschouwing van de drie termen in de bewegingsvergelijking. . . . .  | 93  |
| § 41. | De getijbeweging . . . . .  | 94  |
| § 42. | Doel der getijberekeningen . . . . .  | 97  |
| § 43. | De bij de getijberekening gevolgde methode. . . . .   | 97  |
| § 44. | Bepaling der weerstandscoefficienten . . . . .  | 98  |
| § 45. | Berekening der getijden bij open en bij gesloten Zuiderzee . . . . .  | 99  |
| § 46. | Verkorte berekeningen. Andere partieele getijden. . . . .   | 106 |
| § 47. | Verandering der getijden in de Waddenzee tengevolge van de afsluiting der Zuiderzee . . . . .                                       | 109 |
| § 48. | De veranderingen in het geulennet . . . . .   | 111 |
| § 49. | Berekening der getijden in het kanaal van Bristol . . . . .   | 111 |
| § 50. | Invloed van de afsluiting op den getijstroom door het Heldersche zeegat . . . . .   | 112 |
| § 51. | Vorming van een wantij achter Texel en Vlieland . . . . .   | 113 |
| § 52. | Veranderingen in de getijbeweging gedurende en na het afsluiten van het Amsteldiep. Bevestiging der berekeningen. . . . .           | 114 |
| § 53. | Afwijkingen van de normale getijbeweging in de Waddenzee . . . . .  | 116 |
| B.    | Invloed van den wind . . . . .  | 117 |
| § 54. | Waterverplaatsing onder invloed van den wind. Driftstroom en opwaaiing . . . . .  | 117 |
| § 55. | Stationaire bewegingen onder den invloed van een verhang en van den wind, elk afzonderlijk of te zamen werkende . . . . .           | 119 |
| § 56. | Tijd, noodig voor het in beweging brengen der onderste lagen . . . . .  | 122 |
| § 57. | Tijd, noodig voor het tot stand komen van de opstuwing . . . . .  | 123 |
| § 58. | Al of niet ontstaan van den evenwichtstoestand in Waddenzee en Zuiderzee . . . . .  | 123 |
| § 59. | Dynamisch windeffect. . . . .   | 124 |
| § 60. | Regels voor de opwaaiing . . . . .  | 124 |
| § 61. | Opwaaiing als de diepte niet overal even groot is . . . . .   | 125 |
| § 62. | Waarnemingen omtrent de opwaaiing . . . . .   | 126 |
| § 63. | Proeven op kleine schaal . . . . .  | 127 |
| C.    | Eerste wijze van berekenen . . . . .  | 128 |
| § 64. | Nadere beschouwing der eerste berekeningsmethode . . . . .  | 128 |
| § 65. | Uitvoering der berekening . . . . .   | 131 |
| § 66. | Opmerkingen over de vorige berekening . . . . .   | 134 |
| § 67. | Waarschijnlijkheid van zeer hooge waterstanden . . . . .  | 135 |
| D.    | Tweede wijze van berekenen . . . . .  | 137 |
| § 68. | Grondbeginsel. . . . .  | 137 |
| § 69. | Afleiding der grondvergelijking . . . . .   | 138 |
| § 70. | Waterbeweging van en naar de Zuiderzee bij windstilte. . . . .  | 139 |
| § 71. | Invloed van den wind op de waterbeweging van en naar de Zuiderzee. Afhankelijkheid van de windkracht . . . . .                      | 140 |
| § 72. | Bepaling der coëfficiënten $y_r$ en $a$ in de grondvergelijking. Overeenstemming van die vergelijking met de waarnemingen . . . . . | 142 |
| § 73. | Mate van zekerheid der gevonden uitkomsten . . . . .  | 146 |
| § 74. | Verlagende invloed der Zuiderzee voor Piaam en Zurig . . . . .  | 146 |

|  | Bladz. |
|--|--------|
| § 75. Berekening der te verwachten verhooging . . . . .  | 147    |
| § 76. Vergelijking met andere berekeningen . . . . .   | 148    |
| § 77. Verband tusschen den invloed van den wind en de<br>windkracht . . . . .  | 148    |
| § 78. Rechtvaardiging van de in § 68 gemaakte onder-<br>stelling . . . . .   | 149    |
| § 79. Invloed der afsluiting op de getijden . . . . .  | 150    |
| § 80. Opmerkingen over de gevonden uitkomsten . . . . .  | 151    |
| E. Behandeling van den storminvloed naar de derde methode.   | 151    |
| § 81. Inleiding tot de behandeling der waterbeweging<br>bij een storm volgens de derde methode. . . . .  | 151    |
| § 82. Verdere vereenvoudiging van het vraagstuk . . . . .  | 153    |
| § 83. Berekeningen voor een geulennet . . . . .  | 153    |
| § 84. Nauwkeurige oplossing van het vraagstuk . . . . .  | 154    |
| § 85. Vereenvoudiging door de onderstelling van een<br>stationairen toestand. . . . .  | 156    |
| § 86. De verhoogingen niet geheel bepaald door de<br>waterhoeveelheden die door de afsluitingslijn heen<br>gaan . . . . .  | 156    |
| § 87. Een algemeene stelling omtrent stationaire stroom-<br>ingen onder den invloed van den wind . . . . .   | 157    |
| § 88. Verband tusschen de stroomen vóór en na de<br>afsluiting. . . . .  | 159    |
| § 89. Het aangenomen geulennet . . . . .   | 161    |
| § 90. De toestand bij open Zuiderzee. . . . .  | 163    |
| § 91. De toestand bij afgesloten Zuiderzee. Bedrag der<br>verhoogingen . . . . .   | 167    |
| § 92. Bepaling der bewegingstoestanden met inacht-<br>neming van stroomen dwars over de geulen . . . . .   | 169    |
| § 93. Betrouwbaarheid der gevolgde methode . . . . .   | 172    |
| § 94. Andere berekeningen in de onderstelling van een<br>stationairen toestand. . . . .  | 173    |
| § 95. Uitkomsten in verschillende onderstellingen voor<br>stationaire toestanden verkregen . . . . .   | 175    |
| § 96. Formules voor de exacte oplossing van het<br>vraagstuk. . . . .  | 176    |
| § 97. Getijberekening volgens de exacte methode. . . . .   | 178    |
| § 98. Het voor de exacte berekening aangenomen geulennet . . . . .   | 179    |
| § 99. De gegevens voor de exacte berekening. . . . .   | 180    |
| § 100. Berekening van den toestand bij afgesloten Zuiderzee  | 181    |
| § 101. Toestand bij open Zuiderzee . . . . .   | 182    |
| § 102. Uitkomsten der berekeningen . . . . .   | 183    |
| § 103. Opmerkingen over de uitvoering van de berekening.   | 184    |
| § 104. Invloed van de afsluiting op de scherpte der<br>maxima . . . . .  | 185    |
| § 105. Gevolgtrekkingen. Bepaling der correctie die,<br>wegens het niet-stationair zijn van den toestand,<br>aan de vroegere uitkomsten moet worden aan-<br>gebracht . . . . . | 185    |
| § 106. Bespreking van de gemaakte onderstelling . . . . .  | 187    |
| § 107. Berekening der uitwerking van een windstoot. . . . .  | 189    |
| § 108. Invloed der krachten van de tweede orde en van<br>de aswenteling der aarde . . . . .  | 189    |
| § 109. Eenige kleine quaesties. . . . .  | 191    |
| § 110. De verhooging op een uitgekozen plaats (Harlingen).   | 192    |
| § 111. In aanmerking nemen van andere stormen. . . . .   | 192    |
| § 112. De verhooging op andere plaatsen . . . . .  | 193    |

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| § 113.      | Berekeningen voor het geval dat de afsluitdijk naar Zurich gelegd wordt . . . . .   | 195        |
| § 114.      | Mate van zekerheid der uitkomsten . . . . .   | 197        |
| § 115.      | Overzicht van de grootste verhoogingen die verwacht kunnen worden . . . . .   | 201        |
| F.          | Slotbeschouwingen . . . . .   | 201        |
| § 116.      | Vergelijking der uitkomsten waartoe de tweede en de derde methode geleid hebben . . . . .   | 201        |
| § 117.      | Vergelijking van de eerste methode met de derde. . . . .  | 202        |
| § 118.      | Kunnen bij toekomstige stormen hogere waterstanden verwacht worden? . . . . .   | 204        |
| § 119.      | Besluit . . . . .   | 205        |
| § 120.      | Naschrift. Waarnemingen bij storm na de afsluiting van het Amsteldiep. Vergelijking met de theoretische verwachtingen . . . . .           | 205        |
| <b>VII.</b> | <b>Theoretische grondslagen en methoden van berekening . . . . .</b>  | <b>207</b> |
| § 121.      | Grondformules der hydrodynamica . . . . .   | 207        |
| § 122.      | Stroomlijnen en stroombuizen, . . . . .   | 208        |
| § 123.      | Krachten van de tweede orde . . . . .   | 208        |
| § 124.      | Bewijs dat de krachten der tweede orde bestaan in de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI. . . . .                               | 209        |
| § 125.      | De kracht van CORIOLIS. . . . .   | 210        |
| § 126.      | Bewegingen in twee dimensies, in een horizontaal vlak . . . . .   | 212        |
| § 127.      | Continuïteitsvergelijking . . . . .   | 213        |
| § 128.      | Verdere bewegingsvergelijkingen . . . . .   | 214        |
| § 129.      | Nadere beschouwing van den weerstand. . . . .   | 215        |
| § 130.      | Kleine veranderingen van een bewegingstoestand. Bijkomstige bewegingstoestand . . . . .   | 215        |
| § 131.      | De weerstanden bij een bijkomstige beweging. . . . .  | 216        |
| § 132.      | Betrekking tusschen twee stationaire bewegingstoestanden bij lineaire weerstandswet. . . . .  | 217        |
| § 133.      | Een reciprociteitsstelling voor stationaire toestanden bij lineaire weerstandswet. . . . .  | 218        |
| § 134.      | Toepassing op bijkomstige bewegingstoestanden . . . . .   | 219        |
| § 135.      | Vergelijkingen voor de beweging in een kanaal . . . . .   | 220        |
| § 136.      | Getijgolven in een kanaal dat zich plotseling verwijdt . . . . .  | 221        |
| § 137.      | Golfbeweging met weerstand. . . . .   | 223        |
| § 138.      | Werken met complexe grootheden. . . . .   | 223        |
| § 139.      | Meetkundige voorstelling . . . . .  | 224        |
| § 140.      | Verdere beschouwing van een golfbeweging met weerstand . . . . .  | 225        |
| § 141.      | Geulen van verschillende diepte naast elkaar . . . . .  | 226        |
| § 142.      | Verband tusschen waterhoogte en stroom aan het eene uiteinde van een geul en de overeenkomstige grootheden aan het andere einde . . . . . | 227        |
| § 143.      | Verdeeling van een geul in op elkaar volgende vakken . . . . .  | 227        |
| § 144.      | Bepaling van de weerstandscoefficienten $k$ . . . . .   | 228        |
| § 145.      | Oplossing van het getijvraagstuk voor een willekeurig geulennet . . . . .   | 229        |
| § 146.      | Superpositie van een constante opwaaiing en een getijbeweging . . . . .   | 230        |
| § 147.      | Strengere oplossing van het stormvraagstuk bij lineaire weerstandswet voor een eenvoudige geul . . . . .                                  | 231        |
| § 148.      | Overgang tot een rechthoekig bekken van eindige lengte . . . . .  | 233        |

|                                |   |     |
|--------------------------------|---|-----|
| § 149.                         | Stroomen in een kanaal in de onderstelling dat tusschen twee waterlagen een wrijving bestaat, evenredig met de tweede macht van het snelheidsverval . . . . . | 234 |
| § 150.                         | Betrekking tusschen een oppervlaktekracht en een ruimtekracht die dezelfde uitwerking heeft. . . . .  | 236 |
| § 151.                         | Bijkomstige toestanden, bij afgesloten Zuiderzee, in het geulennet dat in §§ 89—91 werd behandeld . . . . .   | 238 |
| § 152.                         | Geulen naast elkander . . . . .   | 239 |
| § 153.                         | Stelling voor een kring en oplossing van het vraagstuk. . . . .   | 239 |
| § 154.                         | Onderzoek naar den invloed dien het heeft, dat de kracht van den wind op het oppervlak en niet op het binnenste der watermassa werkt. . . . .                 | 241 |
| § 155.                         | Correcties wegens de verandering die de afsluiting in de waterdiepte zal brengen . . . . .  | 242 |
| § 156.                         | Invloed van een kleine verandering der constante van EYTELWEIN. . . . .   | 242 |
| § 157.                         | Verandering van den exponent in de weerstandswet . . . . .  | 244 |
| § 158.                         | Exacte berekening van den toestand in een kanaal uit de waterhoogte en den stroom aan het begin daarvan en de windkracht. . . . .                             | 245 |
| § 159.                         | Oplossing van het in § 67 besproken vraagstuk. . . . .  | 246 |
| <b>VIII. De golfploop</b>      |   | 249 |
| § 160.                         | De factoren die invloed uitoefenen op den golfploop . . . . .   | 249 |
| § 161.                         | De waarneming van het vloedmerk . . . . .   | 249 |
| § 162.                         | De waarnemingen aan de golfpeilschalen . . . . .  | 250 |
| § 163.                         | De waarnemingen in den proefbak . . . . .   | 251 |
| § 164.                         | Het verband tusschen waterdiepte en golfploop . . . . .   | 253 |
| <b>IX. Het Amelandsche Wad</b> |   | 259 |
| § 165.                         | De invloed van de indijking op de stormstanden in het algemeen . . . . .  | 259 |
| § 166.                         | De stormvloedverhooging bij de Lauwerszee . . . . .   | 260 |
| § 167.                         | De verhooging in het Terschellinger Wad . . . . .   | 263 |
| § 168.                         | Gevolgen van het verbinden van Terschelling met Friesland . . . . .   | 264 |
| § 169.                         | De veranderingen van het dagelijksche getij . . . . .   | 265 |
| <b>Literatuur</b>              |   | 267 |
| <b>Bijlagen</b>                |   | 273 |
| 1.                             | Registreerende peilschalen met electriche overbrenging . . . . .  | 273 |
| 2.                             | Gegevens omtrent de getijbeweging . . . . .   | 278 |
| 3.                             | Berekening van astronomische standen . . . . .  | 282 |
| 4.                             | Bepaling van de constante van EYTELWEIN . . . . .   | 295 |
| 5.                             | De waterpassing van Helder naar Terschelling . . . . .  | 298 |
| 6.                             | De invloed van de aswenteling der aarde op de waterstanden in het Vlie . . . . .  | 306 |
| 7.                             | Uitvoering van een getijberekening . . . . .  | 309 |
| 8.                             | De uitkomsten der getijberekeningen. . . . .  | 322 |
| 9.                             | De uitkomsten der schematische getijberekeningen. . . . .   | 330 |
| 10.                            | Gegevens voor de exacte berekening. . . . .   | 332 |
| 11.                            | Berekening van de stormvloedstanden met inachtneming van het niet-stationair zijn . . . . .   | 334 |
| 12.                            | Uurkaartjes van waterhoogten en getijstroomen. . . . .  | 345 |
| 13.                            | Overzichtskaart.  |     |
| 14.                            | Kaart van de Waddenzee.   |     |

# I. SAMENSTELLING EN OPDRACHT DER STAATSCOMMISSIE.

Bij Koninklijk Besluit van 4 Juli 1918 n<sup>o</sup>. 30 werd een Staatscommissie benoemd, die was samengesteld als volgt:

Lid en voorzitter:

Professor Dr. H. A. LORENTZ, buitengewoon hoogleeraar aan de Rijksuniversiteit te Leiden <sup>1)</sup>.

Leden en ondervoorzitters:

Ir. H. WORTMAN, inspecteur-generaal van den Rijkswaterstaat in de 1ste Inspectie <sup>2)</sup>;

Professor Dr. E. VAN EVERDINGEN, hoofddirecteur van het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut, buitengewoon hoogleeraar aan de Rijksuniversiteit te Utrecht.

Lid en eerste-secretaris:

Ir. W. F. STOEL, hoofdingenieur <sup>3)</sup> van den Rijkswaterstaat, belast met den Algemeenen Dienst van den Rijkswaterstaat.

Leden:

Professor Ir. W. K. BEHRENS, hoogleeraar aan de Technische Hoogeschool te Delft <sup>4)</sup>;

P. H. GALLÉ, adjunct-directeur <sup>5)</sup> bij het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut;

Ir. R. H. GOCKINGA, hoofdingenieur-directeur van den Rijkswaterstaat in de directie Friesland en Drenthe <sup>6)</sup>;

J. KOOPER, hoofdingenieur van den Provincialen Waterstaat in Groningen;

Ir. C. W. LELY, ingenieur van den Rijkswaterstaat <sup>7)</sup>;

Ir. A. R. VAN LOON, hoofdingenieur van den Rijkswaterstaat, benoemd hoofdingenieur-directeur van den Rijkswaterstaat in de directie Noordholland <sup>8)</sup>;

L. H. MANSHOLT, lid van Gedeputeerde Staten van Groningen;

Jhr. Ir. R. R. L. DE MURALT, lid van de Tweede Kamer der Staten-Generaal <sup>9)</sup>;

J. M. PHAFF, kapitein-ter-zee-titulair, chef der afdeeling Hydrographie bij het Departement van Marine <sup>10)</sup>;

Jhr. C. J. A. REIGERSMAN, hoofdingenieur van den Provincialen Waterstaat in Noordholland <sup>11)</sup>;

<sup>1)</sup> Thans oud-hoogleeraar.

<sup>2)</sup> Thans Dr. Ir. H. WORTMAN, directeur-generaal van de Zuiderzeewerken.

<sup>3)</sup> Thans hoofdingenieur-directeur.

<sup>4)</sup> Thans oud-hoogleeraar.

<sup>5)</sup> Thans directeur filiaalinstelling Amsterdam.

<sup>6)</sup> Thans oud-hoofdingenieur-directeur.

<sup>7)</sup> Thans Dr. Ir. C. W. LELY, hoofdingenieur van den Rijkswaterstaat.

<sup>8)</sup> Thans inspecteur-generaal van den Rijkswaterstaat in de 2de Inspectie.

<sup>9)</sup> Thans burgemeester van Borculo en lid van de Eerste Kamer der Staten-Generaal.

<sup>10)</sup> Thans gepensionneerd schout-bij-nacht-titulair, oud-chef der afdeeling Hydrographie bij het Departement van Marine en directeur van het Bureau Hydrographique International te Monaco.

<sup>11)</sup> Thans hoofdingenieur-directeur.

Dr. J. P. VAN DER STOK, directeur bij het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut <sup>1)</sup>;

Ir. D. F. WOUDE, hoofdingenieur van den Provinciaalen Waterstaat in Friesland;

Ir. J. P. WIJTENHORST, hoofdingenieur van den Rijkswaterstaat in het district Groningen.

Tweede-secretaris:

Ir. L. M. DE NERÉE TOT BABBERICH, ingenieur van den Rijkswaterstaat.

Tevens werd bij bovengenoemd besluit bepaald dat een verslag van de uitkomsten van het onderzoek der Commissie door haar aan Hare Majesteit de Koningin zal worden uitgebracht, en dat het aan de leden vrij staat hun gevoelen, indien dit van dat der meerderheid afwijkt, in een afzonderlijk advies, tegelijk met dat der Commissie te doen kennen.

Bij Koninklijk Besluit van 17 Mei 1919, n<sup>o</sup>. 48, werd op zijn verzoek aan den heer Ir. L. M. DE NERÉE TOT BABBERICH eervol ontslag verleend als tweede-secretaris der Commissie; werden in verband met de door hen op 1 Mei 1919 aanvaarde nieuwe functies de heeren Ir. H. WORTMAN en Ir. R. H. GOCKINGA, respectievelijk lid en ondervoorzitter en lid, als zoodanig bestendigd; werd de heer Ir. J. P. VAN VLISINGEN, in zijn hoedanigheid van hoofdingenieur-directeur van den Rijkswaterstaat in de directie Friesland en Drenthe, benoemd tot lid der Commissie.

Bij Koninklijk Besluit van 24 Juni 1919, n<sup>o</sup>. 38, werden benoemd tot lid de heer Ir. W. K. DU CROIX, inspecteur-generaal van den Rijkswaterstaat in de 1ste Inspectie en tot tweeden-secretaris de heer Ir. J. TH. THJSSE, tijdelijk-ingenieur bij de Commissie <sup>2)</sup>.

Bij Koninklijk Besluit van 14 Januari 1921, n<sup>o</sup>. 49, werd bestendigd tot lid der Commissie de heer J. M. PHAFF, sinds 1 November 1920 gepensionneerd kapitein-ter-zee, oud-chef der afdeling Hydrographie bij het Departement van Marine, en benoemd de heer J. L. H. LUIJMES, kapitein-ter-zee-titulair, chef der afdeling Hydrographie bij het Departement van Marine.

Bij Koninklijk Besluit van 21 Mei 1921, n<sup>o</sup>. 38, werd overeenkomstig zijn daartoe gedaan verzoek de heer Ir. A. R. VAN LOON ontheven van het lidmaatschap der Commissie en in zijn plaats tot lid benoemd de heer Ir. W. G. C. GELINCK, hoofdingenieur-directeur van den Rijkswaterstaat in de directie Noordholland.

Bij Koninklijk Besluit van 18 April 1923, n<sup>o</sup>. 25, werd op zijn verzoek aan den heer Professor Ir. W. K. BEHRENS eervol ontslag verleend als lid der Commissie.

De Staatscommissie waardeert ten zeerste de welwillende medewerking die haar van verschillende zijden verleend werd. Zij heeft veel te danken aan den Rijkswaterstaat en aan de Waterstaatsdiensten der betrokken provincies, in het bijzonder aan den Algemeenen Dienst van den Rijkswaterstaat, bij welken vele der voor het onderzoek noodige berekeningen onder de leiding van den heer S. BLOK zijn uitgevoerd, en evenzoo aan het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut, dat haar belangrijke en onmisbare gegevens verstrekt heeft, terwijl de adjunct-directeur bij dat Instituut Dr. C. SCHOUTE veel tot het benoodigde instrumentarium heeft bijgedragen.

Met de Directie der Zuiderzeewerken heeft een gestadige en vruchtbare samenwerking bestaan en de Staatscommissie is zeer erkentelijk voor de groote belangstelling die zij steeds bij den heer Ir. V. J. P. DE BLOCC VAN KUFFELER heeft gevonden, voor de vele hulp die de heer J. J. DE VRIES haar met zijn dieptemeters heeft verleend en voor de moeite die de heer

<sup>1)</sup> Thans oud-directeur.

<sup>2)</sup> Thans eerstaanwezend-ingenieur bij de Zuiderzeewerken.

Ir. J. P. MAZURE zich bij langwijlige berekeningen voor haar getroost heeft. Zeer belangrijke gegevens heeft zij ook aan de afdeeling Hydrographie van het Departement van Marine te danken en de proeven in de windtunnel van den Rijks Studiedienst voor de Luchtvaart zijn voor het onderzoek van veel waarde geweest.

De Staatscommissie betuigt haar hartelijken dank aan allen, van wier hulp en medewerking zij heeft genoten.

De taak der Commissie was in het benoemingsbesluit omschreven als volgt:

te onderzoeken in hoeverre, als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee, ingevolge de wet van 14 Juni 1918 (*Staatsblad* n<sup>o</sup>. 354), te verwachten is, dat tijdens storm hoogere waterstanden en een grootere golfoploop, dan thans het geval is, zullen voorkomen vóór de kust van het vaste land van Noordholland, Friesland en Groningen, alsmede vóór de daarvoor gelegen Noordzee-eilanden.

Bovendien werd aan de Commissie bij schrijven dd. 18 December 1918, n<sup>o</sup>. 283, Afd. Wat. A., door den toenmaligen Minister van Waterstaat opdracht verstrekt in verband met plannen tot indijking en droogmaking van het Amelandsche Wad in haar onderzoek te betrekken de vraag, of en in hoeverre een indijking van het Amelandsche Wad verhooging van den waterstand tijdens storm en vermeerdering van golfoploop voor de ten westen en ten oosten daarvan gelegen zeedijken zal kunnen medebrengen en verder deze andere vraag, in hoeverre het, met het oog op een te verwachten verhooging van waterstanden tijdens storm en op de eventueele wijziging in den loop en het vermogen der stroomgeulen in de Waddenzee, overweging zou kunnen verdienen, om den westelijken dijk der bedoelde indijking van den Frieschen wal naar Terschelling, in plaats van naar Ameland, te richten, met afsluiting of omdijking van het Amelander zeegat.

## II. BEANTWOORDING VAN DE GESTELDE VRAGEN EN ALGEMEEN OVERZICHT.

Het onderzoek en de overwegingen der Staatscommissie hebben tot de volgende uitkomsten geleid:

I. Indien de afsluitdijk wordt gelegd van Wieringen naar Piaam kunnen de te verwachten verhoogingen der waterstanden bij hooge stormvloed, afgezien van den golfloop, gesteld worden op 130 cm bij Piaam, en van daar noordwaarts afnemende tot iets minder dan een meter bij Zurig, 60 cm bij Harlingen, ruim 10 cm bij het Nieuw Bildt, en verder op weldra dalende tot enkele centimeters, zoodat zij reeds vóór de Lauwerszee bereikt is, van geen beteekenis worden (zie § 115 en tabel 42).

II. Bij de genoemde richting van den afsluitdijk is aan de andere zijde van de Waddenzee te verwachten: langs de noordkust van Wieringen een verhooging, van punt tot punt veranderende, tusschen bijna 80 en ruim 110 cm; langs de Noordhollandsche kust van van Ewijcksluis tot de haven van Nieuwediep van omstreeks 80 tot 45 cm; langs de binnenzijde van Texel, eveneens veranderlijk van punt tot punt, tusschen de grenzen 25 en bijna 80 cm. Aan de binnenzijde van Vlieland is tot ruim 30 cm verhooging te verwachten, langs Terschelling ongeveer 10 cm en bij de volgende eilanden nog minder (§ 115 en tabel 42).

III. Wordt de afsluitdijk niet naar Piaam, maar naar Zurig gelegd, dan blijven voor alle plaatsen langs de overblijvende Waddenzee de daarvoor onder I en II genoemde getallen gelden; alleen worden enkele getallen eenige centimeters lager. Bij deze dijkrichting zal aan de oostzijde de grootste verhooging te Zurig worden gevonden, daarvoor kan bijna 95 cm worden aangenomen (§ 113 en tabel 42).

IV. Bij bovenstaande cijfers moet men in het oog houden dat in de grondslagen waarop zij berusten, zoowel in de door waarneming verkregen gegevens als in de theoretische beschouwingen, menige bron van onzekerheid blijft bestaan. Een berekening uitgaande van hetgeen, wat elken grondslag betreft, als het meest waarschijnlijk of aannemelijk kan worden beschouwd, heeft tot verhoogingen geleid, die kleiner zijn dan de onder I en II opgegeven waarden. De aldus gevonden getallen (voor Zurig 78 cm) kunnen echter zeer goed te groot of te klein zijn. Overweging van de mate van onzekerheid in elken grondslag, met inachtneming hiervan, dat een onjuistheid in de uitkomst, van dezelfde richting wat elken grondslag betreft, zeer onwaarschijnlijk is, heeft geleerd dat de werkelijke verhoogingen 20 % van die getallen zullen kunnen afwijken. Inderdaad heeft een der bij de berekening gevolgde methoden, die welke in het verslag de tweede genoemd is, tot aanmerkelijk lagere getallen geleid.

Met het oog op de veiligheid zijn de eerstberekende getallen met 20 % verhoogd; zoo zijn de onder I en II vermelde verhoogingen gevonden. Nog grootere verhoogingen, ofschoon niet geheel uitgesloten, zijn als zóó onwaarschijnlijk te beschouwen, dat er naar het oordeel der Staatscommissie geen rekening mee behoeft te worden gehouden. Daarentegen zou zij het niet verantwoord achten er op te rekenen, dat de verhoogingen lager zullen uitvallen, hoewel dit verwacht mag worden.

V. De verhooging der stormvloedstanden zal een vergrooting van den golfoploop ten gevolge hebben; deze vergrooting kan worden gesteld op 50 cm voor Piaam, 15 cm voor Zurig, ten hoogste 35 cm voor de noordkust van Wieringen. Overal elders zal zij ten hoogste 20 cm bedragen (§ 164 en tabel 42). Verlegging van den dijk van Piaam naar Zurig zal in het overblijvende gebied geen wijziging in den golfoploop brengen.

VI. De afsluiting zal een aanmerkelijke versterking der getijbeweging in de Waddenzee teweegbrengen, het meest in den zuidoosthoek. Bij de dijkrichting naar Zurig zal het gemiddeld tijverschil op die plaats bij windstilte met bijna 60 % vermeerderen, nl. van 105 cm, wat het nu is, tot ongeveer 165 cm. Door deze veranderingen zal eensdeels het laagwater dalen, anderdeels het hoogwater rijzen (§ 47).

Wijzigingen in de hoogte van den waterspiegel, aan deze getijveranderingen beantwoordende, zullen ook gedurende stormen voorkomen. Zij zijn in de onder I—III genoemde veranderingen begrepen.

VII. De getijstroomen door de zeegaten zullen versterkt worden. Die door het Heldersche zeegat zal met een derde van zijn tegenwoordige bedrag toenemen als de dijk naar Piaam wordt gelegd, daarentegen met een vierde als de richting naar Zurig wordt gekozen. De versterking van den getijstroom door het Vlie kan voor beide gevallen op ruim een vijfde, van dien door de Eierlandsche en Amelandsche zeegaten op omstreeks een tiende, resp. een vijftiende van het tegenwoordige bedrag worden gesteld (§ 50. en bijlage 8). De stroomen die bij stormvloed door de zeegaten gaan zullen na de afsluiting een kleinere sterkte dan thans bereiken (§ 102).

VIII. De onder I—III en V genoemde verhoogingen zouden voldoende zijn om de noodige hoogte der dijken te bepalen, indien men verzekerd kon zijn dat nooit, wat de sterkte der stormen en het samenvallen van windstuwung en hoog water betreft, ongunstiger omstandigheden zullen bestaan dan tot nu toe zijn voorgekomen. De mogelijkheid dat zulke omstandigheden zich wél voordoen heeft, wat het beschermend vermogen der dijken betreft, een onzekerheid ten gevolge, zooals die uit den aard der zaak ook bij den tegenwoordigen toestand bestaat en bestaan heeft (§§ 67 en 118).

IX. Het zal van groot belang zijn dat gedurende de uitvoering van het werk en vooral als dit zijn voltooiing nadert, zoowel de verschijnselen van de getijbeweging als die welke zich bij storm voordoen, met behulp van waarneming en berekening gevolgd worden. Daarbij zal kunnen blijken in hoeverre eventueel de nu bepaalde getallen eenige herziening mogen ondergaan.

Ook na de voltooiing van de afsluiting zal voortzetting van dit werk van waarnemen en berekenen wenschelijk zijn; men zal dan de veranderingen der geulen en den invloed daarvan op de waterbeweging in het oog moeten houden.

X. Indijking van het Amelandsche Wad, met de dijken loopende van de oost- en westpunt van het eiland naar de Friesche kust, zal ten gevolge hebben (hoofdstuk IX):

aan de oostzijde een verhooging der maximum stormvloedhoogte met ten hoogste 10 centimeter;

aan de westzijde, als de Zuiderzee open is, een even groote verhooging en als zij is afgesloten, een verhooging van enkele centimeters meer, welke verhooging zal komen bij die welke reeds daar ter plaatse door de afsluiting der Zuiderzee zal zijn teweeggebracht.

Een doorlopende getijgeul achter Terschelling tusschen de beide zeegaten zal door die indijking niet ontstaan. Er is dan ook geen reden om den westelijken dijk van de Friesche kust naar de oostpunt van Terschelling te richten, in plaats van naar de westkust van Ameland. Integendeel is deze wijze van afsluiten ongewenscht te achten omdat zij zou meebrengen

dat de stormvloeden in het oostelijk deel der Waddenzee aanmerkelijk zouden verhoogd worden. De verhooging zou dan bij open Zuiderzee tot 40 cm en bij afgesloten Zuiderzee tot 60 cm kunnen oploopen.

### *Algemeen overzicht.*

De Staatscommissie heeft bij haar onderzoek voortgebouwd op de beschouwingen die reeds vóór haar instelling en ook kort daarna van verschillende zijden, in het bijzonder door eenige van haar leden, aan het vraagstuk gewijd waren<sup>1)</sup>. Inderdaad waren daardoor de belangrijkste factoren die bij de oplossing in aanmerking komen, aangewezen.

Zoowel bij open als bij afgesloten Zuiderzee komt het op de getijden en op den invloed van den wind aan. Vloed en eb, door de zeegaten binnendringende, zullen in een mate die door den vorm van het gebied en de diepte in de verschillende deelen daarvan bepaald wordt en waarbij de weerstanden tegen de waterbeweging een rol spelen, in ieder punt bepaalde rijzingen en dalingen van den waterspiegel ten gevolge hebben.

De wind zal een van zijn sterkte afhankelijke golfbeweging opwekken en daardoor op het oppervlak een voortdrijvende kracht uitoefenen; er zal een „opwaaiing” zijn, zoowel van de eene zijde der Zuiderzee naar de andere, als van de zeegaten naar de daar tegenover liggende kusten en van de Waddenzee naar de Zuiderzee.

Uit waarnemingen kan worden afgeleid hoeveel bij gegeven kracht van den wind en gegeven waterdiepte de opwaaiing per kilometer kan bedragen.

Daar de hoogten die tegenwoordig bij stormvloeden voorkomen uit de aanwijzingen der peilschalen bekend zijn, zal het antwoord op de vraag gevonden zijn als men kan uitmaken welke hoogten na de afsluiting zullen bereikt worden. Men kan derhalve het vraagstuk aanvatten door voor dit laatste geval voor punten aan de Friesche kust te berekenen hoe hoog het water door de getijbeweging alleen zal stijgen en in welke mate het door den wind zal worden opgestuwd.

Dit is de eerste van de drie wijzen van berekening, waardoor bepaalde waarden voor de verhoogingen zijn gevonden.

Dat nu na de afsluiting in het overgebleven zeegebied, de Waddenzee, grootere hoogten zullen voorkomen is niet hieraan te wijten dat de stormen niet hevig genoeg zijn om ook bij open Zuiderzee het water tot diezelfde hoogten op te drijven, maar hieraan dat zij daarvoor, in alle of bijna alle gevallen, niet lang genoeg duren.

Hield bij den tegenwoordigen toestand een wind uit het Noordwesten b.v. gestadig met onveranderlijke sterkte aan, dan zouden in den tijd van een paar dagen hoogten bereikt worden, boven welke het water niet verder rijst. Er zou een „evenwichtstoestand” ontstaan, bij welken het oppervlak in de richting van den wind met een van de windkracht afhankelijke helling oploopt en die zich handhaaft omdat de wind niet in staat is nog meerder water van de Waddenzee naar de Zuiderzee te drijven, maar met zijn geheele kracht moet dienen om het water te beletten onder den invloed der zwaartekracht terug te vloeien.

Daar nu een in het water geplaatst beletsel geen invloed op den toestand kan hebben als er geen beweging is, zou een schot (dijk), plotseling langs de lijn van Ewycksluis—Wieringen—Piaam, aangebracht nadat de evenwichtstoestand ontstaan is, daaraan niets veranderen. Het water zou op de bereikte hoogte blijven staan en het zou daarbij nog altijd onder de werking van den wind in evenwicht zijn.

Uit dit laatste volgt dat, indien het schot er van het begin af geweest was, daarbuiten dezelfde hoogte als bij afwezigheid van het schot, geen kleinere en geen grootere, zou bereikt zijn. Deze eenvoudige redeneering

<sup>1)</sup> Literaturopgave nos. 6, 7, 8, 10 en 11.

leert dat men, in groote trekken althans, kan zeggen, dat bij zeer lang aanhoudende stormen de afsluiting geen verandering in den stand van het hoog water benoorden den dijk zal brengen.

Anders is het wanneer, zooals bijna altijd het geval is, de wind slechts gedurende een matig aantal uren met volle kracht waait. Aanvankelijk heeft dan overal de besproken stijging plaats, maar indien de wind in sterkte vermindert, zal aan die stijging een einde komen voordat de evenwichtstoestand ontstaan is; de grootste hoogte waartoe het water rijst zal beneden de evenwichtshoogte blijven.

In dit geval is het mogelijk dat als de afsluiting er van het begin af geweest was, in de Waddenzee wèl de evenwichtstoestand zou zijn ontstaan; de daarvoor vereischte tijd is bij een klein bekken korter dan bij een meer uitgestrekte watermassa en zoo kan het zijn dat reeds in weinige uren de rijzing in de Waddenzee alleen voltooid is, dat daar de uitwerking dezelfde is als die van een storm van willekeurigen langeren duur.

De slotsom is dat de afsluiting tot een grootere hoogte in de Waddenzee zal leiden als de storm niet lang genoeg duurt om in het geheele gebied den evenwichtstoestand te doen ontstaan, maar wel om dat in de Waddenzee alleen te doen.

Bij den tegenwoordigen toestand neemt men een verschijnsel waar, dat zijn verklaring vindt in de vernauwing tusschen de beide zeegedeelten. Deze heeft ten gevolge dat de toegang van het water tot het zuidelijk gedeelte aanmerkelijk belemmerd wordt, zoodat aanvankelijk de stijgende beweging in dat deel bij die in het noordelijk gedeelte achterblijft. Op den langen duur zou bij standvastigen wind het water in de Zuiderzee hooger dan in de Waddenzee komen te staan, maar neemt de storm na eenige uren in kracht af, dan staat op het oogenblik waarop het water in de Waddenzee reeds weer gaat dalen het niveau in de Zuiderzee nog aanmerkelijk lager. Het water stroomt nog steeds de Zuiderzee in. Werd dan plotseling de afsluiting aangebracht, dan zou de stroom, behalve in de onmiddellijke nabijheid daarvan, nog eenigen tijd doorgaan, wat noodzakelijk tot een verhooging aan de noordzijde moet leiden.

Trouwens, in het algemeen, hoe ook de wind moge veranderen en het water zich moge bewegen, is het zeker dat het *eerste* gevolg van het aanbrengen van een schot dwars door een stroom dit zal zijn, dat het water aan den kant van waar de stroom komt, hooger en aan de andere zijde lager komt te staan dan wanneer het schot was weggebleven.

In dezen gedachtengang hangt de gezochte verhooging samen met den stroom die thans op het oogenblik van hoogwater in de Waddenzee naar het Zuiden trekt. Men kan de sterkte van den stroom, de hoeveelheid water die per tijdseenheid door de afsluitingslijn stroomt, uit de stijging van uur tot uur van de rondom de Zuiderzee opgestelde peilschalen afleiden. De verhoogingen worden des te grooter naarmate de stroom naar de Zuiderzee sterker is en zij blijven beperkt tot het gebied waar het water geacht kan worden aan die zuidwaarts gerichte beweging deel te nemen. Bij de berekeningswijzen die in het verslag de tweede en de derde genoemd zijn, is het opnemen van water in de Zuiderzee en de verlagende invloed dien zij daardoor uitoefent het uitgangspunt; alleen de weg dien men gevolgd heeft is in beide gevallen verschillend.

Bij de derde berekeningswijze, die men zou kunnen toepassen al was er maar *eens* een storm waargenomen, tracht men het vraagstuk op te lossen door in bijzonderheden na te gaan hoe de beweging van het water door de daarop werkende krachten bepaald wordt, iets wat overigens ook noodig is gebleken voor het onderzoek der getijden na de afsluiting en voor de bestudeering van de verschijnselen in de zeegaten. Intusschen is er bij dit indringen in de bijzonderheden menige moeilijkheid. Hiervan is de tweede methode vrij, omdat zij zich bedient van hetgeen de waarnemingen bij een groot aantal stormen geleerd hebben. Waren er twee stormen zóó dat bij den één de evenwichtstoestand in het geheele bekken wel, en bij den

anderen niet bestond, dan zou men door na te gaan hoeveel de waterstanden bij den tweeden achterblijven ten opzichte van die bij den eersten de maat van den verlagenden invloed kunnen leeren kennen, en kunnen onderzoeken op welke wijze hij van verschillende omstandigheden, met name van den stroom naar de Zuiderzee en van de grootheden die dezen bepalen, afhangt. Hetzelfde wat men zou kunnen doen als bij één storm de evenwichtstoestand wel en bij een anderen niet werd bereikt, kan men nu ook doen als, wegens den ongelijken duur, de toestand bij den één meer dan bij den anderen tot den evenwichtstoestand nadert, zonder dat deze laatste bij een van beiden bereikt werd. Door hetgeen de waarnemingen bij een groot aantal stormen van allerlei type geleerd hebben op geschikte wijze te combineeren kan men zooveel aangaande den verlagenden invloed te weten komen dat men daaruit kan afleiden hoeveel het water hooger zou komen, als door de afsluiting die invloed geheel was weggenomen.

In § 28 zijn de drie methoden nog nader gekenschetst.

---

### III. BESCHRIJVING VAN HET BESCHOUWDE GEBIED <sup>1)</sup>.

§ 1. *Begrenzing en indeeling.* De begrenzing van den zeeboezem, welke Zuiderzee genoemd wordt, is, op een enkele uitzondering na, vrij scherp te trekken. Die uitzondering betreft de scheiding van de Friesche Wadden. Een tamelijk afgerond geheel van verschijnselen op hydrografisch gebied wordt verkregen als men voor de grenzen aanneemt:

de kusten der die zee omringende provinciën, de binnenkanten der er benoorden liggende Waddeneilanden en de lijn van het wantij tusschen Terschelling en de Friesche kust.

Onder wantij wordt verstaan de onregelmatige, zeer zwakke getijbeweging, welke voorkomt ter plaatse waar nagenoeg tegengestelde en ongeveer even sterke vloedstroomen, langs beide zijden van een eiland binnenkomend, elkander ontmoeten. Door de botsing van die stroomen krijgen de medegevoerde vaste deeltjes gelegenheid te bezinken, waardoor uitgestrekte banken en drempels worden gevormd. Onder normale omstandigheden is de plaats der wantijen achter de Waddeneilanden tamelijk standvastig.

Niettegenstaande het zeegat van Ameland in gewone omstandigheden een onbeteekenenden invloed op de hydrografische verschijnselen in de Zuiderzee uitoefent, is door de Commissie toch dit zeegat in haar beschouwingen betrokken. Behalve dat moest worden nagegaan, welken invloed het gat bij stormtoestanden op de Zuiderzee uitoefent, is de kennis van de waterbeweging in het Amelanders zeegat noodzakelijk voor de studie der beweging in de Waddenzee. Daarom heeft de Commissie het door haar beschouwde gebied uitgebreid tot het wantij tusschen Ameland en de Friesche kust, dit is ongeveer tot een lijn 1 à 2 km beoosten den vroeger gelegden dam tusschen Holwerd en Buren.

Indien de Meer en Wieringen met naaste omgeving, om de Noord uitgebreid tot en met den van Wieringen afstekenden Breehorn, voorloopig buiten beschouwing worden gelaten, kunnen in het overige gebied der Zuiderzee, vermeerderd met de Friesche Wadden, drie duidelijk verschillende gedeelten worden onderscheiden. Deze zijn: het zuidelijkste, de kom; het noordelijkste, de Waddenzee, en het overgangsgebied tusschen beide.

§ 2. *De kom.* Als de kom wordt aangenomen het gedeelte bezuiden de lijn: Enkhuizen—Steile Bank (bewesten de Lemmer). Uitgezonderd enkele diluviale verheffingen, waarvan Urk de voornaamste is, en eenige geulen en banken in het noordelijkste gedeelte, die de herinnering bewaren aan de vorming der Zuiderzee, waarvan in de eerste plaats te noemen zijn het Val van Urk en het Enkhuizerzand, bezit de kom geleidelijk naar het midden toenemende diepten welke, behoudens in die geulen, 45 dm niet overschrijden. De zeebodem is dan ook vlak en bestaat over het algemeen uit slib.

De getijbeweging in de kom is gering; het tijverschil bedraagt niet meer dan 20 à 30 cm en de stroomsnelheden zijn klein.

§ 3. *De Waddenzee* vertoont een geheel ander karakter. Zij kan gerekend worden te strekken van de eilanden tot een lijn, loopende van

<sup>1)</sup> Zie de overzichtskaart (bijlage 13) en de kaart van de Waddenzee (bijlage 14).

Zurig over het Kornwerderzand en over den drogen rug, welke den Dooven Balg aan de zuidzijde begrenst; verder van den mond van den Vlieter, over de Lutjeswaard, de punt van den Breehorn en over het Balgzand naar de Noordhollandsche kust ongeveer 3 km bezuiden het Nieuwediep.

Dit zeegedeelte heeft door twee ruime, diepe zeegaten en twee van kleiner afmetingen gemeenschap met de Noordzee en heeft daardoor, in tegenstelling met de kom, een sterke en vrij samengestelde getijbeweging.

Deze zeegaten zijn:

het Texelsche gat met een minste breedte over de Helsdeur van 2 km, over nagenoeg de geheele breedte diep, tot 47 m toe. De Helsdeur wordt naar binnen vervolgd door het Marsdiep en den Texelstroom;

het Eierlandsche gat met een minste breedte van 2 km, waarvan echter slechts 250 m dieper dan 8 m is, met een grootste diepte van 15 m. De diepe geul heet het Engelschmangat en verloopt naar binnen in slenken, waarvan de voornaamste Vogelzwin heet;

het Terschellingergat met een minste breedte over het Boomkensdiep van 5,8 km. Van deze breedte is 1,6 km dieper dan 8 m met een maximum van 33 m. Het Boomkensdiep gaat over in den Vliestroom, welke verderop Inschot en Zuidoostrak genoemd wordt;

het Amelandergat, over het Borndiep 2,1 km breed, waarvan 800 m dieper dan 8 m, met een grootste diepte van 27 m.

Voeren deze machtige gaten reeds bij normale omstandigheden groote hoeveelheden water naar binnen, welke alleen voor het Texelsche- en Terschellingergat gezamenlijk bij vollen vloed op 100 000 m<sup>3</sup> per seconde geschat kunnen worden, bij stormtoestanden zijn zij nog tot veel meer in staat, daar de profielen voor sterke vergrooting vatbaar zijn. Aan eene zijde toch worden die gaten begrensd door lage, vlakke, onverdedigde, weinig boven de hoogwaterlijn liggende banken, namelijk de Onrust, Vliehors en Noordvaarder aan de noord- of oostzijde van het Texelsche-, Eierlandsche- en Terschellingergat en de Boschplaat aan de westzijde van het Amelandergat.

Het is begrijpelijk, dat onder den invloed der veel sterker getijbeweging de bodemvorm der Waddenzee belangrijk verschilt van dien der kom. Heeft de laatste een gelijkmatige diepte, de eerste vertoont groote droogvallende of ondiepe banken, doorsneden door tal van geulen, waarvan er verscheidene een belangrijke en enkele een groote diepte bereiken. Ook de oppervlakkige samenstelling van den bodem is anders; wordt in de kom veel slib aangetroffen, in de Waddenzee overweegt het zand.

Deze banken en geulen zijn het resultaat van de wisselwerking tusschen de gaten onderling en tusschen deze en de kom. Bij hun vorming zijn van invloed geweest de capaciteit der gaten en de bergruimte der geheele Zuiderzee, zoomede het verschil in tijd van hoogwater, dat voor de zeegaten later valt naarmate men oostelijker komt en dat voor de kom later is dan voor de Waddenzee. Aangezien in normale omstandigheden in deze verschijnselen weinig of geen verandering plaats heeft, is over het algemeen de vorm van het bodemrelief standvastig en wordt deze slechts nu en dan plaatselijk gewijzigd.

Van de genoemde zeegaten vervullen feitelijk slechts het Texelsche- en het Terschellingergat bij de waterbeweging in de Zuiderzee een belangrijke rol, waarbij de hoofdrol aan het eerste gat moet worden toegekend. Het Eierlandsche gat, later ontstaan en van geringe capaciteit, is aan de binnenzijde door ondiepe banken afgesloten. De invloed van het Amelandergat is gering, doordat de vloedstroom, welke de Vliegaten binnenkomt, dien van het Borndiep sinds eeuwen heeft tegengehouden en naar de Friesche kust gedrongen, met als gevolg droge en ondiepe banken. Ook tusschen het Texelsche en Eierlandsche gat en tusschen dit en het Terschellingergat, bestaan dergelijke banken, doch zij zijn slechts plaatselijke verhoogingen op de uitgestrekte Waardgronden, gevolg van het wantij tusschen Texelstroom en Vliestroom.

Deze Waardgronden strekken zich tot ongeveer 28 km binnen de eilanden uit en vullen ruwweg den driehoek tusschen de Oostkaap, staande aan de Texelsche kust bij Oostereind, het oostelijk gedeelte van den Dooven Balg en de Oostpunt van Vlieland. Langs den zuid- en oostkant van dezen driehoek trekt nu de groote massa van het vloedwater door Texelstroom en Vliestroom, de laatste vervolgd door Inschot en Zuidoostrak, de Zuiderzee binnen, alsmede het ebwater naar buiten.

Aangezien de getijbewegingen in deze beide hartaders in phase verschillen, oefenen zij invloed op elkander uit, waardoor heen en weer gaande stroomen ontstaan in een tweetal verbindingsgeulen. De belangrijkste daarvan is de Doove Balg, welke zich rond de Waardgronden buigt en feitelijk daarvan het uiteinde, den drogen rug bezuiden die geul, afsnijdt. De andere heet Scheurrak en Oude Vlie, zij loopt ten naasten bij 6 km ten noordwesten van den Dooven Balg door de Waardgronden.

Naast dit hoofdcomplex van watertoevoer bestaan nog andere, minder belangrijke, wegen waarlangs het water meer bepaalde deelen van de Zuiderzee bereikt of daarvan afvloeit. De voornaamste van deze in het gebied van het Texelsche zeegat is:

het Malzwin, dat op dezelfde hoogte uit het Marsdiep ontstaat als de Texelstroom, doch van veel geringer capaciteit is dan deze. Het loopt tusschen Lutjeswaard en Balgzand door en vertakt zich bij den Breehorn in Amsteldiep, dat om de Zuid, en Wierbalg, die om de Oost loopt. Het Malzwin met zijn takken voert het water naar de gronden en geulen rond Wieringen en langs dit eiland naar de Meer.

Binnen het Terschellinger zeegat vindt men:

de Westmeep, zijtak van den Vliestroom en hoofdtoevoerweg van het water naar het Terschellingerwad en daar bezuiden;

de Blauwe Slenk, met het Inschot uit den Vliestroom gevormd en hoofdweg voor watertoe- en afvoer der gronden tusschen Grienderwaard en Zurig.

Van deze hoofdgeulen gaan tal van andere uit, eensdeels ontstaan door de waterstreaming van en naar de zeer ongelijk hoge banken en daarin te niet loopende, anderdeels door de wisselwerking welke geulen uit verschillende complexen op elkander uitoefenen.

Waar de stroomen uit geulen elkander onder een hoek treffen, ontstaan veelal drempels, zooals b.v. bij de scheiding Texelstroom-Scheurrak, Doove Balg-Zuidoostrak, enz.

Hoewel het oppervlak van de Waddenzee kleiner is dan dat der kom, vloeit slechts een relatief klein gedeelte der hoeveelheid water welke door de zeegaten naar binnen komt, onder normale omstandigheden naar die kom toe. Eensdeels omdat de Waddenzee, door het veel grootere tijverschil, meer van dat water bergt en vasthoudt dan, naar de verhouding der oppervlakte te rekenen, verwacht zou worden, doch voornamelijk omdat, als gevolg van de wisselwerking der zeegaten op elkander, veel van het water, dat het eene gat binnenstroomt, de Waddenzee door het andere weder verlaat, zonder dieper in de Zuiderzee te komen.

§ 4. *Het overgangsgebied.* Het gedeelte van het vloedwater dat uit de Waddenzee naar de kom toestroomt gaat over het bovengenoemde overgangsgebied. Onder dit gebied wordt gebracht het zeegedeelte, begrensd door de Friesche kust van Zurig tot de Steile Bank bewesten de Lemmer, de lijn van Zurig over den drogen rug bezuiden den Dooven Balg naar de noordoostpunt van de Lutjeswaard, verder de oostkant van die waard, vervolgd door dien van de banken Nieuwe en Oude Zeug en daarna een lijn naar de Ven en een van Enkhuizen naar de Steile Bank.

Het noordelijk gedeelte van dit gebied wordt ingenomen door een uitgestrekte, ongelijke en over het algemeen ondiepe vlakte met harden grond, Breezand genoemd. Bezuiden den Vlieter gaat het Breezand over in de Wieringer Vlaak en Gammels; bezuiden de Middelgronden, voortzetting

van het Zuidoostrak, in de Friesche Vlaak, welke vlakten over het algemeen iets gelijkmatiger en dieper dan het Breezand zijn.

Nog meer naar het Zuiden, ongeveer nabij het nauw tusschen Friesland en Noordholland, nemen de diepten toe in geulen tusschen vrij groote banken, waarvan de Kreupel, Kreil, Hofstede en het Vrouwenzand de voornaamste zijn.

Het overgangsgebied wordt in de lengterichting doorsneden door tal van vrijwel evenwijdige, meerendeels niet heel diepe geulen, gevormd door de waterbeweging tusschen de Waddenzee en de kom. Die welke gevormd zijn door het vloedwater stralen uit van de noordwest- en noordoosthoeken van het Breezand en van deze zijn de eerste aanvankelijk zeer diep; de geulen door het ebwater gevormd hebben, als gevolg van de nauwte tusschen de kusten in het zuidelijk deel van het gebied, aanvankelijk ook nog eenige diepte. Al spoedig echter worden zij alle ondieper, zoodat er slechts één is, welke een doorgaande diepte van meer dan 40 dm heeft. Deze geul loopt van den Texelstroom over Breezand en Wieringer Vlaak.

Tusschen het Nesserzand, den noordoosthoek van de Lutjeswaard en de westpunt van den drogen rug bezuiden den Dooven Balg, een afstand van 5 km, vormt de Texelstroom niet minder dan zeven van dergelijke geulen, van elkander gescheiden door de ondiepe Javaruggen, uitloopers van het Breezand. Deze geulen spreiden zich aanvankelijk, tusschen de Lutjeswaard en den drogen rug bezuiden den Dooven Balg, uit als de vingers van een hand doch de oostelijkste buigen spoedig om naar het Zuiden, in de lengterichting van het overgangsgebied. De voornaamste dezer geulen is de westelijkste, de Vlieter, waarin aanvankelijk 16 m water staat, doch die zeer spoedig ondieper wordt en de scheepvaart slechts een vaarweg biedt met 31 dm minste water.

Op bescheidener wijze is dezelfde configuratie aanwezig bij de scheiding van Dooven Balg en Zuidoostrak. Hier zijn slechts een drietal geulen aanwezig, waarvan de oostelijkste de voornaamste is. Deze wordt de Middelgronden genoemd, is aanvankelijk tot 12 m diep, doch wordt ook spoedig ondieper, zoodat de scheepvaart, die geul volgende, verderop slechts 35 dm doorgaande diepte vindt.

De evenwijdigheid dezer geulen wijst op een heen en weer trekken van de getijstroomen in de lengterichting van het overgangsgebied. Over het noordgedeelte van het Breezand treft men evenwel ook dwarsstroomen aan, welke gevolg zijn van de wisselwerking tusschen de boven beschreven, door Texelstroom en Zuidoostrak gevormde vloedgeulen, waarin de waterbeweging altijd nog aanmerkelijk in phase verschilt.

Bewesten dit gebied ligt Wieringen met omgeving en de Meer, welke een ander karakter vertoonen.

Het min of meer dwars in den weg liggende diluviale eiland Wieringen doet de getijbeweging der overige Zuiderzee grootendeels buiten de Meer om gaan, zoodat deze, met de omgeving van het eiland, min of meer een eigen waterbeweging bezit.

Uit het Malzwin, geleid door het Amsteldiep aan eene zijde en door den Wierbalg en het Gaatje aan de andere, bereikte het vloedwater rond Wieringen van twee zijden de Meer en stroomde het ebwater langs die geulen weg. Verreweg het grootste gedeelte volgde den westelijken weg.

Ook door den Vlieter stroomt water naar de Meer aan en af, doch de aanwezigheid van de beide Zeugbanken, alsmede van een derde, welke beoosten deze beide ligt, maakt dat de hoeveelheid daarvan betrekkelijk gering is.

De splitsing van Amsteldiep en Wierbalg ligt ongeveer 5 km ten noordwesten van Wieringen. Tusschen deze vaarwaters ligt de droogvallende Breehorn, welke zich tot de kust van Wieringen uitstrekt.

Het Amsteldiep was vóór de afsluiting van dat vaarwater in 1924 tot voorbij de nauwte tusschen de kusten van Wieringen en Noordholland

meer dan 10 m diep. Verder zuidwaarts verdeelt het zich in verscheidene uitstralende geulen, welke nagenoeg alle verlopen in de Wieringerwaard.

De Wierbalg wordt vervolgd door het zeer veranderlijke Gaatje, dat zich rond den oostkant van Wieringen buigt.

Deze veranderlijkheid, alsmede het tamelijk verwarde stelsel van geulen tusschen Wierbalg en Vlieter, wijst op wisselwerking tusschen beide waterwegen.

De Meer bezit een gelijkmatige, geleidelijk toenemende diepte, welke hoogstens 45 dm bereikt. Behalve enkele ondiepere, harde, zelfs steenachtige plekken, is de bodem zacht. Een zekere overeenkomst met de kom is niet te miskennen.

---

## IV. DE WAARNEMINGEN.

### A. DE NORMALE GETIJBEWEGING.

§ 5. *Aanwezige peilschalen.* Bij den aanvang van haar werkzaamheden kon de Staatscommissie reeds dadelijk beschikken over het materiaal verzameld aan de gewone en registreerende peilschalen die rondom de Zuiderzee en Waddenzee waren geplaatst.

De waarnemingen aan de gewone peilschalen waren over het algemeen voldoende om er de noodige gegevens omtrent hoog- en laagwater uit af te leiden.

Van meer waarde echter zijn de diagrammen der registreerende peilschalen. Zij verschaffen alle gegevens, die men voor de kennis van de getijbeweging kan wenschen; zonder deze diagrammen zou het onderzoek der Commissie onmogelijk zijn geweest.

In de Zuiderzee waren in 1918 aanwezig getijmeters te Lemmer (1888), Kraggenburg (1879), Elburg (1877), Nijkerk (1877) en Enkhuizen (1882) en op de eilanden Urk (1858) en Schokland (1874). (De tusschen haakjes geplaatste jaartallen zijn die van het begin van de werking). Bovendien wordt de waterstand buiten de Oranjesluizen sinds 1883 om het uur afgelezen, waardoor voor dat punt gegevens zijn bijeengebracht, die maar weinig achterstaan bij het materiaal dat van een registreerende peilschaal afkomstig is.

Met deze waarnemingstations bleek het mogelijk een voldoende nauwkeurig beeld te vormen van de getijverschijnselen in de kom van de Zuiderzee. Alleen aan de westkust is een groote gaping tusschen de Oranjesluizen en Enkhuizen, een leemte, waarin door de waarnemingen aan de gewone peilschaal te Hoorn niet dan onvoldoende kan worden voorzien. Kon men dus, wat de kom der Zuiderzee betreft, met de beschikbare peilschalen voldaan zijn, anders stond het in het overgangsgebied naar de Waddenzee, in de Waddenzee zelf, de Friesche en Groningsche Wadden en de Noordzee.

Daar waren registreerende peilschalen aanwezig op de volgende plaatsen: Stavoren (1880), Hindeloopen (1887), Harlingen (1876), Roptazijl (1887), Zoutkamp (1876), Delfzijl (1876), aan de Nieuwe Statenzijl (1878), aan de haven van Vlieland (1882), te Helder (1850) en op het Zuiderhavenhoofd van IJmuiden (1883).

De waarnemingen werden aangevuld door die aan gewone peilschalen aan de oostpunt van Wieringen bij den Oever, te Medemblik, Nieuw Bildt (Hooghuis), Ezumazijl, in de havens van Terschelling en Texel, en bij Petten, terwijl ook de geregelde loodingen op de lichtschepen Haaks en Terschellingerbank een niet te versmaden bijdrage leverden.

Het is duidelijk dat het aantal waarnemingspunten ten eenenmale onvoldoende was. In de Waddenzee met haar banken en geulen verloopt het getij veel onregelmatiger dan in de kom van de Zuiderzee, zoodat een dicht net van waarnemingspunten noodig is om een inzicht in de verschijnselen te verkrijgen. Daarbij komt dat hier alle peilschalen aan den rand liggen, omdat een eiland in het midden, zooals Urk in de kom, niet aanwezig is.

Ook is het laagwater aan de peilschalen Zoutkamp, Statenzijl en Vlieland gewijzigd door spuien of verzanding, zoodat het niet den stand op eenigen afstand van de kust in de diepe geulen aangeeft.

Langs de Noordzeekust tast men, wat het getij aangaat, vrijwel in het duister. IJmuiden, waar de eenige goede waarnemingen worden gedaan, ligt 55 kilometer van het Heldersche zeegat; de gewone peilschaal te Petten is alleen bij zeer goed weer met voldoende nauwkeurigheid af te lezen. In 1912 is een poging gedaan om hier een registreerende peilschaal te plaatsen. De diagrammen daarvan zijn van groote waarde, maar de proef moest al spoedig worden opgegeven.

Aan de noordwestkust van Vlieland is in 1865 een enkelen dag een getijlijn opgenomen. Deze waarneming is beschreven in het rapport over den Vliehors in het verslag over de openbare werken voor het jaar 1865 <sup>1)</sup>.

De registreerende peilschalen Helder en Vlieland liggen in de zeegaten en kunnen daardoor geen gegevens voor het Noordzeegetij verschaffen.

De loodingen op de lichtscheperen hebben, doordat zij zich over een zeer lang tijdvak uitstrekken, met vrij groote zekerheid de voornaamste getijconstanten leeren kennen <sup>2)</sup>; voor de standen op een bepaalden dag zijn ze niet te gebruiken. De ligplaatsen bevinden zich bovendien op vrij grooten afstand uit de kust.

Om in dezen onvoldoenden toestand te voorzien werd reeds in de eerste vergadering van commissie A <sup>3)</sup>, die de waarnemingen heeft geleid, besloten het aantal peilschalen belangrijk uit te breiden. Daarbij was het, omdat ook goede waarnemingen bij storm moesten worden gedaan, noodzakelijk registreerende peilschalen te gebruiken.

De nieuwe waarnemingspunten waren voor een belangrijk gedeelte zoodanig gelegen, dat het gebruikelijke type niet kon worden toegepast. Men was hier aangewezen op instrumenten met registratie op een afstand.

§ 6. *Registreerende peilschalen met electriche overbrenging.* De getijmeters die voor aanwijzing op afstand in aanmerking kwamen moesten bestaan uit een in zee geplaatst toestel, hetzij een vlotter of een manometer, waarvan de stand aan den wal wordt geregistreerd. Registratie ter plaatse was uitgesloten, omdat het daarbij altijd benodigde uurwerk bij sterken golfslag wordt beschadigd of blijft stilstaan, terwijl bij ruwe zee de waarnemer het toestel soms dagenlang niet kan bereiken.

Er moest dus een overbrenging komen tusschen het opnemend gedeelte in zee en het registreerend gedeelte aan land. Deze overbrenging kan zijn hydraulisch, pneumatisch of electricch.

In Nederland was een dergelijke inrichting nog bijna niet toegepast, zoodat de ervaring van het buitenland moest worden te hulp geroepen. Met het oog op de tijdsomstandigheden werd er van afgezien een studiereis te maken en men moest dus op de beschikbare literatuur afgaan. Het bleek dat electriche overbrenging in Duitschland meermalen was toegepast, maar het was niet mogelijk te weten te komen hoe de instrumenten op den duur hadden voldaan. De in den handel voorkomende toestellen voor het op een afstand aanwijzen van den stand van den vloeistofspiegel in reservoirs, welke toestellen veelal electriche overbrenging hebben, voldoen niet aan de eischen, die aan op zee werkende instrumenten moeten worden gesteld.

Nog geringer was het resultaat van het onderzoek naar hydraulische en pneumatische overbrenging. Er werd alleen bij geruchte vernomen dat het laatste systeem bij het Panamakanaal is toegepast.

Ten slotte werd besloten te trachten electriche instrumenten te construeeren. Achteraf gezien is het wel te betreuren dat met deze zaak

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 76.

<sup>2)</sup> „ „ n<sup>o</sup>. 42, II.

<sup>3)</sup> De Commissie vormde uit haar midden een drietal studiecommissies, nl. A, voor de waarnemingen op waterloopkundig gebied, onder leiding van den heer WORTMAN; B, voor meteorologische en oceanografische problemen, gepresideerd door Prof. VAN EVERDINGEN en C, voor theoretische vraagstukken, onder leiding van den Voorzitter. Door den loop dien de onderzoekingen namen, heeft echter deze laatste commissie niet als zoodanig aan de werkzaamheden behoeven deel te nemen.

zooveel spoed moest worden gemaakt en geen tijd voor rustige voorbereiding kon worden genomen. Met de aangeschafte instrumenten zijn groote tegenslagen ondervonden. De kosten zijn hoog geweest en de gegevens, die met veel moeite bijeengebracht zijn, waren voor het beoogde doel maar juist voldoende. En later bleek, dat in Denemarken toestellen in bedrijf waren, zoowel met hydraulische als met pneumatische overbrenging, waarvan het eerstgenoemde type zeer geschikt is voor waarnemingen aan onze Noordzeekust. Voortbouwende op de door de Denen verkregen ervaring zou het niet moeilijk zijn geweest de waarnemingen beter te doen dan thans geschied is en wel met veel minder kosten dan thans.

Met een tweetal Nederlandsche fabrieken werd een overeenkomst gesloten voor het vervaardigen van zeven instrumenten met electriche overbrenging. De installatie in zee bestaat uit een stevig bevestigde verticale plaatijzeren buis, waarvan het inwendige door kleine openingen beneden den laagsten aan te teekenen waterstand in verbinding staat met het buitenwater. Bij de Noordzeepeilschalen was om deze buis een tweede wijdere mantel, eveneens met gaatjes, aangebracht om de golfbeweging beter te dempen.

In de buis kan een vlotter met den waterspiegel op en neer gaan. De bewegingen van dezen vlotter beheerschen door tusschenkomst van den ophangdraad de werking van het in den kop van de buis aangebrachte zendapparaat.

Er bleken twee methoden te bestaan om den vlotterstand te registreeren. Bij de eene ontvangt het registreertoestel telkens, wanneer de hoogte van den vlotter met een bepaald bedrag (b.v. 2 cm) is veranderd, een electriche impuls, waardoor de registreerstift over een overeenkomstigen afstand wordt verplaatst. Dit systeem, dat men het trapjestyle kan noemen, komt bij alle vroeger uitgevoerde toestellen voor.

De andere methode, het z.g. weerstandstype, is geheel nieuw. Het zendapparaat bevat daarbij één of meer veranderlijke weerstanden, waarvan de grootte door den vlotterstand wordt bepaald. Deze weerstanden beheerschen op hun beurt den stand van de registreernaald<sup>1)</sup>.

Tegen het trapjestyle pleit de mogelijkheid dat het registreerinstrument door het niet reageeren op een stroomstoot, of door valsche stroomstooten verkeerd gaat aanwijzen. Bij het weerstandstype is dat onmogelijk: bij iederen vlotterstand behoort één bepaalde aanwijzing van het registreerinstrument. Met het oog op het gemis aan ervaring met dit type werd het echter onverantwoordelijk geacht alles op één kaart te zetten, waarom men besloot ieder systeem op een deel van de te bouwen getijmeters toe te passen. Bij de Noordzeepeilschalen werd van het trapjestyle gebruik gemaakt, terwijl de overige volgens het weerstandstype werden ingericht.

De eerste zijn een mislukking geworden, ondanks de gestadige pogingen van de Haarlemsche Machinefabriek om de bezwaren te overwinnen. De bovengenoemde oorzaken van storing waren niet te vermijden en het stroomverbruik bleek zoo groot te zijn dat de verzorging op de afgelegene plaatsen met electriche energie (accumulatorbatterijen) heel wat last veroorzaakte. Ten slotte is men er toe overgegaan ook hier een inrichting van het weerstandstype aan te brengen. Hierbij verleende de adjunct-directeur bij het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut, Dr. C. SCHOUTE, die tot ontwikkeling dezer methode van registreeren veel heeft bijgedragen, zijn medewerking.

Bijlage 1 bevat schetsteekeningen en schakelschema's van de electriche peilschalen.

Dat zeer gunstige omstandigheden aanwezig moeten zijn om een toestel volgens het trapjestyle goed te doen werken bleek bij een bezoek, dat de tweede-secretaris in 1923 aan de Deutsche Seewarte te Hamburg bracht. Daar is een dergelijk instrument in werking<sup>2)</sup>. De vlotter bevindt er zich

<sup>1)</sup> Het instrument, dat eenigen tijd op het Noorderhoofd van Hoek van Holland heeft gestaan en dat bij den stormvloed van 22/23 December 1894 is weggeslagen, was een overgangsvorm tusschen de beide typen.

<sup>2)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 66.

in rustig water, het stadsnet is beschikbaar om electricische energie te leveren, het registreer-apparaat bevindt zich in de werkkamer van één der leden van den staf, zoodat het instrument voortdurend onder zeer deskundig toezicht staat, en nog is de werking, hoewel bevredigend, niet onberispelijk.

De instrumenten van het weerstandstype (vervaardigd door de toenmalige Algemeene Nederlandsche Electriciteits Maatschappij) hebben over het algemeen gedaan wat er van verwacht kon worden. Toch bleek het, dat ook zij veel meer onderhevig zijn aan storingen dan de normale registreerende peilschalen. Er wordt veel meer van de waarnemers gevergd om een goede werking te verkrijgen, terwijl geregeld vakkundig onderhoud en toezicht noodig is om haperen te voorkomen.

§ 7. *Dieptemeters.* In afwachting van het tot stand komen van de nieuwe peilschalen heeft de Staatscommissie aanstonds partij getrokken van de toevallige aanwezigheid van een aantal voor Nederlandsch-Indië aangeschafte z. g. dieptemeters systeem DE VRIES, die door tusschenkomst van het Departement van Marine door het Departement van Koloniën ter beschikking van de Commissie werden gesteld.

Van deze instrumenten komt een uitgebreide beschrijving voor in het Marineblad van 20 December 1917 <sup>1)</sup> en een minder uitvoerige in „de Ingenieur” van 20 April 1918 <sup>2)</sup>. Het zijn kleine verplaatsbare toestellen, die in een waterdicht omhulsel onder water worden geplaatst. Het voor-naamste orgaan is een klep, die door den waterdruk tegen de werking van een veer in wordt verplaatst. De stand van deze klep, die een maat is voor de hoogte van den zeespiegel daarboven, wordt elk half uur door een prik van een registreernaald op het diagram aangegeven. Een caoutchoucslang, die tot boven de hoogste waterstanden reikt, zorgt ervoor dat de luchtdruk in het inwendige van het toestel gelijk blijft aan dien op het wateroppervlak, waardoor de aantekening onafhankelijk is van veranderingen van barometerstand en watertemperatuur.

Oorspronkelijk waren de toestellen bestemd om dienst te doen bij de hydrografische opnemingen. In verband daarmee was de nauwkeurigheid niet zoo groot als voor de waarnemingen van de Staatscommissie wel gewenscht was: de waterstand werd slechts in decimeters gegeven. Door het aanbrengen van eenige verbeteringen gelukte het echter de nauwkeurigheid op te voeren, zoodat thans de fouten zelden grooter zijn dan een tweetal centimeters.

Iets grooter wordt de onzekerheid wanneer de toestellen zonder luchtleiding, dus geheel gesloten, worden gebruikt. Er moeten dan correcties worden aangebracht voor barometerstand en watertemperatuur, maar daartegenover staat, dat het instrument in dit geval op eenvoudige wijze op korten afstand van den bodem hangende kan worden geplaatst. Men is in dat geval dus niet gebonden aan eenige vaste opstelling, terwijl de kans op beschadiging door golfslag practisch is geëlimineerd.

De verkregen resultaten waren zoo belangrijk, dat in 1922 werd besloten het aantal dieptemeters uit te breiden met een serie instrumenten van gewijzigd type. De klep beweegt daarbij een rad dat langs den omtrek is voorzien van een op een doorzichtige stof aangebrachte verdeeling. Op gezette tijden wordt het stuk van die verdeeling dat zich bij een vasten index bevindt gefotografeerd. Van deze fotografische dieptemeters, die wat gevoeliger zijn voor goede behandeling dan de oude, komt een beschrijving voor in het Marineblad van 15 September 1924 <sup>3)</sup>.

§ 8. *Andere wijzen van waarneming.* Bij de stroommetingen (§ 12) is, wanneer de mogelijkheid daarvoor bestond, de waterstand geregeld

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 67.

<sup>2)</sup> „ n°. 68.

<sup>3)</sup> „ n°. 69.

afgelezen aan een in den bodem geplaatsten slaggaard of peilstok. Deze stokken zijn verdeeld in decimeters, waarvan in den regel het vierde deel kan worden afgelezen. De nauwkeurigheid staat, behalve wanneer de omstandigheden zeer gunstig zijn, achter bij die van registreerende instrumenten, maar toch zijn op deze wijze voor verscheidene plaatsen in de Waddenzee de voornaamste gegevens verkregen.

Aan het Noordzeestrand is op een tweetal plaatsen gebruik gemaakt van z.g. vloeipeilschalen. Deze peilschalen, die zijn uitgedacht door den toenmaligen ingenieur van den Rijkswaterstaat te Hoorn, Ir. J. A. RINGERS, bestaan uit een rij in het strand geslagen paaltjes met door zink afgedekte koppen. Van elk paaltje heeft de kop een bepaalde hoogteligging, zóó dat intervallen van 5 of 10 cm ontstaan. Door te beoordeelen hoe lang de verschillende koppen bij elke golf overstroemd worden, kan een waarnemer zelfs bij zware branding den zeestand aflezen. De hierbij bereikte nauwkeurigheid is verrassend groot; bij tamelijk rustig weer loopen de aflezingen van twee waarnemers zelden meer dan een centimeter uiteen, terwijl men zelfs bij zeer zwaren storm nog zeker is van de decimeters.

§ 9. *Nieuw opgerichte peilschalen in de Waddenzee.* Nog in 1918 werd een aantal registreerende peilschalen besteld om te worden opgesteld langs de kust van Waddenzee en Wadden. Oorspronkelijk was het de bedoeling ze te plaatsen te van Ewijcksluis, den Oever, Medemblik, Piaam, Nieuw Bildt, Noordpolderzijl en aan de binnenzijde van Ameland. Het bleek echter dat aan de van Ewijcksluis en te Piaam geen goede gelegenheid bestond voor het oprichten van een getijmeter, waarom deze beide opstellingsplaatsen werden opgegeven en vervangen door Westerland en Makkum.

Een vijftal peilschalen kwam in 1919 in dienst. De instrumenten zijn sindsdien geregeld in bedrijf gebleven en hebben weinig aanleiding tot klachten gegeven.

Aan de Friesche kust op de hoogte van het Nieuw Bildt en aan de binnenzijde van Ameland was het niet mogelijk getijmeters van het gebruikelijke type op te stellen; daar zijn toestellen met electriche overbrenging (§ 6) geplaatst. De eerste stond voor het Hooghuis, die bij Ameland in een geultje bij Hollum. Oorspronkelijk was het de bedoeling dit laatste instrument meer midden achter het eiland, bij Ballum, te plaatsen, doch daar bestaat de bodem buiten den stroom veelal tot groote diepte uit slib, waardoor het onmogelijk was een vaste opstelling te verkrijgen. Het kleine geultje met een zandbodem in de onmiddellijke nabijheid van de hoofdgeul van het Amelandsche zeegat vormde een uitmuntend waarnemingspunt. Alleen de lage laagwaters waren niet betrouwbaar.

Deze twee electriche peilschalen werden in Juni 1920 in werking gesteld. Die te Hollum is in den winter 1921/1922 door ijsgang vernield, die voor het Nieuw Bildt werd een jaar later buiten gebruik gesteld en is sindsdien afgebroken. Het in werking houden van deze peilschaal vereischte veel zorg en toezicht, terwijl de benoodigde gegevens toen reeds waren verkregen.

Om in het zeegat van Terschelling te kunnen beschikken over betere waarnemingen dan die van den getijmeter van Vlieland werd in 1920 besloten om ook in de haven van Terschelling een registreerende peilschaal op te stellen. Nadat door voorloopige metingen was vastgesteld dat de niveauverschillen in de havengeul van geen beteekenis zijn, werd een opstellingsplaats achter in de haven gekozen. In afwachting van de voltooiing van de peilschaal van het gewone model, die in November 1921 gereed kwam, is in November 1920 tijdelijk een instrument met electriche overbrenging geplaatst, dat in het begin van 1922 weer werd opgebroken en voor andere doeleinden gebruikt.

In verband met het onderzoek naar de afsluiting van het Amelandsche Wad werd het noodig geoordeeld ook op Schiermonnikoog een registreer-instrument te plaatsen. Men was hier weer aangewezen op registratie op

afstand en daarom werd hier een dergelijke installatie als te Hollum gemaakt. De eerste registrering werd in het voorjaar van 1921 verkregen, maar er werden voortdurend moeilijkheden met dit instrument ondervonden. Telkens weer kwamen haperingen voor en reeds binnen het jaar werd ook deze peilschaal het slachtoffer van den zwaren ijsgang van begin 1922. Gelukkig zijn in de schaarsche perioden waarin de werking goed was zooveel waarnemingen, ook bij storm, verzameld, dat niet van een mislukking kan worden gesproken.

De geborgen onderdeelen zijn overgedragen aan den Dienst der Zuiderzeewerken. Zij zijn na herstelling gebruikt voor de peilschaal „Amsteldiep”, aan de westpunt van Wieringen ten zuiden van den afsluitdijk. Deze peilschaal heeft gedurende en na den aanleg van dien dijk in combinatie met die van „Westerland” (onmiddellijk ten noorden van de afsluitingslijn) uiterst belangrijke diensten bewezen.

Vaste opstellingsplaatsen voor dieptemeters werden gemaakt op de volgende punten:

Breezand, in het midden van de afsluitingslijn Wieringen—Piaam;

Piaam, aan den westrand van de Makkumerwaard;

Zurig, dicht bij den zeedijk ten noordoosten van den uitspringenden hoek aldaar;

Hendrik Tjaarsplaat, aan den ducdalf van het Loodswezen aan den zuidwal van de Blauwe Slenk;

Holwerd, in één van de gaten van den vervallen verbindingsdam naar Ameland en

Oostmahorn, aan den steiger.

Bovendien zijn bij Westerland en den Oever dieptemeters opgesteld geweest vóór de registreerende peilschalen daar in werking waren.

Aan de vaste gewone peilschalen in de havens van Oude Schild, den Oever en Terschelling en aan die van Nieuw Bildt werden nu en dan waarnemingen om het uur of met korter tusschenpoozen gedaan, wat de laatste drie betreft alleen vóór de registreerende instrumenten gereed waren.

Ten slotte zijn op een groot aantal punten in de Waddenzee afgesloten dieptemeters (zie § 7) geplaatst geweest of waarnemingen aan slaggaarden en tijdelijke peilschalen verricht.

§ 10. *De Noordzeewaarnemingen.* De bedoeling van de Noordzeewaarnemingen was een inzicht te verkrijgen in de hoogteverschillen van het wateroppervlak die in en nabij de zeegaten voorkomen, in het bijzonder bij storm. In en binnen de zeegaten was daarvoor in het algemeen een voldoende aantal waarnemingspunten aanwezig; aan de buitenzijde, dus in de Noordzee, ontbraken zij echter geheel. De nieuw op te richten waarnemingspunten moesten, wanneer zij den zuiveren Noordzeestand zouden aangeven, buiten den invloed van de zeegaten, dus buiten de bankengebieden (buitengronden), worden gekozen. Het lag voor de hand de peilschalen op te richten midden voor elk Waddeneiland, terwijl aan de kust van het vasteland van Noordholland Callantsoog ver genoeg buiten de gronden ligt om in aanmerking te komen.

Besloten werd op de volgende punten peilschalen te plaatsen:

Callantsoog, bij strandpaal 13;

Texel, bij strandpaal 19 even ten zuiden van de Koog;

Vlieland, bij strandhoofd 10 tusschen de strandpalen 42 en 43;

Terschelling, bij strandpaal XVI.

De twee belangrijkste zeegaten, het Texelsche zeegat en het Vlie, waren op deze wijze voldoende van waarnemingspunten voorzien, terwijl door extrapolatie met voldoende zekerheid tot het Noordzeegotij buiten het zeegat van Ameland kon worden besloten. De plaatsing van een vijfde peilschaal, op Ameland, waartoe in principe was besloten, is met het oog op de kosten, waaraan het verwachte resultaat niet geëvenredigd werd geoordeeld, achterwege gelaten.

Uit den aard der zaak was het meten der waterstanden op deze plaatsen zeer moeilijk en er is dan ook van het begin af rekening gehouden met de mogelijkheid van een mislukking.

Waarneming aan gewone peilschalen is in den regel onnauwkeurig, vooral bij storm; registreerende peilschalen van de gewone soort waren zeer zeker niet te gebruiken omdat de toeleidingbuis ongetwijfeld zou verzanden of breken, terwijl het zeeëinde of zou ontgronden of onder het zand geraken.

De ervaring die in 1912 te Petten is opgedaan leerde dat een in zee geplaatst instrument bij ruw weer evenmin bruikbaar is.

Daarom werden instrumenten met elektrische overbrenging gemaakt (§ 6), waarbij het trapjestype werd gekozen. De registreertoestellen werden op de eilanden in een houten loodsje achter den buitenduinregel geplaatst en te Callantsoog in de directiekamer van den Waterstaat ondergebracht. De vlotterbuizen werden geplaatst op de dieptelijn van 2,5 meter onder laagwater.

De opstelling leverde groote bezwaren op. Door na-oorlogsche moeilijkheden ging het goede seizoen van 1919 voorbij eer de eerste vlotterbuis met steunconstructie in de fabriek kon worden geleverd. Een poging om de peilschaal van Callantsoog in den herfst aan te brengen liep uit op vernieling van de nog niet voltooide constructie door golfslag. Het geheele werkseizoen 1920 verliep eer de vier peilschalen geplaatst waren. Er kon alleen gewerkt worden met oostenwind bij afwezigheid van deining en bovendien noodzaakte de aanwezigheid van een harde veenlaag, die het inbrengen van de tot steun van de vlotterbuis dienende schroefpalen verhinderde, eenige malen een andere plaats op te zoeken.

Het maken van een betrouwbare elektrische overbrenging tusschen vlotter en registreerstift bleek bezwaarlijker te zijn dan men zich had voorgesteld. Toen de opstelling van de eerste peilschaal — die van Callantsoog — gereed kwam, was het nog niet gelukt een bruikbaar registreerinstrument te construeeren. Deze peilschaal is toen in bedrijf gesteld met het reserve-instrument van het weerstandstype, dat daarvoor slechts weinig behoefde te worden gewijzigd.

Helaas werd een sterke plaatselijke afname van den zeebodem voor het instrument noodlottig. De vlotterbuis, die oorspronkelijk meer dan 2 meter diep in den bodem was ingespoten, raakte geheel ontgrond en de constructie, die daarop niet berekend was, werd vernield toen, slechts vier dagen na den aanvang van de geregelde registratie, de zee ruw werd. Na berging is het instrument in de haven van Terschelling gebruikt (§ 9); de ijzerconstructie werd hersteld en gewijzigd, waarna zij ten derden male werd opgesteld. Ditmaal is het toestel in de laagwaterlijn geplaatst, waardoor de waarneming van de laagwaters moest vervallen.

In October 1920, toen de vier steunconstructies waren voltooid, was het nog steeds niet gelukt het vraagstuk van de elektrische overbrenging op te lossen. Een proefapparaat werd op Texel geplaatst, het werkte enkele malen, waaronder een keer 14 dagen lang, bevredigend, maar begon daarna weer te haperen. Het eerste definitieve instrument werd in December te Callantsoog in werking gesteld waar het tot Mei 1921 met veel haperingen gewerkt heeft.

Vóór de andere toestellen waren afgeleverd gingen tengevolge van den stormvloed van 18/19 Januari 1921 de steunconstructies in zee op Texel en Terschelling verloren; op Vlieland werd het instrument kort daarna voltooid, een goede werking kon echter niet worden verkregen.

Intusschen was het eerste toestel van het weerstandstype systeem-SCHOUTE gereed gekomen. Het werd gebruikt ter vervanging van het trapjesinstrument te Callantsoog, waar het behoorlijk gewerkt heeft, tot deze peilschaal in de stormperiode op het eind van 1921 ten derden male werd vernield. De opstelling buiten Vlieland onderging hetzelfde lot vóór het daarvoor bestemde toestel-SCHOUTE was aangebracht.

Al het resultaat van het werk met dit viertal registreerende peilschalen is dus geweest:

Callantsoog: 4 dagen volledige getijlijn en een jaar getijlijn, waarbij de meeste laagwaters ontbreken. Hierbij de stormvloed van 18/19 Januari en in het tijdvak van 23 October tot 21 December 1921.

Texel: ongeveer 20 dagen gewoon getij.

Vlieland en Terschelling: niets.

Voor het Vlie is dus in het geheel geen resultaat verkregen. Om hieraan tegemoet te komen zijn aan weerszijden van dit zeegat op het strand in 1921 vloei-peilschalen (§ 8) geplaatst. Die op Vlieland stond op dezelfde plaats als de registreerende peilschaal (strandhoofd 10), op Terschelling werd de opstelling dicht bij het zeegat (strandpaal XI) gekozen. Deze peilschalen zijn een tijd lang overdag geregeld waargenomen, daarna alleen bij stormvloed. In 1922, nadat de verlangde gegevens in hoofdzaak waren verkregen, zijn zij weder buiten gebruik gesteld.

§ 11. *De bereikte resultaten.* Bij het verwerken van de waarnemingen aan de in de vorige §§ genoemde peilschalen is over het algemeen gebruik gemaakt van de methode der harmonische analyse der getijden, die in § 41 zal worden beschreven. Voor alle punten waar minstens 14 dagen onafgebroken waarnemingen zijn verricht werden de voornaamste getijconstanten benaderd. Bovendien werd voor Terschelling en den Oever een volledige analyse uitgevoerd van de waterstanden van het geheele jaar 1921. Wat den Oever betreft, moet rekening worden gehouden met den invloed van de in den loop van dat jaar uitgevoerde havenwerken, die een waarneembare uitwerking op de getijbeweging hebben gehad.

De voor verschillende plaatsen bepaalde constanten zijn onderling niet rechtstreeks vergelijkbaar. Zij zijn afgeleid uit de waarnemingen in verschillende tijdvakken en zijn daardoor ook op verschillende wijzen gestoord. Die constanten zullen dus afwijken van wat men de „normale waarde” daarvan zou kunnen noemen en waarvoor men de gemiddelde waarde over een zoo lang mogelijke periode kan nemen. Hoe korter het tijdvak is, dat voor het bepalen van de constanten heeft gediend, des te grooter zal in den regel het verschil met de normale waarde zijn.

Voor eenige peilschaalstations heeft men de constanten berekend over perioden waarvan de gezamenlijke lengte zoo groot is, dat men de normale waarden kan vaststellen. Deze berekeningen zijn voor het grootste deel uitgevoerd door VAN DE SANDE BAKHUYZEN <sup>1)</sup>, VAN DER STOK <sup>2)</sup> en VAN BERE-STEIJN <sup>3)</sup>; de namen van deze „hoofdstations” zijn in bijlage 2 onderstreept.

Om ook de normale waarden van de constanten der overige plaatsen, „tusschenstations”, te vinden is de volgende weg ingeslagen. Eerst werden voor hetzelfde tijdvak dat gebruikt is voor de bepaling van de constanten van het tusschenstation (*a'*) ook de constanten van één of meer der hoofdstations, in den regel Helder en (of) Terschelling, (*b'*) bepaald. Door deze laatste te vergelijken met de normale waarden (*b*) daarvan, kan men de gezochte normale waarden voor het tusschenstation (*a*) bepalen door:

$$a : a' = b : b'$$

voor amplituden, en voor fasen (kappagetallen) door

$$a - a' = b - b'.$$

Is de verhouding *b* : *b'* of het verschil *b* — *b'* voor alle gebruikte hoofdstations niet geheel gelijk, dan moet men door interpolatie de meest geschikte grootte ervan bepalen. Op deze wijze zijn de getijconstanten van de niet-onderstreepte plaatsen in bijlage 2 gevonden.

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 39.

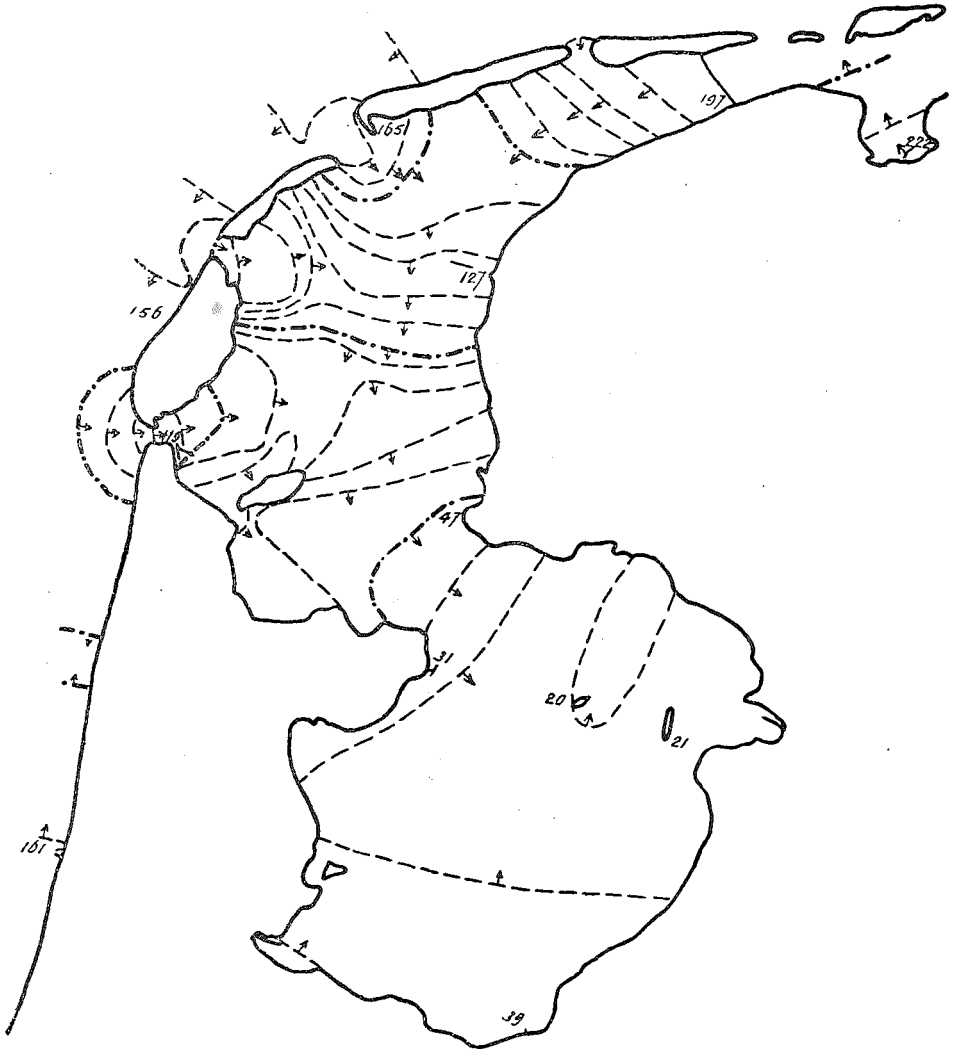
<sup>2)</sup> „ „ n°. 42.

<sup>3)</sup> „ „ n°. 46 en 47.

Een dergelijke gedachtengang is gevolgd om de grootheden: gemiddeld hoogwater en laagwater, middenstand en tijverschil te bepalen. Als „normale” grootheden dienden hier de uit de „Tienjarige Overzichten”<sup>1)</sup> af te leiden gemiddelden over de jaren 1901 tot en met 1920.

De resultaten zijn bijeengebracht in bijlage 2, terwijl met de daarin voorkomende gegevens de kaartjes en diagrammen fig. 1-4 zijn geteekend.

#### GEMIDDELD TIJVERSCHIL.



Figuur 1.

Figuur 3 is te beschouwen als een aanvulling van het kaartje voor  $M_2$  dat voorkomt achter in deel IV van de Etudes van VAN DER STOK<sup>2)</sup>. Door de waarden van het gemiddeld tijverschil van figuur 1 te deelen door 2,2 verkrijgt men met vrij groote benadering de amplituden voor  $M_2$ . Zoodoende kan men ook deze figuur met het kaartje in de Etudes vergelijken.

Het kaartje van de middenstanden, figuur 2, zal later (§ 16) worden besproken.

Figuur 4 stelt de voortplanting van het hoofdgetij langs de Belgische, Nederlandsche en Duitsche kust en in de zeearmen en riviermonden voor. Voor elke op het diagram door een punt voorgestelde plaats is de amplitude aangegeven door den afstand tot het middelpunt (schaal 1:10). De tijd die verloopt tusschen den doorgang van de maan door den meridiaan en het oogenblik van hoogwater, wordt voorgesteld door den hoek tusschen de nulrichting (naar rechts) en de verbindingslijn met het middelpunt, den vector van de beschouwde plaats en wel in dier voege dat  $360^\circ$  aan de volle periode be-

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 29.

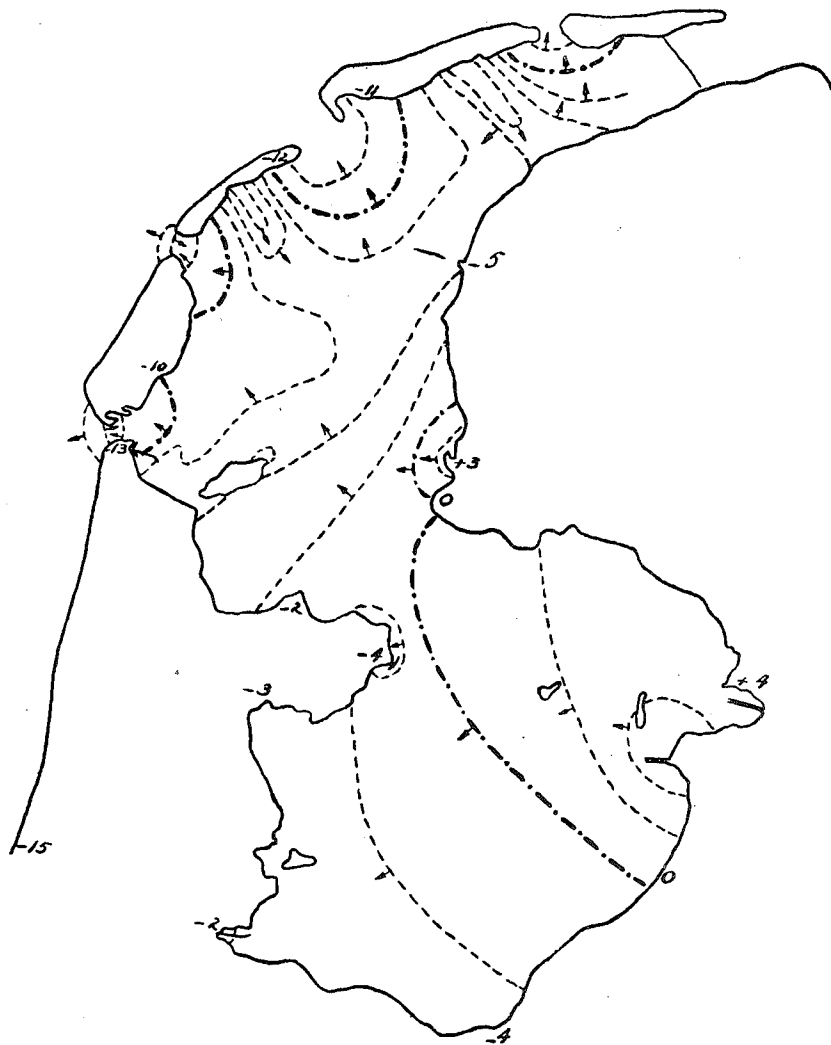
<sup>2)</sup> „ n<sup>o</sup>. 42.

antwoordt en dus een uur met  $29^\circ$  overeenkomt. Het aantal graden van dezen hoek is wat men het kappagetal ( $\kappa$ ) noemt.

Door de uiteinden der vectoren voor verschillende plaatsen te vereenigen verkrijgt men eenigszins een overzicht over den loop van het getij. De voortplanting geschiedt in de richting in welke het kappagetal grooter wordt, dus b.v. zoowel van Hollum als van de Abt naar een punt van de Friesche kust, iets oostelijk van het Nieuw Bildt.

Om zich van deze uitkomsten rekenschap te geven moet men zich voorstellen dat de getijgolven, door de zeegaten binnendringende, zich in de Waddenzee en de Zuiderzee voortplanten, waarbij zij door de weerstanden

#### LIJNEN VAN GELIJKEN MIDDENSTAND.



Figuur 2.

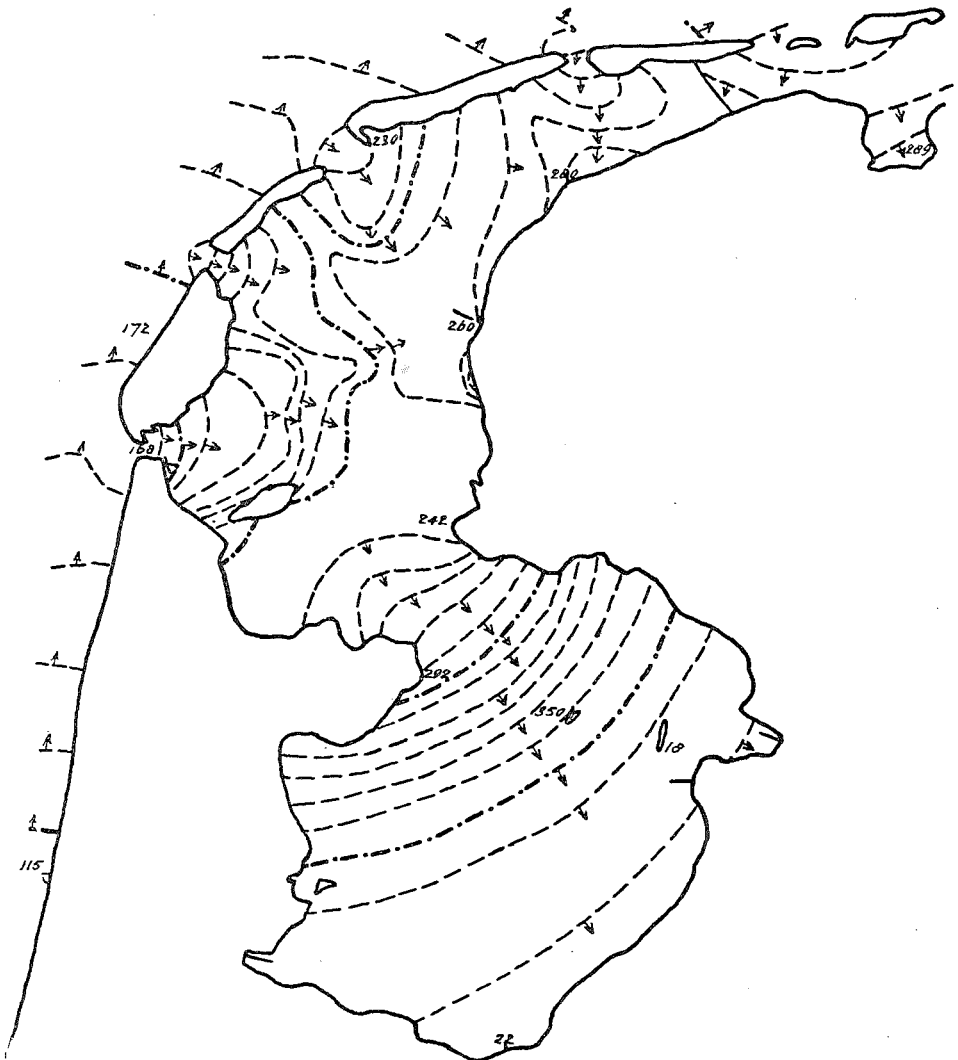
allens worden verzwakt, en dat overal aan de kusten een teruggekaatste beweging ontstaat, die eveneens gedurende haar voortplanting wordt uitgeput. Trouwens, niet alleen aan de kusten, maar overal waar de omstandigheden onder welke de voortplanting plaats heeft, de diepte van het water of de breedte van het gebied, veranderen, zal een terugkaatsing plaats hebben.

Terwijl dit alles in hoofdstuk VI met inachtneming van de configuratie van den bodem in bijzonderheden zal worden nagegaan, zal het voldoende zijn hier op eenige hoofdzaken de aandacht te vestigen.

1. In de eerste plaats verdient het de aandacht dat het Noordzegetij aanmerkelijk sterker is dan men vroeger dacht. Er is geen sprake van dat, zooals men vroeger meende, het minimum van  $M_2$  bij Helder ligt; dit minimum bevindt zich tusschen IJmuiden en Petten, dus vrij veel verder zuidelijk. Bij het Heldersche zeegat is het  $M_2$ -getij alweer sterker dan te IJmuiden (figuur 4).

2. Ten tweede valt de sterke vermindering van het verticale getij bij den doorgang door de zeegaten op; de amplitude is aan het binneneinde daarvan steeds kleiner dan aan het buiteneinde. Het duidelijkste komt dit verschijnsel bij het Heldersche zeegat te voorschijn; men kan opmerken (figuur 1) dat ook het tijverschil, dat grootendeels door  $M_2$  wordt beheerscht, te Helder veel kleiner is dan in de Noordzee. Bij het Eierlandsche zeegat en bij het Vlie is het verschijnsel minder sterk, maar toch duidelijk waarneembaar.

KAPPAGETALLEN VAN HET HOOFDGETIJ  $M_2$ .



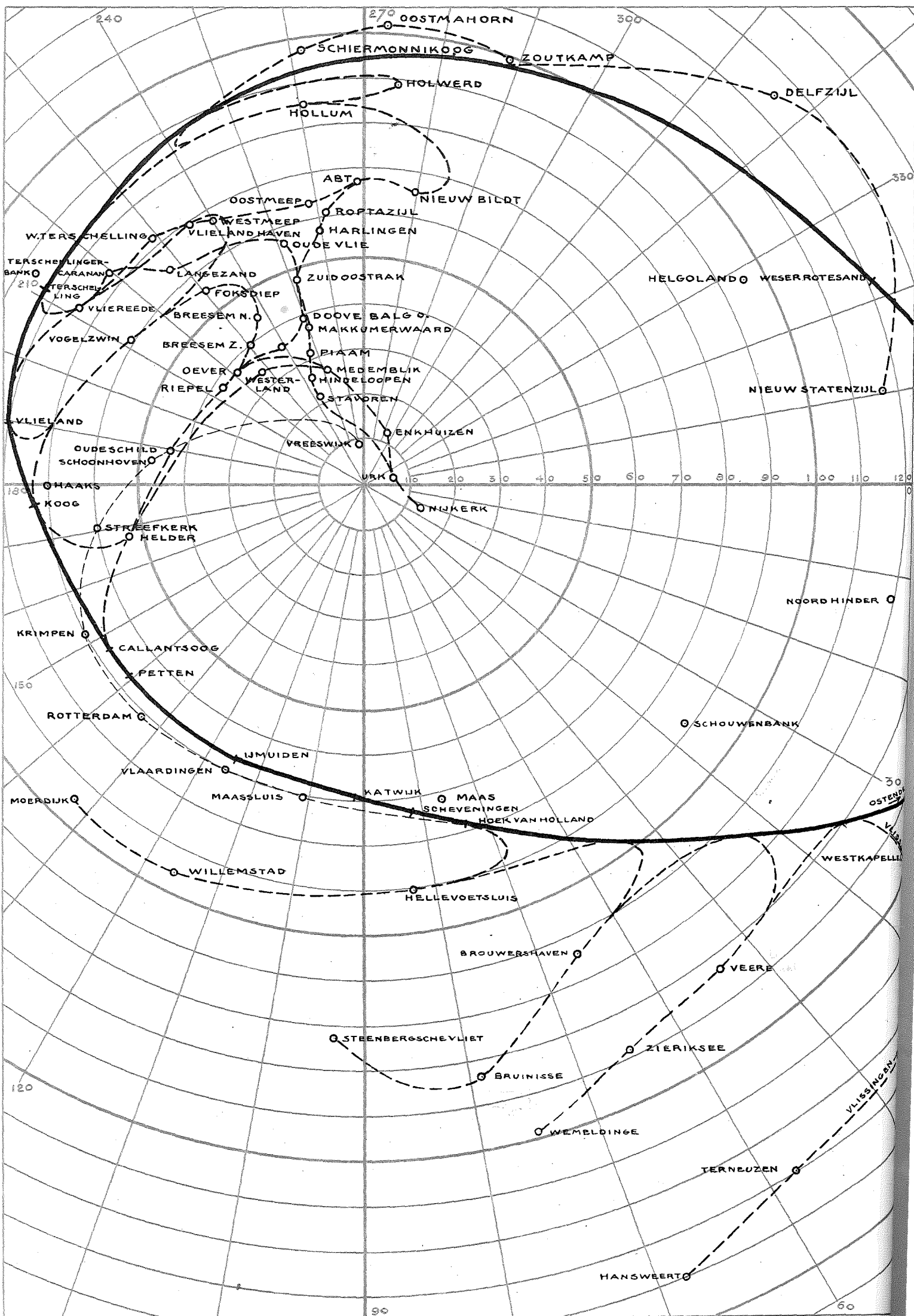
Figuur 3.

In figuur 5, waarop eenige getijlijnen buiten en binnen het Heldersche zeegat zijn geteekend, ziet men hoe de vorm van de kromme van IJmuiden in noordelijke richting geleidelijk verandert; de lijnen voor Helder en Oude Schild vertoonen een zwakker getij. Op figuur 6 zijn dergelijke gegevens voor het Vlie verzameld.

Deze afneming der amplitude is ongetwijfeld het gevolg van de aanwezigheid van een uitgestrekt waterbekken aan de binnenzijde van het zeegat. Zij kan gemakkelijk theoretisch worden verklaard (verg. § 136), als men in aanmerking neemt dat de getijgolven die door het zeegat aankomen op de plaats waar de weg zich verwijdt worden teruggekaatst, op dergelijke wijze als geluidgolven die zich in een buis voortplanten aan het open einde daarvan teruggekaatst worden.

Het is begrijpelijk dat de gemakkelijker waarmede zich de golven van het binneneinde van het zeegat af in de ruimere watermassa kunnen voortplanten ten gevolge heeft dat de amplitude der schommelingen aan dat binneneinde kleiner wordt.

# Vectordiagram van het getij M<sub>2</sub>

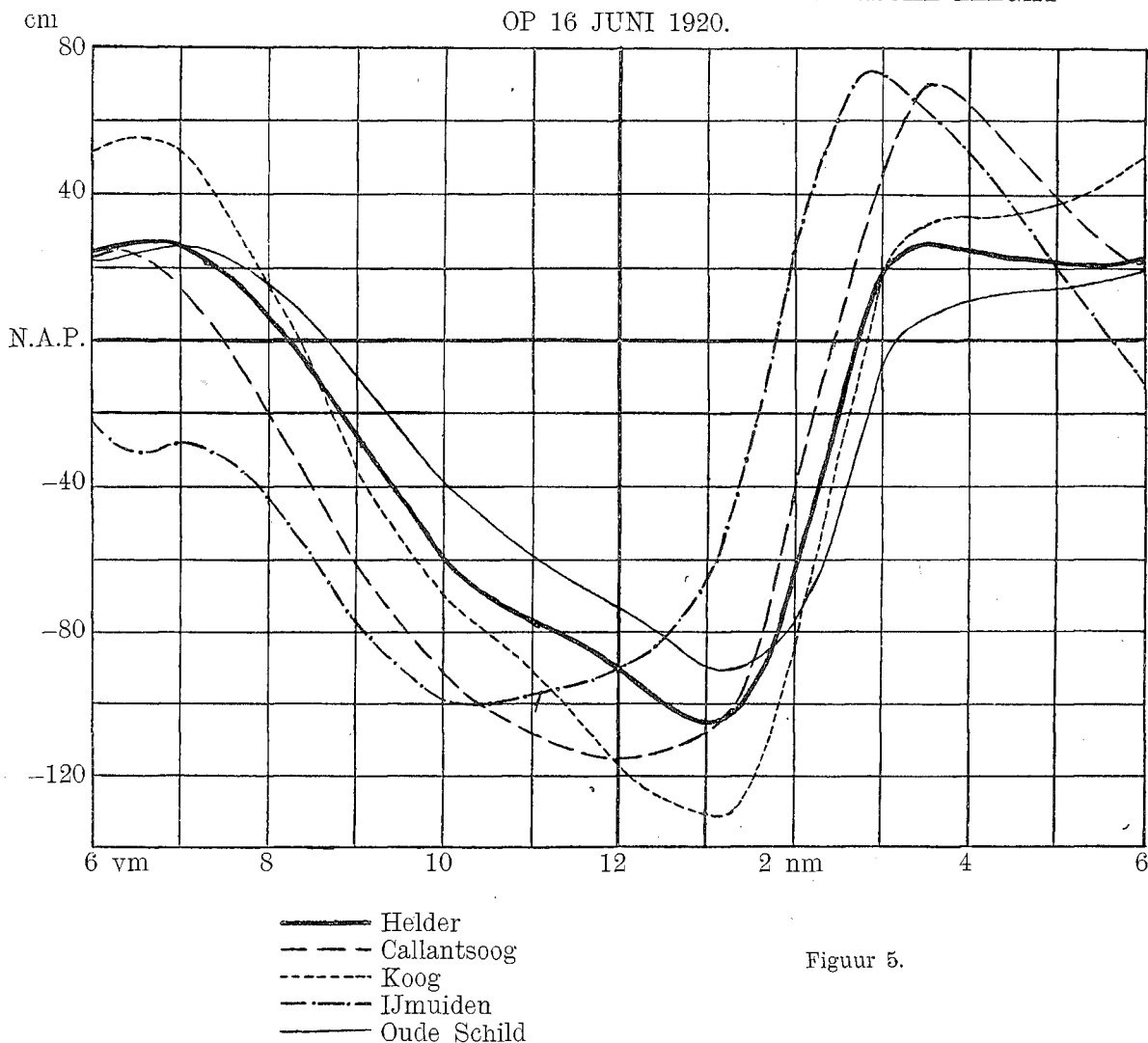


Figuur 4.

Het is nu geheel anders dan het zou zijn als het zeegat was afgesloten of, zich als een trechter vernauwende, verder door liep. Dan zou het verticale getij sterker worden dan in de Noordzee, zooals men dat bij de riviermondingen in het Zuiden van ons land kan opmerken (figuur 4).

Bij de zeegaten voorbij Terschelling zijn de waarnemingspunten niet talrijk genoeg om de verschijnselen in bijzonderheden na te gaan, maar

WATERSTANDEN BUITEN EN BINNEN HET HELDERSCHE ZEEGAT  
OP 16 JUNI 1920.



Figuur 5.

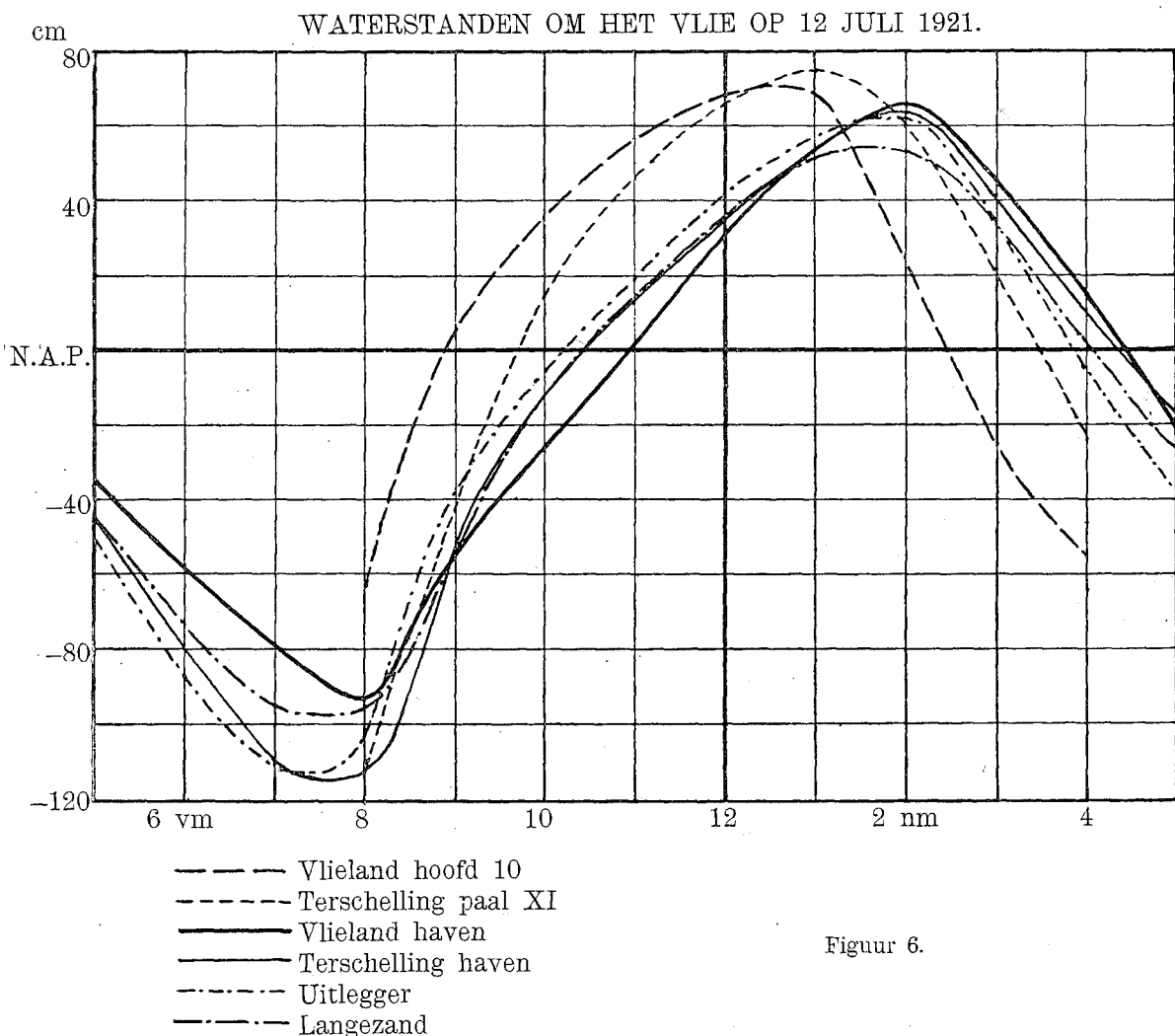
dit is wel zeker, dat de verzwakking van het getij bij het Amelandsche zeegat nog wel, zij het ook in geringe mate, aanwezig is, maar verder niet meer. Integendeel, daar komt de zoeven genoemde „trechterwerking” op den voorgrond, zooals uit den loop van de lijnen van figuur 4 blijkt.

In de Waddenzee varieert de sterkte van het getij van punt tot punt weinig. Het tijverschil ligt meestal tusschen 1 en 1,5 m; de amplitude van  $M_2$  tusschen 40 en 60 cm. Alleen in het zuidelijk deel nemen deze waarden in de richting van de Zuiderzee vrij snel af. Het tijverschil, dat te Zurig nog 110 cm is, vermindert tot 71 cm bij Piaam, 57 cm bij Hindeloopen en 47 cm te Stavoren. Aan de westzijde is het 85 cm aan de oostpunt van Wieringen en 57 cm te Medemblik.

In het nauwe gedeelte tusschen Gaasterland en Westfriesland gaat de verzwakking nog door, maar dan geschiedt er iets zeer bijzonders. Het tijverschil en de amplitude van  $M_2$  nemen, na een minimum bereikt te hebben, weer naar de kust toe, en de phase verandert bij het passeeren van het minimum sneller dan anders bij de bestaande diepte op even langen weg voorkomt.

Deze verschijnselen kunnen verklaard worden door de interferentie van de zich binnenwaarts voortplantende golven met de teruggekaatste golven die daaruit aan de kust ontstaan.

Was er geen weerstand en liepen de golven loodrecht tegen een kust aan, dan zouden door deze interferentie staande golven ontstaan met een knooplijn, d. w. z. een lijn zonder verticale waterbeweging, op een afstand van een kwart golflengte van de kust. Bij het passeeren van die lijn zou de phase een sprong maken; de verticale uitwijkingen zijn nl. aan weerszijden van de knooplijn tegengesteld gericht.



Figuur 6.

Tot dergelijke gevolgen, alleen minder scherp geprononceerd, zal de interferentie ook nog leiden als er een weerstand bestaat. Van een scherpe knooplijn waar de verticale beweging nul zou zijn, is dan geen sprake meer; de teruggekaatste golven hebben een kleinere amplitude dan de invallende en kunnen deze dus nooit geheel opheffen. Maar een minimum van amplitude blijft niettemin bestaan.

Om dit eenigszins op te helderen is met behulp der in § 140 ontwikkelde formules en onder vereenvoudigende onderstellingen een berekening uitgevoerd voor het gebied tusschen het Breezand en de Geldersche kust bij Nijkerk. Dit werd daarbij als een vak van overal gelijke diepte en breedte behandeld en er werd gewerkt met een lineaire weerstandswet met overal denzelfden coëfficiënt. Men kan dan uit de amplitude en het kappagetal aan de beide uiteinden die in tusschengelegen punten afleiden.

Laat men nu deze punten met afstanden gelijk aan het zesde deel der geheele lengte op elkander volgen en stelt men, overeenkomstig de waarnemingen, de amplitude voor het Breezand op 31 cm en voor Nijkerk op 15 cm, en het kappagetal voor de eerste plaats op  $232^\circ$  en voor de tweede

op  $385^\circ$  of  $25^\circ$ , dan vindt men de getallen in de eerste twee regels van tabel 1. Men ziet, dat de amplitude inderdaad een minimum vertoont en verder dat op de plaats daarvan de phase tusschen twee opeenvolgende punten met  $39^\circ$  verandert, hetgeen meer bedraagt dan het zesde deel van de verandering  $153^\circ$  over het geheele gebied.

TABEL 1.

|              |                    | Breezand.   | $\frac{1}{6}$ | $\frac{2}{6}$ | $\frac{3}{6}$ | $\frac{4}{6}$ | $\frac{5}{6}$ | Nijkerk.   |    |
|--------------|--------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|----|
| Berekend . . | amplitude          | 31          | 23            | 16            | 12            | 12            | 13,5          | 15         | cm |
|              | phase ( $\alpha$ ) | $232^\circ$ | $254^\circ$   | $281^\circ$   | $318^\circ$   | $357^\circ$   | $20^\circ$    | $25^\circ$ |    |
| Waargenomen  | amplitude          | 31          | 20            | 12            | 7             | 8             | 12            | 15         | cm |
|              | phase ( $\alpha$ ) | $232^\circ$ | $240^\circ$   | $290^\circ$   | $340^\circ$   | $5^\circ$     | $20^\circ$    | $25^\circ$ |    |

In den derden en vierden regel vindt men de waargenomen waarden, die een dergelijken gang vertoonen. Aan de gebrekkige overeenstemming van de berekende met de waargenomen waarden behoeft geen beteekenis te worden gehecht; een betere kan men eerst bereiken als men, zooals in hoofdstuk VI zal worden gedaan, de getijbeweging meer in bijzonderheden analyseert.

In figuur 3 valt het gebied van de snelle verandering in phase op door de groote dichtheid der lijnen van gelijke kappagetallen. Zoowel ten noorden als ten zuiden van dat gebied staan die lijnen juist bijzonder ver uit elkander.

Het minimum van de sterkte der getijbeweging vindt men in figuur 1 en ook in het diagram van figuur 4, waar de lijn die het getij in de Zuiderzee voorstelt, bij Urk zeer dicht tot het nulpunt nadert.

Daar de weerstand die zich tegen de beweging verzet in de kom der Zuiderzee klein is, wordt de golf er minder sterk gedempt dan op de rivieren, waar de stroomsnelheden en in verband daarmee ook de weerstanden grooter zijn. Op de Lek wordt de amplitude over een halve golf-lengte tusschen Krimpen en Culemborg tot het vijftiende deel van de oorspronkelijke waarde teruggebracht; in de Zuiderzee zou een enkelvoudige golf over die lengte tot iets minder dan een vijfde zijn gedempt.

§ 12. *De stroommetingen.* De kennis van de getijstroomen was voor het beoogde doel in 1918 nog gebrekkig. De Zeemansgids gaf voor de Nederlandsche kust belangrijke gegevens voor de navigatie en een overzicht van de oppervlaktestroomen, dat gebleken is in algemeene trekken juist te zijn, doch die inlichtingen traden niet genoeg in bijzonderheden en waren, wat de stroom-snelheden betreft, niet nauwkeurig genoeg. Ook waren er aanwijzingen van schippers, loodsen en visschers, die echter soms onbetrouwbaar waren.

Van de stroomen in de diepere lagen was niets bekend. Slechts hier en daar waren vroeger nauwkeurige stroommetingen verricht. Door den Rijkswaterstaat waren metingen verricht langs den Pollendam voor Harlingen (1890 en 1918) en in de haven van Nieuwediep (1898). Bij het onderzoek van de Zuiderzeevereeniging waren in 1889 en 1890 stroommetingen uitgevoerd, waarvan de uitkomsten zijn verzameld in de Technische Nota n<sup>o</sup>. 6 <sup>1)</sup>. Ook waren door het Wieringermeerbureau in 1911 eenige stroommetingen nabij Wieringen verricht.

De resultaten van al deze metingen zijn bij de werkzaamheden van de Staatscommissie gebruikt, maar zij waren geheel ontoereikend om maar eenigszins een beeld te vormen van de stroomverdeling in de Waddenzee. Het was dus noodzakelijk op groote schaal nieuwe stroommetingen uit te laten voeren.

Stroommetingen kunnen alleen worden verricht bij rustige zee, of ten minste bij afwezigheid van zwaren golfslag: de waarnemingen worden anders te onzeker. In den winter is het doen van systematische metingen on-

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 23.

mogelijk. Wel komen ook dan nog goede dagen voor, maar de duur van den dag is te kort om de metingen over een volle getijperiode (12 uur 25 minuten) uit te strekken.

In den zomer wordt al spoedig hinder ondervonden van de aanwezigheid van wier. De door den stroom meegevoerde wierblaadjes hechten zich aan de instrumenten vast en belemmeren zodoende de meting. Eigenlijk zijn alleen de maanden Mei en Juni geschikt voor het uitvoeren van nauwkeurige stroommetingen. De periode van ruwe zee is dan achter den rug, de lengte van den dag is groot genoeg en het wier is nog niet in groote hoeveelheden aanwezig.

Toch moest ook in de andere maanden worden gemeten, daar het anders niet mogelijk zou zijn geweest alle gegevens te verzamelen. Behalve in Januari is in alle maanden van het jaar gewerkt; het kwam dan herhaaldelijk voor dat een meting mislukte en moest worden overgedaan.

Als meetvaartuig werd gebruikt een stoom- of motorboot van minstens 20 ton, die op de plaats waar men den stroom wilde meten voor anker werd gelegd. De bepaling van den oppervlaktestroom geschiedde met drijvertjes, die op een voldoende afstand van het schip in het water werden gelaten. De drijftijd tusschen een tweetal aan boord uitgezette raaien kon dan met een stophorloge worden bepaald. Bij krachtigen wind en, zoo de stroomsnelheden klein zijn, ook bij matigen wind kan het voorkomen dat de lengte-as van het meetvaartuig belangrijk (b.v. meer dan 15°) afwijkt van de stroomrichting. Dan geven de oppervlakte-drijvertjes onnauwkeurige resultaten en moet de stroom ook aan het oppervlak met een der meetinstrumenten worden bepaald. Om de storing door het schip zoo klein mogelijk te maken moet de plaats van dat instrument zorgvuldig worden gekozen.

Deze instrumenten, waarmede dus in den regel alleen de stroom in de diepere lagen werd gemeten, waren beide van Scandinavischen oorsprong, nl. de schroefstroommeter van EKMAN <sup>1)</sup> en de luchtbelstroommeter van JACOBSEN <sup>2)</sup>. Van het eerstgenoemde waren twee exemplaren in bruikleen verkregen door de vriendelijke bemiddeling van den Directeur van het toenmalig Rijks Instituut voor Hydrographisch Visscherij-onderzoek te Helder, den heer Ir. F. LIEBERT. Het behoort tot de z.g. molentjes. De hiermede verrichte metingen zijn wel nauwkeurig, maar zij kosten veel tijd, vooral wanneer de waterdiepte groot is. Meestal werd het instrument gebruikt als contrôle op de metingen met den luchtbelstroommeter.

Dit laatste instrument heeft steeds zeer goed voldaan. De metingen geschieden vlug en zijn voldoende nauwkeurig. Alleen wanneer in zeer diepe geulen sterke stroomen loopen is de bepaling van de snelheid in de onderste lagen onzeker. Een enkele contrôlemeting met den schroefstroommeter is dan van groote waarde.

In het begin is gewerkt met drie geleende JACOBSEN-stroommeters; één van het Rijks Instituut voor Hydrographisch Visscherij-onderzoek, terwijl de beide andere door den ingenieur van den Rijkswaterstaat in het arrondissement Rotterdamsche Waterweg, den heer Ir. J. J. CANTER CREMERS waren afgestaan. Spoedig zijn twee nieuwe toestellen aangeschaft.

Beide soorten van instrumenten zijn uitvoerig beschreven in § 15 van het verslag uitgebracht door de Staatscommissie in zake buitengewoon hooge waterstanden op den Rotterdamschen Waterweg <sup>3)</sup>.

Aan de ijking van de stroommeters is bij voortduring veel zorg besteed. Gedeeltelijk kon dit geschieden in de sleepinrichting van het Marine Etablissement te Amsterdam, die daartoe op verzoek van de Commissie in orde werd gebracht. Het grootste deel van deze metingen is echter gedaan met een varend schip op plaatsen waar vlak bij den wal diep stilstaand water wordt aangetroffen nl. in het Noordzeekanaal, het Noordhollandsch-

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 70.

<sup>2)</sup> " " n°. 71.

<sup>3)</sup> " " n°. 14.

kanaal en laatstelijk aan de zuidzijde van den van Wieringen naar van Ewijksluis gelegden afsluitdijk. Ten slotte zijn, telkens wanneer de gelegenheid gunstig was, gedurende de stroommetingen zelf de aanwijzingen van de instrumenten met elkander en met de uitkomsten der oppervlakte-drijvingen vergeleken.

Voor de leiding van de stroommetingen was uit de afdeeling A (noot § 5) een subcommissie onder presidium van den heer PHAFF gevormd. Deze subcommissie organiseerde in 1919 een systematische verkenning van de Waddenzee. Door drie vaartuigen werd op 21 regelmatig verspreide plaatsen gedurende een getij de stroom gemeten. Deze metingen, die door fraai weder werden begunstigd, leverden een zeer goed overzicht van de stroomtoestanden.

In 1920 werd een strook aan weerszijden van de afsluitingslijn onderhanden genomen, ditmaal met vier vaartuigen. Het weer werkte niet mee, waardoor het veel moeite kostte om de waarnemingen binnen te krijgen. Daarentegen gaven de metingen die bij harden wind waren uitgevoerd, al waren zij niet bruikbaar voor de normale getijstroomen, belangrijke gegevens omtrent de werking van den wind op het water.

Hiermede waren de systematische metingen geëindigd. Zij zijn op sommige plaatsen, o.a. in het gebied van het Eierlandsche zeegat, nog aangevuld. De stroommetingen van de latere jaren dienden slechts voor een deel om de vroegere metingen aan te vullen. Over het algemeen hadden zij ten doel het controleeren van formules en het bepalen van de grootte van den weerstand (§ 14).

Wanneer de waterdiepte in de nabijheid niet te groot was en de golfslag geen beletsel vormde is steeds gedurende de stroommetingen een in den grond geplaatste slaggaard afgelezen, waardoor ook de verticale getijbeweging ter plaatse bekend werd. Ook zijn dikwijls dieptemeters geplaatst.

Een serie stroommetingen die geheel en al verschilt van de andere is in de Helsdeur op de volgende wijze uitgevoerd. Een mijn, waarin een dieptemeter was geplaatst werd zoodanig verankerd, dat zij bij afwezigheid van stroom, als de ankerketting door de opdrijvende kracht verticaal is, eenige meters onder water bleef. Naarmate de stroom sterker wordt wijkt de stand van de ketting meer van den verticalen af, terwijl bovendien de ketting wordt gebogen. Door beide oorzaken komt het mijnlichaam dieper onder water en dit „onderstromen” wordt door den dieptemeter aangewezen. Een ijking is te verkrijgen door dicht in de nabijheid de stroomsnelheid op een andere wijze te meten.

Met deze opstelling is het gelukt gedurende een veertiendaagsche periode den stroom te registreeren, waardoor het mogelijk werd de voor naamste harmonische constanten daarvan te bepalen <sup>1)</sup>.

Jammer genoeg is de toepassing van deze methode op slechts weinig plaatsen mogelijk. Er wordt namelijk een zeer groote waterdiepte en groote

<sup>1)</sup> De uitkomst van deze meting is de volgende:

Gemiddelde stroomsnelheid: — 10 cm per sec.

| Getij.                 | O    | K <sub>1</sub> | P    | M <sub>2</sub> | S <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> | 2MS  | M <sub>4</sub> | MS   | S <sub>4</sub> | M <sub>6</sub> | M <sub>8</sub> |
|------------------------|------|----------------|------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|------|----------------|----------------|----------------|
| Amplitude (cm per sec) | 10   | 10             | 4    | 148            | 24             | 6              | 25   | 10             | 14   | 4              | 21             | <sup>2</sup>   |
| Kappagetal . . . . .   | 175° | 320°           | 320° | 160°           | 230°           | 230°           | 260° | 190°           | 260° | 10°            | 305°           | 60°            |

De positieve stroomrichting is de vloedstroom. Er is dus een geringe overmaat van ebstroom, die gedeeltelijk aan locale omstandigheden zal zijn te wijten (in een klein gedeelte van het zeegat, onmiddellijk ten oosten van Onrust loopt vrijwel steeds ebstroom).

Om de stroomsnelheden, die dicht aan de oppervlakte zijn gemeten, te herleiden tot door het zeegat stroomende hoeveelheden water in eenheden van 1000 m<sup>3</sup> per sec moeten zij met ongeveer 0,4 worden vermenigvuldigd.

stroomsnelheid voor vereischt, terwijl ook de verticale getijbeweging, waarvoor een correctie moet worden aangebracht, nauwkeurig bekend moet zijn.

Met behulp van alle metingen is ten slotte zoo goed mogelijk een beeld gevormd van den toestand die op één bepaalden dag is voorgekomen. Voor dien dag is gekozen 31 Mei 1919. Het was toen springtij, waardoor het tijverschil en de stroomsnelheden groot en dus de meetfouten relatief klein waren; het was mooi, rustig weer, evenals de voorafgaande dagen, zoodat een storing door wind uitgesloten was. Bovendien is er op dien dag gemeten op drie belangrijke plaatsen langs de Friesche kust. Uit de metingen van andere dagen moest zoo goed mogelijk tot den toestand van 31 Mei 1919 worden besloten, wat met behulp van in de volgende § te bespreken regels zonder bezwaar kon geschieden.

Het resultaat is verzameld in een dertiental kaartjes (bijlage 12) waarop van uur tot uur de toestand is geteekend zooals die op 31 Mei 1919 zal zijn geweest.

De zwarte pijltjes wijzen in de richting waarheen de stroom gaat; de vlaggetjes wijzen, evenals bij de gebruikelijke methode van aangeven van den wind, de snelheid aan. Het aantal vlaggetjes is evenredig met de logaritmische van de stroomsnelheid (gemiddeld over de geheele diepte gerekend). De waarnemingen van de verticale getijbeweging zijn in de kaartjes verwerkt door eenige hoogtecijfers in te schrijven, voorts door het trekken van lijnen van gelijk niveau om de tien centimeter. De pijltjes bij die niveaulijnen wijzen in de richting waar de waterstand het laagst is, dus met het verhang mee. Eindelijk is het gebied waar de waterspiegel rijst door een witte kleur en waar hij daalt door een blauwe tint aangegeven.

De stroom en hoogte bij het lichtschip Terschellingerbank zijn ontleend aan de Etudes van VAN DER STOK <sup>1)</sup>, de stroomen bij Hindeloopen en tusschen Boontjes en Zuidoostrak aan de Technische Nota n°. 6 van de Zuiderzee-vereeniging <sup>2)</sup>.

§ 13. *Het verband tusschen den stroom en het verticale getij.* In zee-armen van niet te groote afmetingen die aan de binnenzijde gesloten zijn loopt de stroom gedurende de periode van rijzend water naar binnen; tijdens de eb (vallend water) trekt het water weer uit. De kenteringen vallen dus op de oogenblikken van hoog- en laagwater. Men ziet dit goed in de Oosterschelde en ook in het zuidelijk deel van de kom der Zuiderzee.

Een geheel ander beeld vertoont de getijbeweging in open zee. Het is een bekend feit dat de stroomkenteringen daar vallen op de oogenblikken dat het wateroppervlak den middenstand passeert. Van 3 uur vóór hoogwater tot 3 uur daarna gaat de stroom in de voortplantingsrichting van de getijgolf; dit wordt wel „vloedstroom” genoemd. Gedurende den overigen tijd loopt „ebstroom”, die de tegengestelde richting heeft. In de Noordzee bij de lichtschepen langs de Nederlandsche kust is de stroom van dit type en op de uurkaartjes van bijlage 12 kan men het aan den stroom bij Terschellingerbank zien.

In de Waddenzee en in het noordelijk gedeelte van de Zuiderzee vindt noch het een, noch het ander plaats. De kenteringen vallen niet samen met den middenstand en in den regel ook niet met hoog- en laagwater. Daarbij komt, dat de toestand van punt tot punt verandert, zoodat er een schijnbare regelloosheid ontstaat. Zoo komt de vloedstroom in de Helsdeur ruim een uur na laagwater door; dit tijdsverloop is aan het westelijke uiteinde van den Dooven Balg nog bijna even groot (een uur) maar aan het oostelijke einde van die geul negatief geworden: daar loopt reeds even vóór laagwater vloedstroom. Het begin van den vloedstroom valt langs de Friesche kust 2 tot 4½ uur na laagwater; bij de samenkomst van Zuidoostrak en Oude Vlie in de eerste geul één uur na en in de andere bijna vier uur vóór laagwater.

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 42.

<sup>2)</sup> „ „ n°. 23.

Op verscheidene plaatsen is het niet zeker welken stroom men als vloedstroom en welken als ebstroom moet beschouwen. Uit den aard der zaak is dit ook het geval overal waar draaiende stroomen optreden (verandering van stroomrichting van oogenblik tot oogenblik), zooals op het Breezand en ten westen van Harlingen.

Bij nadere beschouwing van de uurkaartjes voor 31 Mei 1919 (bijlage 12) komt echter wel degelijk het verband tusschen den stroom en de waterhoogten aan het licht. Men ziet dit het beste door den toestand langs de Friesche kust in het oog te vatten, waar de stroomen in de Boontjes, bij Piaam en bij Stavoren alle dien dag zijn gemeten. In figuur 7 is het verloop van den waterspiegel langs die kust uur voor uur aangegeven; de bijgeteekende pijltjes geven op dezelfde wijze als in de kaartjes van bijlage 12 den stroom aan. Men ziet dat deze stroomen over het algemeen van plaatsen waar de waterstand hoog is loopen naar plaatsen met lagen waterstand, dus met het verhang mee. Hoe grooter het verhang, hoe sterker in den regel de stroom is; het verband is echter niet lineair, maar quadratisch: de stroomsnelheid is ten naasten bij evenredig met den wortel uit het verhang, juist zooals bij eenparige beweging op kanalen en rivieren het geval is.

De formule voor die beweging

$$v = C\sqrt{qi} \text{ of } i = \frac{v^2}{C^2q} \quad (1)$$

( $v$  = stroomsnelheid,  $C$  = constante van EYTELWEIN,  $q$  = hydraulische straal, hier gelijk aan de waterdiepte,  $i$  = verhang) geeft aan, dat behalve het verhang ook de diepte van invloed is op de stroomsnelheid. Inderdaad is dit ook in de Waddenzee het geval. In de diepe geulen, zooals de Texelstroom en het Vlie, zijn de stroomsnelheden veel grooter dan in het ondiepe gebied langs de Friesche kust, ofschoon het verhang in beide gevallen niet veel verschilt (zie de kaartjes van bijlage 12). Ook hier kan men het quadratische verband aantoonen, waaruit volgt, dat men zich met formule (1) in het algemeen van de stroomen rekenschap kan geven.

Toch is er ook een belangrijke afwijking. De stroomen kenteren nl. niet op de oogenblikken waarop het verhang van richting verandert, maar omstreeks een uur later (verg. § 40, c). Op de kaartjes van bijlage 12 en in figuur 7 is dit te constateeren. Bij Piaam maakt het naar het Noorden gerichte verhang vóór 7 uur 's morgens plaats voor een verhang in zuidelijke richting. De noordgaande stroom blijft echter nog tot 8 uur doorloopen. Hetzelfde vindt plaats bij de middagkentering. Het verhang wisselt daarbij tusschen 1 en 2 uur van teeken, de stroom om drie uur. In de Boontjes, waar het verschijnsel 's morgens niet duidelijk is, komt het 's middags sterk naar voren. In figuur 7 wijzen de getrokken lijnen op rijzend, de stippellijnen op vallend water.

Ook de oogenblikken van maximum stroomsnelheid vallen niet samen met die waarop  $\sqrt{i}$  de grootste waarde bereikt. De geheele stroomkromme is ten opzichte van de verhangkromme verschoven: de stroom blijft achter bij het verhang. Men kan dit goed zien in figuur 8, waar het phaseverschil ruim een uur bedraagt.

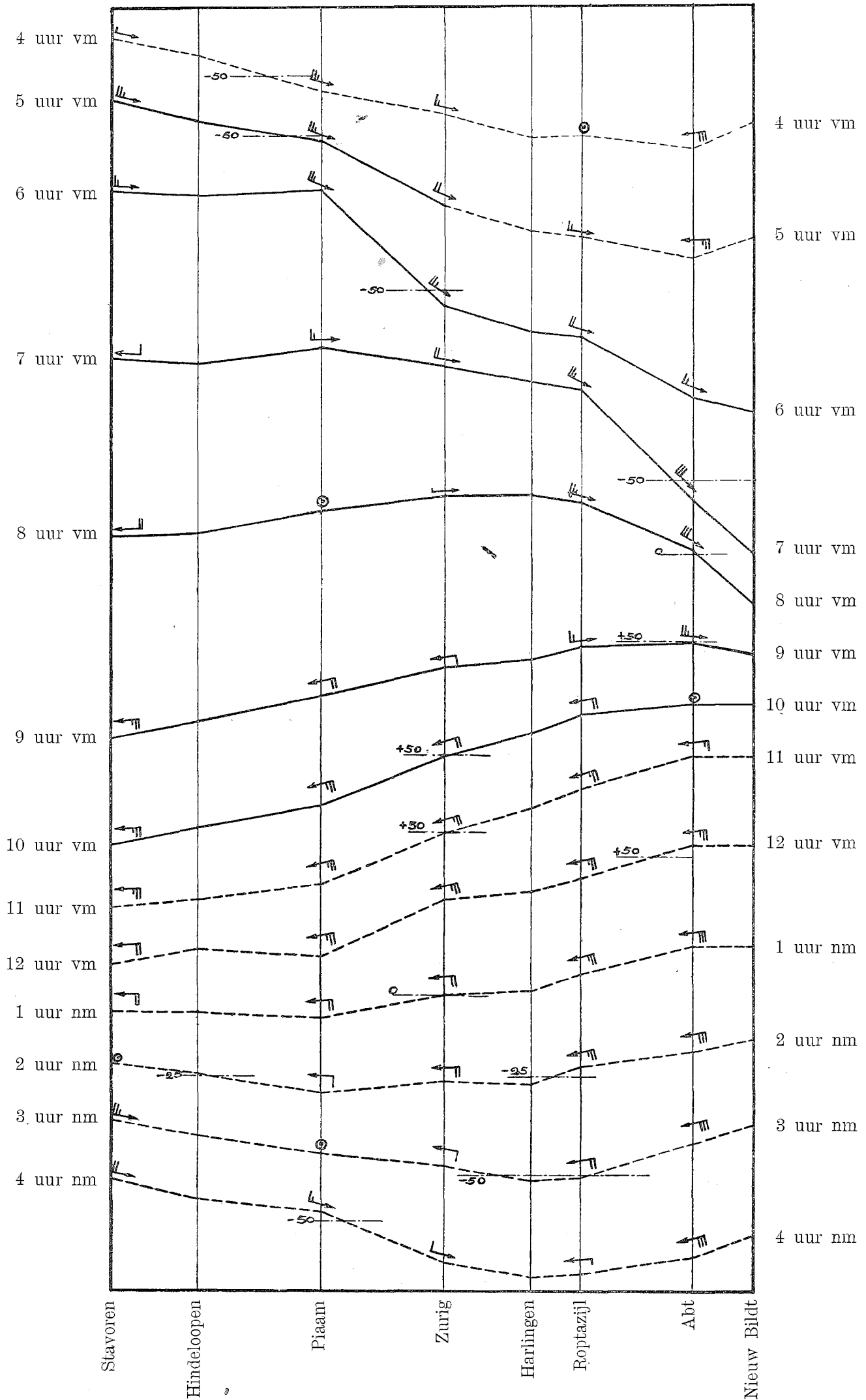
Het is niet moeilijk de oorzaak van dit achterblijven aan te wijzen: de traagheid heeft ten gevolge dat de stroom het betrekkelijk snel veranderende verhang niet aanstonds kan volgen, de formule voor eenparige beweging kan dus niet juist zijn maar moet worden aangevuld met een term die de veranderlijkheid van de beweging weergeeft.

Inderdaad moet de vergelijking luiden (§ 36):

$$i = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{v^2}{C^2q} \quad (2)$$

waarin  $t$  den tijd voorstelt en  $g$  de versnelling van de zwaartekracht. Het teeken van den laatsten term hangt van de stroomrichting af.

STROOM EN VERHANG LANGS DE FRIESCHE KUST OP 31 MEI 1919.



Figuur 7.

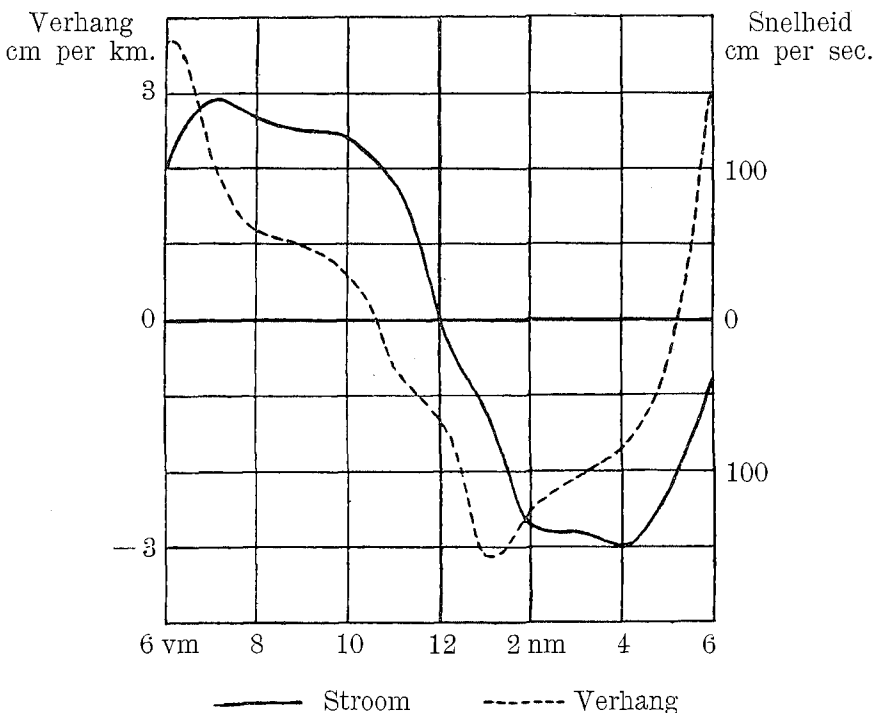
§ 14. *Bepaling van de constante van Eytelwein.* Wanneer bij de stroommetingen de tijdsintervallen tusschen de waarnemingen kort genoeg worden genomen om de stroomkromme te kunnen teekenen is in formule (2) zoowel  $v^2$  als  $\frac{\partial v}{\partial t}$  voor elk oogenblik bekend. Het is voldoende de waarnemingen om het uur te doen, maar men kan beter halfuurwaarnemingen verrichten, waardoor de stroomkromme met des te meer zekerheid vaststaat. De metingen zijn ook wel eens paarsgewijs verricht, de beide waarnemingen van elke groep 10 minuten na elkander. Het doel hiervan was een nauwkeurige bepaling van  $\frac{\partial v}{\partial t}$ , maar dit doel wordt op deze wijze niet bereikt. Ten eerste is men te veel afhankelijk van kleine afwijkingen in de stroomsterkte die maar enkele minuten aanhouden en van kleine meetfouten, en bovendien is het meestal niet mogelijk het juiste gemiddelde tijdstip aan te geven waarop de meting, die zelf eenige minuten duurt, betrekking heeft, waardoor men den tijd die tusschen de beide waarnemingen ligt niet zuiver kent.

Wanneer aan weerszijden van de meetplaats, of tenminste nabij de meetplaats en in de stroomrichting op eenigen afstand daarvan, de waterhoogte wordt gemeten is ook  $i$  te bepalen en daar de waterdiepte  $q$  op zeer eenvoudige wijze door looding is te meten zijn behalve  $C$  alle in (2) voorkomende grootheden bekend. De constante  $C$ , die voortaan in dit verslag als de constante van EYTELWEIN zal worden aangeduid, is dan dus te berekenen.

Als voorbeeld moge vermeld worden een der voorloopige bepalingen, nl. de meting in de Helsdeur op 20 Mei, den eersten waarnemingsdag van de stroommetingen van 1919, waarop figuur 8 betrekking heeft.

De waterhoogten zijn daarbij waargenomen aan de registreerende peilschaal te Helder, dicht bij de meetplaats, en in de haven van Oude

STROOM EN VERHANG IN DE HELSDEUR  
OP 20 MEI 1919.



Figuur 8.

Schild op een afstand van 10700 m daar vandaan. Door het verschil in waterstand door  $1,07 \times 10^6$  te deelen verkrijgt men het verhang  $i$ .

Om  $C$  te berekenen kan men als volgt te werk gaan.

De versnelling  $\frac{\partial v}{\partial t}$  kan men voor iedere waarneming bijvoorbeeld gelijkstellen aan het verschil van de snelheid bij de voorgaande en bij de volgende meting, gedeeld door het tijdsverloop tusschen die metingen (7200 seconden). Dit wederom gedeeld door  $g (= 981)$  geeft den versnelingsterm  $i_a = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$  en het verschil van  $i$  met dien term is de weerstandsterm  $i_w = \frac{v^2}{C^2 q}$ . Uit de gemeten waarde van  $v$  en de gepeilde diepte  $q = 42 \text{ m} = 4200 \text{ cm}$  volgt  $\frac{v^2}{q}$ , zoodat voor elke meting een waarde van  $C^2$  wordt gevonden als resultaat van de deeling  $\frac{v^2}{q} : i_w = C^2$ . Deze bewerking is uitgevoerd in tabel 2.

TABEL 2. Voorloopige bepaling van  $C$ . Helsdeur; diepte 42 meter; 20 Mei 1919.

| Tijd.   | 6 vm | 7 vm | 8 vm | 9 vm | 10 vm | 11 vm | 12 M | 1 nm  | 2 nm  | 3 nm  | 4 nm  | 5 nm  | 6 nm | Amsterd.tijd.               |
|---|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----------------------------|
| Waterstand Helder . . .                                     | - 5  | 19   | 21   | 19   | 20    | 8     | -16  | -58   | -78   | -94   | -106  | -107  | -50  | cm $\pm$ N.A.P.             |
| Waterstand Oude Schild .                                    | - 45 | - 4  | 8    | 8    | 14    | 14    | - 2  | -25   | -51   | -72   | - 90  | -101  | -82  | cm $\pm$ N.A.P.             |
| Verval over $1,07 \times 10^6 \text{ cm}$                   | 40   | 23   | 13   | 11   | 6     | -6    | -14  | -33   | -27   | -22   | - 16  | - 6   | 32   | cm                          |
| Verhang $i$ . . . . .                                       | 37   | 22   | 12   | 10   | 6     | -6    | -13  | -31   | -25   | -21   | - 15  | - 6   | 30   | $\times 10^{-6}$            |
| Gemeten stroomsnelheid $v$                                  | 100  | 145  | 135  | 125  | 120   | 90    | 0    | -60   | -135  | -140  | -150  | -115  | -40  | cm per sec                  |
| $i_a = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$ . . . . . | -    | 5    | -3   | -2   | -5    | -17   | -21  | -19   | -11   | - 2   | 4     | 16    | -    | $\times 10^{-6}$            |
| $i_w = i - i_a = \frac{v^2}{C^2 q}$ . . . . .               | -    | 17   | 15   | 12   | 11    | 11    | 8    | -12   | -14   | -19   | - 19  | - 22  | -    | $\times 10^{-6}$            |
| $\pm \frac{v^2}{q}$ . . . . .                               | 2,4  | 5,0  | 4,3  | 3,7  | 3,4   | 1,9   | 0    | - 0,9 | - 4,3 | - 4,7 | - 5,4 | - 3,2 | -0,4 | cm per sec <sup>2</sup>     |
| $C^2$ . . . . .   | -    | 0,29 | 0,29 | 0,31 | 0,31  | 0,17  | 0    | 0,07  | 0,31  | 0,25  | 0,28  | 0,14  | -    | $10^6 \text{ cm per sec}^2$ |
| $C$ . . . . .   | -    | 540  | 540  | 560  | 560   | 410   | 0    | 265   | 560   | 500   | 530   | 375   | -    | cm <sup>1/2</sup> per sec   |

Daar de weerstand steeds tegengesteld aan  $v$  is moet voor  $i_w$  eigenlijk  $\pm \frac{v^2}{C q}$  of  $\frac{|v|v}{C^2 q}$  worden geschreven.  $|v|$  stelt daarbij de absolute grootte van de snelheid voor en is steeds positief. Op de tijdstippen waarvoor een negatieve waarde van  $i_w$  wordt gevonden werkt de weerstand in de als positief gekozen stroomrichting (van Helder naar Oude Schild). De stroom zelf moet op die tijdstippen de tegengestelde richting hebben, dus ebstroom zijn, wat inderdaad het geval is.

Het resultaat van de meting is elf waarden van  $C$ , die echter niet van hetzelfde gewicht zijn. Omstreeks de kenteringen is namelijk van de beide termen  $i_a$  en  $i_w$ , die te zamen het verhang  $i$  uitmaken de eerste groot, de tweede daarentegen klein. Bepaalt men dezen term nu als het verschil  $i - i_a$  van twee veel grootere getallen, dan zal de onzekerheid in  $i_w$  groot zijn en des te grooter naarmate  $i_w$  zelf kleiner wordt. De waarde van  $C$ , die uit de in deze perioden verrichte metingen is afgeleid, is dus eveneens onzeker. Een dergelijke beschouwing leidt er toe om aan de berekende waarden van  $C$  gewichten toe te kennen evenredig met de grootte van de bijbehorende  $i_w$ , of, wat op hetzelfde neerkomt, van  $\frac{v^2}{q}$ . Doet men dit, dan wordt de meest waarschijnlijke waarde van  $C$

$$C = 510$$

en de middelbare fout in die waarde  $\pm 22$ .

Men kan nog verder gaan, nl. alle metingen, waarin de absolute waarde van den term  $\frac{v^2}{q}$  kleiner is dan een zeker bedrag, b.v. 3,5 cm per sec<sup>2</sup>,

verwerpen en aan de overige een gelijk gewicht toekennen. Men elimineert daardoor de metingen waarbij de „storende” term  $i_a$  een groote waarde heeft. Dan wordt de meest waarschijnlijkste waarde

$$C = 538$$

met een middelbare fout  $\pm 9,0$ . De gevonden waarden komen goed overeen met die welke op rivieren en kanalen worden gebruikt, wat ook niet verwonderlijk is, wanneer men bedenkt dat de waterbeweging in beide gevallen aan dezelfde wetten gehoorzaamt.

Vervolgens kan men opmerken dat de waarden die voor  $C$  gedurende den vloedstroom worden gevonden gelijk zijn aan die welke gedurende de eb zijn bepaald. Wanneer dit niet het geval is kan het zijn dat er iets aan de nulpunten der peilschalen hapert. Lag dat nulpunt b.v. te Oude Schild te hoog, dan zouden de positieve verhangen te groot en de negatieve te klein uitvallen. Gedurende den vloed zou dan een te kleine waarde van  $C$  worden gevonden en tijdens den ebstroom een te groote waarde. Ook kan het zijn, dat de uit het verhang voortvloeiende massakracht  $qgi$  niet de eenige uitwendige kracht is, die op het water werkt. Zoo kan bijvoorbeeld de wind een storing geven; wanneer die van belang is kan men de metingen gerust achterwege laten, want de correctie is dan niet met voldoende zekerheid te bepalen. Andere krachten, waarvoor correcties moeten worden aangebracht zijn die van CORIOLIS, de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI (verg. §§ 33 en 34). Zij zijn in dit geval alle van belang: de eerste omdat de peilschaalstations zich aan verschillende zijden van de stroombaan bevinden, de tweede omdat de stroomlijnen niet recht zijn maar een weinig gekromd met de holle zijde naar Texel, en de laatste omdat de stroomsnelheid bij Helder groter is dan bij Oude Schild. De beide laatste correcties zijn tegengesteld en heffen elkander grootendeels op; die wegens de kracht van CORIOLIS heeft in dit geval de strekking om  $C^2$  te vergrooten, maar is niet zeer groot, hoogstens 3 centimeter in het verval. Zij is in verband daarmee niet aangebracht. De meting bevat namelijk grootere onzekerheden, die niet in rekening kunnen worden gebracht. Ten eerste is zij verricht op de allerdiepste plaats van het zeegat. Het water dat langs het meetvaartuig stroomt vindt op zijn verderen weg in den Texelstroom overal een aanzienlijk geringere diepte, gemiddeld ruim 30 meter. Het is nu zeer de vraag of het verhang op de meetplaats wel gelijk is aan het gemiddelde verhang, dat men vindt door de waterstanden te Helder en Oude Schild met elkander te vergelijken.

Bij de latere metingen, die opzettelijk werden ondernomen om  $C$  te bepalen, heeft men de zoeven genoemde bronnen van fouten in het oog gehouden. De meetplaats werd gekozen nabij het midden van het vak tusschen Helder en Oude Schild in een waterdiepte van ruim 30 meter. Er werd op gelet dat het horloge van den waterwaarnemer te Oude Schild precies gelijk liep met dat van den stroomwaarnemer en met het uurwerk van de registreerende peilschaal te Helder, terwijl er voor werd gezorgd dat dit laatste instrument bij het aantekenen geen tijdfouten maakte. Verder zijn toen de waarnemingen om het half uur verricht, waardoor vooral  $\frac{\partial v}{\partial t}$  met grooter zekerheid is te berekenen.

De hier bedoelde metingen zijn verricht in Augustus 1921 en Juli 1923; zij zijn uitgewerkt in bijlage 4.

De op deze wijze berekende waarden van  $C$  staan in geen enkel opzicht achter bij die welke op rivieren zijn gemeten, wanneer men tenminste alleen de perioden gebruikt, waarin  $\frac{v^2}{q}$  een flinke waarde heeft en dus  $i_w$  het grootste deel van het totale verval  $i$  uitmaakt, zoodat de versnellingsterm  $i_a$  niet al te groot is. De overige onzekerheden bestaan op de rivieren evengoed, terwijl men er veel meer afhankelijk is van de juiste waterpassing van de peilschalen dan op zee, waar men door het heen- en weergaan van den stroom een afdoende contrôle op de hoogteligging der nulpunten heeft.

Ook op andere plaatsen in de Waddenzee is beproefd  $C$  nauwkeurig te meten. Men kan trachten op deze wijze de afhankelijkheid van den coëfficiënt van de diepte  $q$  te bepalen.

Dit is echter niet gelukt. Overal levert het nauwkeurig vaststellen van het verhang bezwaren op. Wel is het zeker dat  $C$  bij kleinere diepten maar weinig verschilt van de waarden die in de zeer groote waterdiepten van den Texelstroom zijn gemeten. De coëfficiënt van EYTELWEIN ligt in het geheele gebied zeer waarschijnlijk tusschen 510 en 570  $\text{cm}^{1/2}$  per sec.

Waar in het voorgaande van stroomsnelheid is gesproken is steeds de gemiddelde waarde, over de geheele diepte, bedoeld. Deze waarde is bepaald uit de waarnemingen op verschillende diepten, in den regel door de snelheidsverdeeling langs een verticaal in teekening te brengen.

## B. DE HOOGTELIKKING DER PEILSCHALEN.

§ 15. *Waterpassingen.* Wanneer de aan twee of meer peilschalen waargenomen waterstanden met elkander moeten worden vergeleken, komt het er vooral op aan de ligging van de nulpunten dier peilschalen ten opzichte van een vast horizontaal vlak — de geöide — te kennen. Alleen wanneer alle nulpunten op denzelfden afstand boven of onder dat vergelijkingsvlak liggen, komen de verschillen der aflezingen overeen met de werkelijke hoogteverschillen. Wanneer de hoogteligging van een of meer der schalen van die der overige afwijkt, moeten de waarnemingen aan die peilschalen daarvoor worden gecorrigeerd.

Om dit te kunnen beoordeelen worden de peilschalen gewaterpast. De eerste betrouwbare waterpassing in het beschouwde gebied was die van KRAYENHOFF (1811). Het van eenige merken te Amsterdam afgeleide niveau, het A.P., werd daarbij ook overgebracht naar andere plaatsen rondom de Zuiderzee. In 1877 en de volgende jaren werd deze waterpassing herhaald onder leiding van Prof. COHEN STUART. Daarbij werd van hetzelfde merk uitgegaan, doch de hoogtecijfers die op deze waterpassing steunen worden met N.A.P. — Normaal A.P. — aangeduid.

Dat van een zelfde merk de hoogte ten opzichte van N.A.P. niet gelijk is aan die t. o. v. A.P. heeft twee oorzaken. In de eerste plaats zijn er de waarnemingsfouten in beide waterpassingen. In dit opzicht is de waterpassing van 1877 in het voordeel. Daaraan is zeer veel tijd en zorg besteed; de metingen hadden plaats met nieuwe instrumenten en met een zeer nauwkeurige waarnemingsmethode. De kennis van N.A.P. is dus beter dan die van A.P. De andere oorzaak voor de verschillen is de langzame bodembeweging, die maakte dat in het ongeveer zestigjarig tijdperk tusschen de waterpassingen groote gedeelten van Nederland zeer waarschijnlijk ten opzichte van elkander in hoogteligging zijn veranderd.

Men is er omstreeks 1890 toe overgegaan om de nulpunten van alle peilschalen waarbij het peil van N.A.P. bekend was in dat nulvlak te stellen.

In den laatsten tijd werden in afwachting van een algeheele herziening van het N.A.P. geregeld waterpassingen van grooteren of kleineren omvang uitgevoerd. De belangrijkste daarvan is een waterpassing langs het grootste deel van de Friesche kust, van Oosterum naar Stavoren, ondernomen om de nulpunten van de langs dit kustgedeelte gelegen peilschalen met elkander te vergelijken.

De peilschalen op de eilanden vallen hier buiten omdat het N.A.P. daarheen niet was overgebracht. De nul van deze schalen wordt aangeduid door volzee — V.Z. De hoogte daarvan valt dan ook op de meeste plaatsen vrijwel samen met gemiddeld hoogwater. Alleen de peilschalen op Texel (Oude Schild), Vlieland (haven) en Schokland maken hierop een uitzondering. In 1876 en 1877 is het A.P. van Helder uit over de zeegaten naar Texel en Vlieland overgebracht <sup>1)</sup>. De peilschalen zijn toen op A.P.

<sup>1)</sup> Een beschrijving van deze waterpassing is te vinden in de Verhandelingen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs 1878—1879. Literatuuropgave n°. 72.

gesteld. Later is de correctie van + 7 cm van A.P. op N.A.P., die voor Helder was gevonden, ook op Texel en Vlieland toegepast; de peilschalen zelf zijn blijven staan.

In den winter van 1890 op 1891 is het peil, over het ijs van de toegevroren Zuiderzee, naar Schokland overgebracht. De peilschaal is daarna op A.P. gesteld.

Toen de Staatscommissie besloot o. a. het aantal waarnemingspunten op de eilanden uit te breiden (§ 9) kwam de vraag van het overbrengen van het N.A.P. daarheen weer aan de orde. In 1919 werd Ameland aan het net der nauwkeurigheidswaterpassingen aangesloten door een waterpassing over den vervallen verbindingsdam. Het werk kon bij laagwater worden uitgevoerd en werd voltooid zonder dat er bijzondere moeilijkheden zijn ondervonden. Dit kan niet worden gezegd van het overbrengen van het N.A.P. van Ameland naar Terschelling, dat in hetzelfde jaar plaats vond. De gebruikte instrumenten bleken niet zeer geschikt te zijn voor den overgang over het Borddiep, terwijl de weersomstandigheden meestal niet gunstig voor dit werk waren. Door ook hier alleen gedurende de laagwaterperiode te werken kon de slaglengte worden teruggebracht tot omstreeks 2 kilometer en bij dezen afstand tusschen de opstellingsplaatsen gelukte het een voldoende nauwkeurigheid te bereiken. De werkwijze kwam grootendeels overeen met die van de overbrenging van 1876 en 1877 naar Texel en Vlieland; er werd gebruik gemaakt van de door COHEN STUART aangegeven methode van aflezen.

In hetzelfde jaar werd Wieringen aangesloten door een overgang over het Amsteldiep.

Om de waarnemingen aan de dieptemeters (§ 7) tot N.A.P. te kunnen herleiden zijn een tweetal waterpassingen uitgevoerd. Bij die van Piaam naar den daartegenover geplaatsten ducdalf kon worden partij getrokken van de aanwezigheid van de ondiepe Makkumerwaard, waardoor het mogelijk werd het instrument halverwege tusschen de kust en den ducdalf op te stellen. Voor de waterpassing naar de Hendrik Tjaarsplaat moest in zee een zevental houten hulpconstructies worden geplaatst.

Van de uitkomsten van de beide laatstgenoemde waterpassingen heeft men weinig partij kunnen trekken; de eigenschappen van de dieptemeters maken, dat, terwijl men uit hun aanwijzingen de veranderingen der waterhoogte van oogenblik tot oogenblik naar behooren kan afleiden, er betrekkelijk groote, gedurende een waarnemingsreeks constante, fouten kunnen voorkomen.

In 1922 is vanwege de Staatscommissie in samenwerking met de Rijkscommissie voor Graadmeting, den Algemeenen Dienst van den Rijkswaterstaat en de Directie der Zuiderzeewerken een waterpassing ondernomen, onder leiding van Ir. W. SCHERMERHORN, van Helder naar Terschelling, waardoor de kring om de Zuiderzee werd gesloten. Hierbij werden geheel nieuwe instrumenten gebruikt, waarbij rekening was gehouden met de ervaringen die bij de vorige slagen over het water waren opgedaan. De overgangen over de Helsdeur en het Eierlandsche zeegat slaagden naar wensch; de middelbare waarde van de daarbij gemaakte fouten was nauwelijks groter dan die in nauwkeurigheidswaterpassingen over denzelfden afstand te land.

De slag over het Vlie is veel langer, nl. ruim 6 kilometer, terwijl hij bij de andere overgangen ongeveer 2 kilometer bedraagt. De waarnemingen liepen vlot van stapel, de radioverbinding tusschen de meetstations aan beide zijden van het zeegat deed daarbij goede diensten. Bij het uitwerken van de waarnemingen bleek het dat de uitkomst van de waterpassing een verschil van 7 cm vertoonde met het resultaat van de in de volgende § te bespreken overbrenging over het water volgens de middenstandmethode. Een zoo groot verschil kan niet verklaard worden door fouten in deze laatste methode, zoodat men moet aannemen dat in het door de waterpassing gevonden hoogteverschil een onzekerheid van eenige centimeters bestaat. In de eerste plaats zal men daarbij denken aan de straalbuiging,

die over dezen afstand gemiddeld een waarde van bijna een halven meter bereikt. Wel zijn de waarnemingspunten met voordacht zoodanig gekozen, dat de opstelling zooveel mogelijk symmetrisch was en wettigen de meetcijfers het vermoeden dat de invloed der straalbuiging practisch geheel is geëlimineerd, (bijlage 5), maar zekerheid daarover kan niet worden verkregen. Ook geeft onbekendheid met den juisten vorm van de geoïde een onzekerheid, te meer daar juist op Terschelling de loodlijnafwijkingen zeer groot en geheel anders dan op Vlieland zijn.

Men heeft daarom de uitkomst van de overbrenging over het water verder gebruikt voor de bepaling van het vlak van N.A.P. op Terschelling.

Een kort verslag van de waterpassing van Helder naar Terschelling is als bijlage 5 opgenomen, een meer uitgebreide beschrijving komt voor in het Zeitschrift für Vermessungswesen <sup>1)</sup>.

Op grond van de waterpassingen is vastgesteld, dat het nulpunt van de peilschaal te Oude Schild (A.P.) 6 cm boven N.A.P. ligt. Te Vlieland (haven) is A.P. 7 cm boven N.A.P., terwijl de merken van volzee (V.Z.) aan de haven van Terschelling 55, te Nes op Ameland 86 en te den Oever 13 cm boven N.A.P. liggen.

§ 16. *Overbrengen van het peil over het water.* Bij een groot aantal peilschalen is het niet goed mogelijk door een waterpassing de hoogteligging van het vlak van N.A.P. te leeren kennen. Zoo werd een waterpassing naar Schiermonnikoog te bezwaarlijk geacht. Evenmin is er over gedacht de aan den ducdalf op het Breezand geplaatste dieptemeters te waterpassen, terwijl de overbrenging naar de dieptemeters voor Piaam en bij de Hendrik Tjaarsplaat geen bevredigende resultaten opleverde. Voor de voor korten tijd geplaatste dieptemeters en slaggaarden was het uit den aard der zaak geheel onmogelijk door een waterpassing de hoogte van het nulpunt te bepalen.

In al deze gevallen is die bepaling verricht door het N.A.P. volgens de z.g. middenstandmethode met den waterspiegel over te brengen.

Deze methode berust op de volgende overwegingen. Wanneer op een homogene watermassa in rust geen andere kracht werkt dan de zwaartekracht stelt het oppervlak zich overal loodrecht op deze. Men kan een zoodanig oppervlak een niveauvlak noemen, het is overal evenwijdig aan de zoogenaamde geoïde.

Bij waterbeweging en bij het optreden van een andere kracht dan de zwaartekracht, zooals de windwrijving, zal de waterspiegel hier in positieven, ginds in negatieven zin van het niveauvlak afwijken.

Wanneer alleen de met de getijbeweging rechtstreeks samenhangende hoogteveranderingen aanwezig waren zou de middenstand, d.i. het gemiddelde van een zeer groot aantal waterhoogten die met gelijke tijdsintervallen na elkander voorkomen, op ieder punt in dit vlak liggen. Dit is echter niet het geval, vooral op dagen met krachtigen wind. Dan vindt men, met den wind meegaande, plaatsen met steeds hooger en middenstand.

Naarmate een langer tijdperk wordt beschouwd, bestaat er meer kans dat daarin wind van verschillende richting is voorgekomen, zoodat de afwijking dan kleiner wordt. Een afwijking, die overeenkomt met de opwaaiing, die door den gemiddelden wind over lange periode wordt veroorzaakt, blijft echter altijd bestaan (verg. § 19), zoodat hier een reden is, waarom het middenstandvlak van het niveauvlak kan afwijken. Ook door andere oorzaken ligt de middenstand aan de verschillende peilschalen niet even hoog. Eén daarvan is de ongelijkheid in soortelijk gewicht: het water voldoet niet aan de voorwaarde van homogeniteit en daardoor ligt de middenstand in de Waddenzee (soortelijk gewicht 1,020—1,025) lager dan in de kom met haar kleinere dichtheid (afnemend tot 1,003). Ook een sterke asymmetrie van het getij kan verschil in middenstand ten gevolge hebben. Het feit

<sup>1)</sup> Literatuurgave n°. 73.

dat in het overgangsgebied tusschen Waddenzee en Zuiderzee de ebstroom iets sneller is dan de vloedstroom vereischt een geleidelijke stijging van den middenstand in de richting van de Zuiderzee.

De veranderingen waarvan hier sprake is zijn geleidelijk en daar zij bij mooi weer en over lange perioden genomen slechts enkele centimeters groot zijn, mag men door interpolatie den middenstand op eenig punt afleiden uit die van omringende plaatsen.

Door hiervan gebruik te maken zijn o. a. een groot deel van de in bijlage 12 voorkomende waterhoogten tot N.A.P., dat een niveaувlak is, herleid.

Wanneer men reden heeft om aan te nemen dat de middenstand hetzij voor een enkelen dag, hetzij over een lange periode op twee plaatsen even hoog is, kan een peil van de eene plaats naar de andere worden overgebracht. Men neemt dan op beide plaatsen gedurende minstens één vol getij een peilschaal waar en leidt uit de aflezingen de middenstanden bij de peilschalen af.

Ook wanneer een correctie, bijvoorbeeld voor opwaaing, moet worden aangebracht kan men op deze wijze te werk gaan. Deze correcties zijn echter nooit met groote nauwkeurigheid bekend en wanneer zij groot worden is de methode niet bruikbaar.

In 1926 is het peil van N. A. P. overgebracht naar Schiermonnikoog door den middenstand van een aldaar opgestelde tijdelijke peilschaal te vergelijken met dien te Oostmahorn. De uitkomst is dat op Schiermonnikoog het merk van volzee 95 cm boven N. A. P. ligt.

Behalve de geleidelijke verandering van den middenstand over groote uitgestrektheid treft men nog locale afwijkingen aan, die hun oorzaak vinden in te kleine diepte en daardoor onvolledige ontwikkeling van het laagwater of in krachten die van de tweede macht der stroomsnelheid afhangen (centrifugaalkracht en kracht van BERNOULLI, zie § 34). Om de eerste reden is bijvoorbeeld in de haven van Vlieland in de laatste jaren de middenstand belangrijk (6 cm) hooger dan in die van Terschelling, de tweede veroorzaakt lagen middenstand overal waar de stroomsnelheid groot is (Helder, den Oever vóór de uitvoering van werkhaven en sluisput) en op plaatsen die aan de holle zijde van gebogen stroomlijnen liggen, zooals Stavoren.

Bij de overbrenging van het N. A. P. van Vlieland naar Terschelling, waarvan in de vorige § sprake was, konden de registreerende peilschalen in de havens niet worden gebruikt wegens het onvolledige laagwater in de haven van Vlieland (zie figuur 6, blz. 34). Daarom zijn tijdelijke peilschalen geplaatst aan het nauwste gedeelte van het zeegat op dezelfde plaatsen waar de opstelling der waterpasinstrumenten was gekozen, dus op Vlieland bij strandhoofd 62 en op den Noordvaarder bij strandpaal II 3400. De peilschalen waren door waterpassingen aangesloten aan de merken op de eilanden en aan de vaste peilschalen in de havens. De situatie is zóódanig, dat de stroomen, afgezien van een phaseverschil, symmetrisch zijn ten opzichte van de middelloodlijn van de peilschalen, die ten naasten bij als de as van het zeegat kan worden beschouwd. Dientengevolge geven de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI geen aanleiding tot een correctie. Voor den wind moet wél een correctie worden aangebracht; deze was op de waarnemingsdagen steeds kleiner dan twee centimeter en de onzekerheid daarin niet meer dan enkele millimeters.

De op een dag waargenomen waterstandkrommen zijn opgenomen in bijlage 6. Men ziet daarin duidelijk, dat, hoewel de middenstanden van de beide tijdelijke peilschalen gelijk zijn, de gelijktijdig waargenomen waterstanden in den regel verschillen, soms meer dan een decimeter. Deze verschillen komen overeen met een dwarsverhang dat de door de stroomen veroorzaakte kracht van CORIOLIS (§ 33) opheft.

Deze verschillen hebben, omdat zij evenredig met de eerste macht van de stroomsnelheid zijn, bij normaal verloopende getijbeweging geen invloed

op den middenstand. Zij geven echter aanleiding tot fouten wanneer, zooals vroeger veelal is gedaan, het peil met hoogwater wordt overgebracht. Men ziet in bijlage 6, dat bij springtij die fouten in dit geval grooter dan een decimeter kunnen zijn.

Een overzicht van de middenstanden bij de vaste peilschalen voor de periode 1901—1920 vindt men in figuur 2, blz. 31. Tusschen deze peilschalen door zijn lijnen van gelijken middenstand getrokken en met behulp van deze lijnen kan men den voor die periode geldenden middenstand op een willekeurige plaats bepalen. De plaatselijke onregelmatigheid bij Hindeloopen en Stavoren kan worden verklaard door centrifugaal- en BERNOULLI-krachten.

De getallen van figuur 2, die ook in de tabel van bijlage 3 voorkomen, gelden voor omstreeks 1910.

Bij het beoordeelen en voorspellen van waterhoogten in de toekomst dient men rekening te houden met een eventueele daling van den bodem van Nederland, waardoor de middenstanden op den langen duur geleidelijk hooger kunnen worden.

Bij voortgezet onderzoek zal men in den loop der jaren met meer zekerheid dan thans over dit verschijnsel kunnen oordeelen. Thans blijkt wel reeds een stijging van de middenstanden uit de in Afdeeling I van de Tienjarige Overzichten der waterhoogten <sup>1)</sup> gegeven gemiddelde vloed- en ebhoogten voor opeenvolgende tienjaarlijksche tijdvakken, maar het is niet zeker in hoeverre hier locale zakkingen in het spel zijn.

#### HOOGST WAARGENOMEN WATERSTANDEN.



Figuur 9.

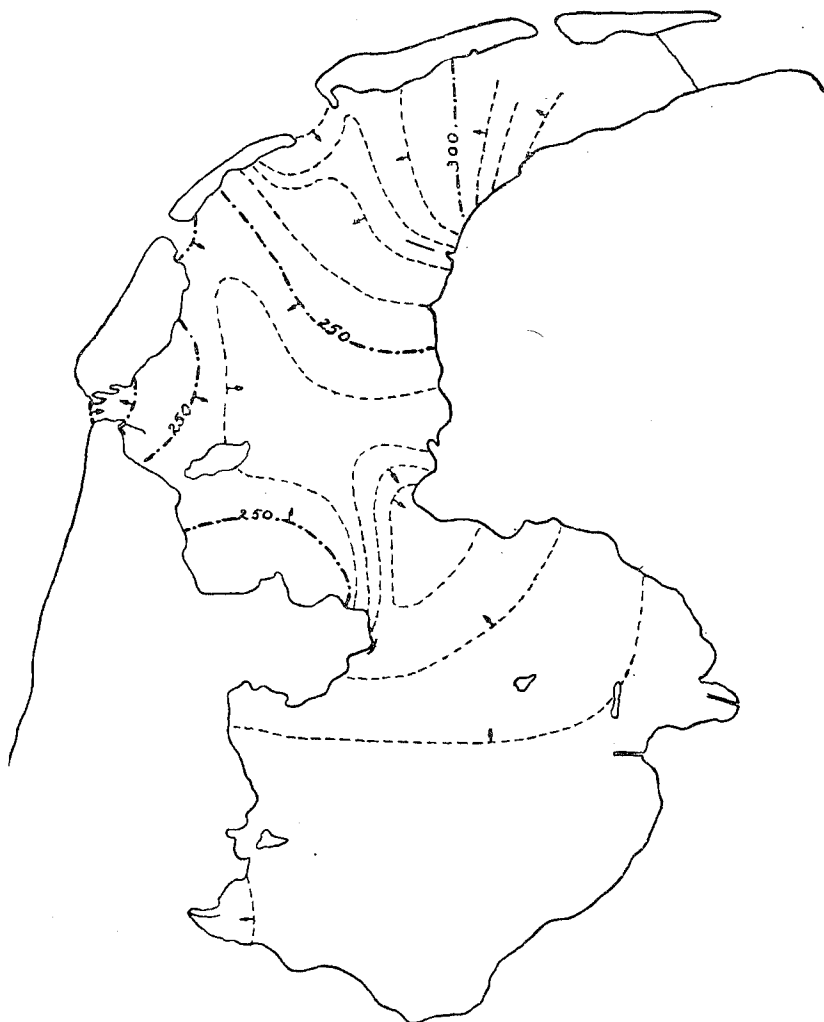
<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 29.

## C. DE VERSCHIJNSELEN BIJ STORMVLOED.

§ 17. *Vóór 1918 verrichte waarnemingen.* De waarnemingen bij vroegere stormen omvatten alleen waterstanden. Behalve de peilschalen, waar geregeld waarnemingen geschieden, wordt ook een aantal andere peilschalen afgelezen. In den regel is daarbij alleen het doel den hoogst bereikten stand te leeren kennen; op sommige waarnemingspunten wordt bij storm een geheele serie aflezingen verricht.

De hoogste standen worden telken jare gepubliceerd in de „Verslagen Openbare Werken” <sup>1)</sup> terwijl over zeer belangrijke stormvloedden een afzonderlijk verslag <sup>2)</sup> verschijnt. In het laatste van die verslagen, dat over den

MAXIMUM WATERSTANDEN BIJ DEN STORMVLOED  
VAN 22/23 DECEMBER 1894.



Figuur 10.

stormvloed van 13/14 Januari 1916, zijn voor de in de laatste honderd jaar voorgekomen stormen van beteekenis de hoogste waterstanden gegeven voor alle plaatsen in Nederland waar zij bekend zijn. Een uittreksel daaruit, aangevuld met eenige stormvloedden van lateren datum, vindt men in de uitslaande tabel 4 (blz. 68a).

De op ieder punt bereikte maxima zijn aangegeven in figuur 9. Men ziet dat de stormstanden in de Waddenzee, vooral in het zuidelijk gedeelte daarvan, betrekkelijk zeer laag zijn. Het maximum van 235 cm + N.A.P. te den Oever is al bijzonder klein; alleen voor een viertal plaatsen langs de

<sup>1)</sup> Literaturopgave n°. 13.

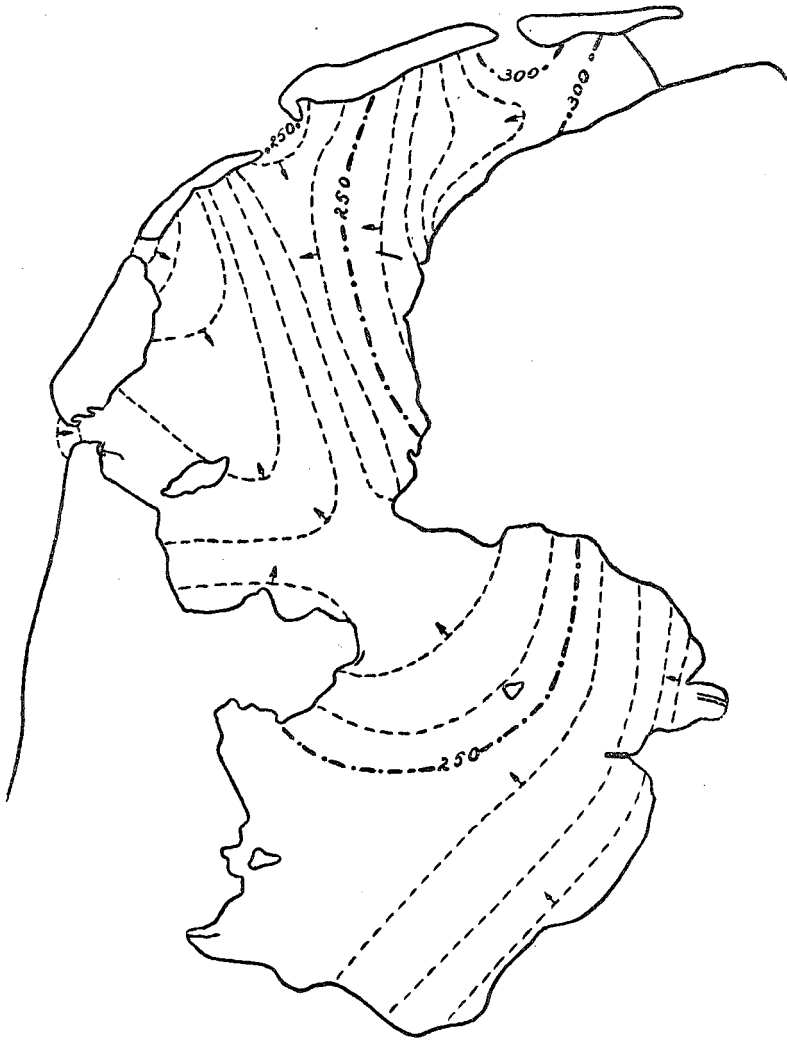
<sup>2)</sup> „ n°. 12.

Donge, waar de stormvloeden bijna niet kunnen doordringen, is dit getal nog lager, maar op verreweg de meeste plaatsen in Nederland zijn standen boven 300 cm + N.A.P. voorgekomen.

In dit feit ligt wel een duidelijke aanwijzing van de verlagende werking die de aanwezigheid van de Zuiderzee op de waterstanden in de Waddenzee uitoefent.

Ook bij elken stormvloed op zichzelf kan men dit verschijnsel waarnemen. In fig. 10 en 11, die de hoogste standen, voorgekomen gedurende de

MAXIMUM WATERSTANDEN BIJ DEN STORMVLOED  
VAN 6/8 DECEMBER 1895.



Figuur 11.

stormvloeden van 22/23 December 1894 en 6/8 December 1895, aangeven, komen de betrekkelijk lage waterstanden aan den mond der Zuiderzee duidelijk uit. De laagste stand ligt in deze twee gevallen echter op een geheel andere plaats, wat in verband staat met het verschillend karakter van beide stormvloeden. Hierop wordt in hoofdstuk V uitvoeriger teruggekomen.

Het is niet mogelijk alleen door beschouwing der maxima een duidelijk inzicht in de verschijnselen bij een stormvloed te verkrijgen. Daartoe is het noodig de veranderingen van den waterstand op enkele plaatsen gedurende den geheelen stormvloed te volgen en ook voor bepaalde tijdstippen de waterhoogten in het geheele gebied te bestudeeren. De aantekeningen van de registreerende peilschalen verschaffen de gegevens voor beide.

Uit de waterstandkromme voor een bepaald punt kan men zich een beeld vormen van de afwijking die deze kromme vertoont van de normale getijbeweging. Deze afwijking wordt in den regel aangeduid als windeffect, of, wanneer zij positief is, ook wel als windstuwing of kortweg stuwing.

Vooral op plaatsen met een zwak getij, zooals in de kom van de Zuiderzee, kan het windeffect zoo groot zijn en zoo sterk met den tijd veranderen, dat de getijbeweging zelf op den achtergrond raakt. Men ziet het water dan soms een etmaal onafgebroken stijgen en na afloop van den storm weer even lang dalen. Bekend is in dit opzicht de stormvloed van 21 Juli 1672, waarvan o.a. FRUIN een beschrijving geeft (Verspreide Geschriften, deel IX, blz. 161). Ook in de beschrijving in het Verslag Openbare Werken over 1863 wordt bij de beschrijving van den stormvloed van 3/4 December 1863 (§ 25) naar dien vroegeren vloed verwezen.

Een nauwkeurige beschouwing van de peilschaaldiagrammen leert echter dat de getijbeweging gedurende den storm onafgebroken doorgaat. Gedurende het opkomen van den storm ziet men tegen den tijd dat men hoogwater kan verwachten steeds een versnelde rijzing, terwijl men ook tijdens het afnemen van het windeffect aan golvingen in de kromme de tijdstippen kan terugvinden, waarop het hoog- en laagwater had moeten zijn.

Bij een lang aanhoudenden storm, zooals die van begin December 1895, toen het water in de Zuiderzee eenige dagen lang opgestuwd bleef, komt het getij weer duidelijk te voorschijn; de geheele beweging vindt op een hooger niveau plaats.

Om het windeffect te kunnen berekenen moet men de getijbeweging, zooals die zonder storm zou zijn geweest, kennen. Globaal kan men die bepalen volgens de methode van LUBBOCK (§ 41) door de voorspelde punten van hoog- en laagwater te verbinden door een kromme zooals die voor den dag van den storm waarschijnlijk is. Op plaatsen met een klein tijverschil kan men hiermede volstaan, maar anders moet men voor nauwkeurig werk zijn toevlucht nemen tot de harmonische analyse, die in dezelfde § is uiteengezet.

De heer GALLÉ, die reeds bij het onderzoek ten behoeve van de Staatscommissie inzake buitengewoon hooge standen op den Rotterdamschen Waterweg <sup>1)</sup> op deze wijze een aantal windeffecten had bepaald, heeft in zijn brochure van 1917 <sup>2)</sup> voor een groot aantal plaatsen in en om de Zuiderzee het windeffect gedurende enkele zware stormen in cijfers gebracht. Hij toonde aan dat er een innig verband bestaat tusschen het windeffect en den wind zelf, of liever den werkzamen component daarvan. Als werkzame component wordt beschouwd het vierkant van de ontbondene van de windsnelheid in de richting die het meest geschikt is om de stuwing te veroorzaken. Voor de Noordzee in de nabijheid van het Texelsche zeegat is die richting NWTW; voor de Zuiderzee is zij NNW.

In een later stadium van de werkzaamheden der Staatscommissie zijn nog meer windstuwingen berekend. Daarbij werd voor de bepaling van de normale getijlijnen, de z.g. astronomische standen, de werkwijze toegepast die in bijlage 3 is aangegeven.

Een ander onderzoek is door de heeren PHAFF, STOEL en VAN DER STOK met behulp van de in den storm van December 1895 opgeteekende krommen verricht. Daarbij bleek dat de getijbeweging in de Zuiderzee gedurende den stormvloed sterker is dan gewoonlijk. De mate van versterking bleek af te hangen van de hoogte tot welke het water was opgezet; het verband tusschen deze hoogte en het tijverschil op enkele plaatsen kon worden bepaald.

De oorzaak van die tijversterking ligt voor de hand: de grootere diepte, die met de hooge waterstanden gepaard gaat, maakt dat de getijgolf op zijn weg van de Noordzee naar binnen minder weerstand ontmoet dan anders en dus niet zoo sterk als gewoonlijk wordt gedempt. Inderdaad

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 14.

<sup>2)</sup> „ „ n°. 7.

leerde een getijberekening volgens § 46 (bijlage 9) dat men door het aannemen van een twee meter verhoogden middenstand, dus twee meter grootere diepten, tot de waargenomen getijversterking komt. Maar bovendien voerde deze berekening tot de uitkomst dat de voortplantingsnelheid van het getij door de grootere diepte wordt vermeerderd, zoodat niet alleen in de Zuiderzee, maar ook in een deel van de Waddenzee, waar geen sprake is van *getijversterking*, de phase van het getij moet zijn vervroegd.

Toen dit eenmaal bekend was is men bij de bestudeering van de diagrammen op die vervroeging gaan letten en het bleek dat zij inderdaad voorkwam, ook in de Waddenzee. Wanneer men van getijlijnen van Harlingen en Zoutkamp bij storm de berekende krommen der astronomische standen aftrekt, dan vertoont het aldus bepaalde „windeffect” een duidelijke dubbeldaagsche periode. Het is alsof een getij met een amplitude van 20 à 30 cm niet in rekening is gebracht. Het hoogwater van dat getij ligt steeds eenige uren vóór het „astronomische” hoogwater.

Het periodieke deel in de uitkomst verdwijnt als men voor het getij een vervroeging van een half tot een heel uur aanneemt en de „astronomische” kromme een daarmee overeenkomende verschuiving laat ondergaan.

Bij lage waterstanden vindt in de kom der Zuiderzee een getijverzwakking plaats, zooals de heer VAN DER STOK met behulp van de krommen van midden Januari 1912 heeft aangetoond. Ook voor dit geval is een getijberekening uitgevoerd en wel met een middenstand van een meter lager dan gewoonlijk (bijlage 9). De uitkomsten van deze berekening kwamen met de waarneming overeen. Men moet hierbij in het oog houden dat in Januari 1912 ook eenig ijs in de Zuiderzee aanwezig is geweest, wat eveneens de getijbeweging heeft belemmerd (bijlage 9).

Wanneer men uit de waarnemingen besluiten wil trekken omtrent hetgeen als „rechtstreeksche” uitwerking van den wind (driftstroom en opwaaiing) kan worden beschouwd, dan moet men bij de bepaling van de astronomische getijden met de „indirecte” gevolgen van den wind, die zich in den vorm van de boven besproken afwijkingen doen gevoelen, rekening houden.

Bij de uitvoering van de hier genoemde getijberekeningen bleek dat in de Waddenzee, in tegenstelling met hetgeen thans het geval is, na de afsluiting der Zuiderzee de bij storm voorkomende hoogere waterstand niet slechts een vervroeging, maar ook een versterking van het getij zal teweegbrengen.

Een groep van berekeningen, die bij het latere onderzoek van zeer veel nut zijn geweest, vormt het bepalen van de waterhoeveelheid die gedurende den storm per tijdseenheid naar de Zuiderzee stroomt. Deze hoeveelheid wordt bepaald door voor twee tijdstippen de gemiddelde hoogte van den waterspiegel, over de geheele Zuiderzee genomen, te vergelijken. Het verschil, vermenigvuldigd met de oppervlakte van de Zuiderzee, geeft het in het tusschen de beide oogenblikken gelegen tijdvak geborgen water-volume; dit volume, gedeeld door de lengte van het tijdvak, leert de verlangde hoeveelheid kennen.

Ten einde te komen tot de gemiddelde waterhoogte moet in elk geval het geheele gebied in een zeker aantal deelen, gelijk of ongelijk, worden verdeeld, in dier voege dat voor elk deel een bepaalde waterstand kan worden in rekening gebracht. Het gemiddelde wordt dan gevonden door de waterhoogte van elk gebied met de grootte van dit laatste te vermenigvuldigen, de uitkomsten bij elkander op te tellen en ten slotte door de grootte van het geheele gebied te deelen.

Men kan nu bij de toepassing dezer methode, zooals o.a. door de heeren KOOPER <sup>1)</sup> en LELY <sup>2)</sup> is gedaan, met elke peilschaal eens en voor al een bepaald gebied verbinden. Bij sommige latere berekeningen is daarentegen eerst met behulp van alle bekende waterstanden op het beschouwde oogenblik

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 8.

<sup>2)</sup> „ „ n<sup>os</sup>. 9 en 11.

een kaartje met niveaulijnen geteekend. Men is dan in de gelegenheid de waterstanden onderling te vergelijken en kritisch te beschouwen en ten slotte door doelmatige verdeling in gebieden het gezochte gemiddelde te berekenen.

Voor sommige stormen is van beide werkwijzen gebruik gemaakt; het bleek daarbij dat ze tot zeer weinig van elkander afwijkende resultaten leiden: de verschillen in de twee gevonden waarden voor den gemiddelden Zuiderzeestand zijn niet grooter dan enkele centimeters.

Aan het einde van dit overzicht der vroegere waarnemingen moge nog vermeld worden dat op enkele plaatsen windmeters waren opgesteld. Het belangrijkste waarnemingstation in dit opzicht is Helder; bovendien leverden de instrumenten te Leeuwarden, Groningen, Elburg, de Bilt en Amsterdam bijdragen tot de kennis van de windverdeling.

§ 18. *Uitbreiding van het waarnemingsmateriaal na 1918.* Dank zij de zoeven genoemde waarnemingen was de kennis van den wind in de Zuiderzee voldoende, in het noordelijk deel van de Waddenzee en in de Friesche en Groningsche Wadden echter niet. Daarom kwam het zeer gelegen, dat in 1919 een drietal anemometers, op initiatief van de Staatscommissie inzake den Rotterdamschen Waterweg aangeschaft, door het Meteorologisch Instituut te IJmuiden, op Vlieland en op Rottum werd in werking gesteld.

Door deze uitbreiding van het aantal anemometers en door de plaatsing van de in § 5 genoemde nieuwe peilschalen kon een beter inzicht worden verkregen in de verschijnselen in de Waddenzee en vooral in de zeegaten. Wel zijn na 1918 geen zeer hoge stormvloedden meer voorgekomen, maar van een aantal middelmatige stormen van verschillend type zijn gegevens verzameld.

In het bijzonder is dit het geval met den storm van 6/7. November 1921. Alle nieuw geplaatste registreerende peilschalen hebben toen goed gewerkt, bovendien waren toevallig twee dieptemeters zonder vaste opstelling in de Waddenzee aanwezig, die een zeer welkome aanvulling van het waarnemingsmateriaal verschafften. Figuur 12 geeft een overzicht van de bereikte maxima, waarin zijn verwerkt de gegevens van de volgende vanwege de Staatscommissie geplaatste instrumenten:

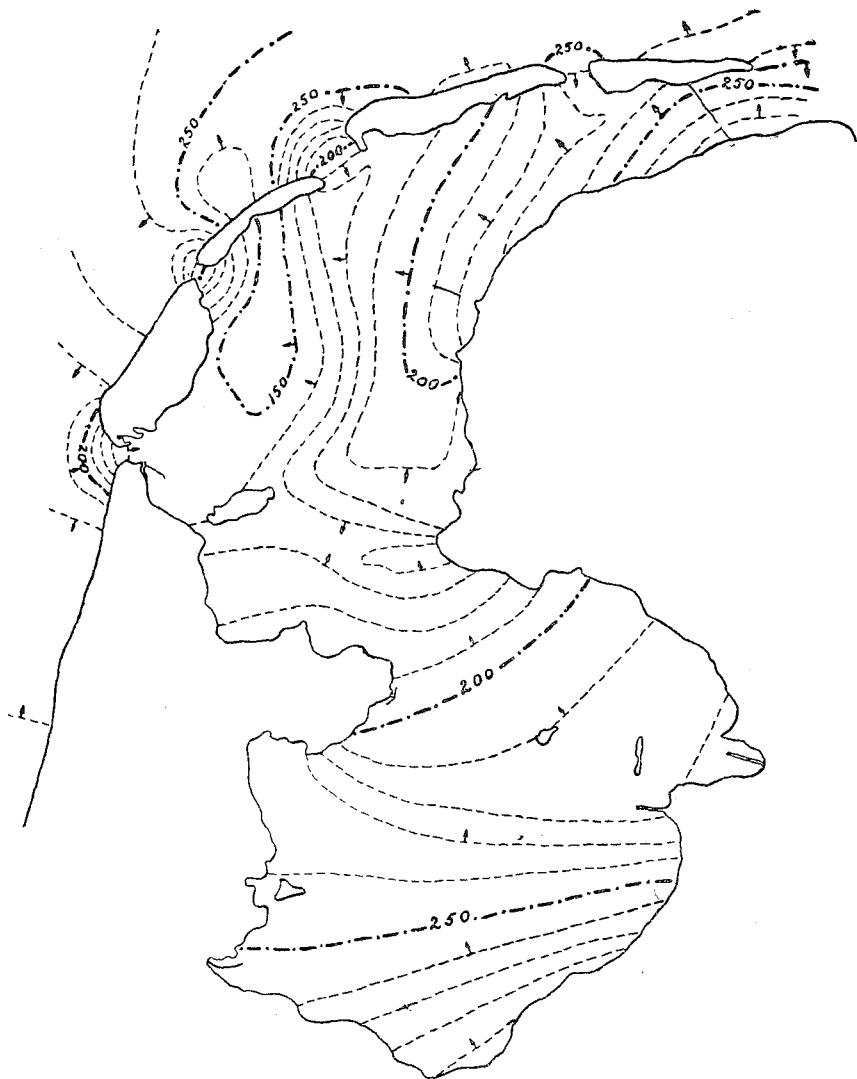
Callantsoog, electrisch registreerende peilschaal,  
 Vlieland, strandhoofd 10, vloeipeilschaal,  
 Terschelling, strandpaal XI, vloeipeilschaal,  
 Westerland, registreerende peilschaal,  
 den Oever, registreerende peilschaal,  
 Breezand, dieptemeter,  
 Piaam, dieptemeter,  
 Makkum, registreerende peilschaal,  
 Zurig, dieptemeter,  
 Nieuw Bildt, electrisch registreerende peilschaal,  
 Holwerd, dieptemeter,  
 Oostmahorn, dieptemeter,  
 Noordpolderzijl, registreerende peilschaal,  
 Schiermonnikoog, electrisch registreerende peilschaal,  
 Hollum, electrisch registreerende peilschaal,  
 Terschelling, haven, electrisch en gewoon registreerende peilschaal,  
 Hendrik Tjaarsplaat, dieptemeter,  
 Riepel, los opgestelde dieptemeter en  
 Vlieter, los opgestelde dieptemeter.

Al deze gegevens maken dat het kaartje nu met veel meer zekerheid is te teekenen, vooral wat de Noordzeestanden betreft. Alleen is bij het teekenen der lijnen van de aflezing aan de gewone schaal te Petten (160 cm + N.A.P.) geen gebruik gemaakt. Deze is klaarblijkelijk veel te laag geweest. Wel zal de stand minder hoog zijn geweest dan te IJmuiden en Callantsoog, maar een verschil van 50 cm is toch moeilijk aan te nemen. Daar het

tijdens den hoogsten stand donker was en er een hevige branding stond is het ook niet te verwonderen dat er groote afleesfouten zijn gemaakt; ook is het mogelijk, dat de waarnemer niet op het oogenblik van den hoogsten stand bij de peilschaal is geweest. In verband hiermee is ook in fig. 10 en 11 geen rekening gehouden met de aflezing van Petten.

Ook op het nieuwe kaartje is het gebied met betrekkelijk lage waterstanden te vinden en wel vooreerst een minimum op dezelfde plaats als er in 1894 een gezien werd, nl. bij Stavoren (figuur 10) en bovendien een op de Waardgronden ten oosten van Texel en Vlieland, waar het ook

MAXIMUM WATERSTANDEN BIJ DEN STORMVLOED  
VAN 6/7 NOVEMBER 1921.



Figuur 12.

in 1895 (figuur 11) (toen het minimum bij Stavoren ontbrak) lag. Het bestaan van dit laatste minimum is met zekerheid te bewijzen door de waarneming van den dieptemeter „Riepel”. Het kan in verband worden gebracht met de ruime gelegenheid tot afvoer van water aan de lijszijde door den Texelstroom, terwijl de toevoer van den windkant door het nauwe Eierlandsche zeegat en over den hoogen Vliehors alleen bij een sterk verval in voldoende mate kan plaats vinden.

De stroom naar de Zuiderzee is bij dezen storm van 1921 met meer zekerheid te bepalen dan vroeger, omdat bij het berekenen van den gemiddelden Zuiderzeestand op elk willekeurig uur kan worden beschikt over de waterstanden in de nabijheid van de afsluitingslijn, zoodat het niet

meer noodig is daarvoor te interpoleeren tusschen de standen te Enkhuizen, Helder, Harlingen en Hindeloopen.

Wat de waarnemingen na 1918 hebben geleerd omtrent den toestand in de zeegaten zal worden besproken in § 21.

§ 19. *Waarnemingen omtrent de opwaaiing.* Indien er geen getijbeweging bestond en de wind lang genoeg in dezelfde richting en met dezelfde sterkte woei om een evenwichtstoestand te doen ontstaan, en als bovendien in dien toestand het water nergens in een horizontalen kring rondliep, zou men uit de waargenomen hoogten onmiddellijk hoogteverschillen kunnen afleiden die met de kracht van den wind evenwicht kunnen maken of, zooals men ook kan zeggen, door die kracht kunnen worden voortgebracht. Deze verschillen zijn het, waarop verder de naam „opwaaiing” of „afwaaiing” zal worden toegepast. Men kan zich ervan verzekeren dat aan de tweede voorwaarde, stationaire toestand wat den wind betreft, voldaan is door een storm van langen duur te kiezen, en de derde voorwaarde, geen circulatie in horizontale richting, zal vervuld kunnen worden als men het gebied op geschikte wijze kiest. Aan de eerste voorwaarde, afwezigheid der getijbeweging, zal echter nooit voldaan zijn, en men zal daarom aan de werkelijk bestaande hoogteverschillen  $\Delta h$  een correctie moeten aanbrengen om de „opwaaiingen”  $\Delta_1 h$  te verkrijgen. In  $\Delta h$  zijn nl. behalve deze laatste verschillen ook die begrepen, welke bij de getijbeweging behooren, en wel is

$$\Delta h = \Delta_0 h + \Delta_1 h$$

als  $\Delta_0 h$  de hoogteverschillen zijn, zooals zij zonder wind door de schommelingen buiten de zeegaten worden veroorzaakt, indien het water in de zee overal de in werkelijkheid onder den invloed van den wind bestaande diepte heeft.

Heeft men die bepaald, dan worden de opwaaiingen door

$$\Delta_1 h = \Delta h - \Delta_0 h$$

gegeven.

Natuurlijk kan men in plaats van de hoogteverschillen  $\Delta h$  van elkander af te trekken ook nagaan wat bij de getijbeweging alleen in verschillende punten  $P$ ,  $Q$ , enz. de hoogten  $h_{0P}$ ,  $h_{0Q}$ , enz. op het beschouwde oogenblik zouden zijn; trekt men die hoogten af van de gedurende den storm bestaande hoogten  $h_P$ ,  $h_Q$ , enz., dan krijgt men zekere hoogten  $h_{1P}$ ,  $h_{1Q}$ , enz., welker onderlinge verschillen de gezochte opwaaiingen  $\Delta_1 h$  geven.

Er moet uitdrukkelijk op worden gewezen dat  $h_{0P}$ ,  $h_{0Q}$ , enz. niet de hoogten zijn, die het water blijkens de getijtafels zou bereiken, maar de hoogten die bij het getij zouden bereikt worden als het water de bij den storm voorkomende diepten had. Aan de uit de getijtafels afgeleide hoogten moet om deze reden een correctie worden aangebracht; de in hoofdstuk VI besproken getijberekeningen maken dit mogelijk. Kortheidshalve kunnen  $h_{0P}$ ,  $h_{0Q}$ , enz. de „gecorrigeerde getijhoogten” genoemd worden.

Ook moge er de aandacht op worden gevestigd dat voor de bepaling der opwaaiing steeds de hoogten in verschillende punten *op hetzelfde tijdstip* met elkaar moeten worden vergeleken. Het schijnt bijna overbodig dit te zeggen, maar het is de Staatscommissie gebleken, dat het niet altijd in het oog is gehouden.

Zal op de aangegeven wijze de opwaaiing  $\Delta_1 h$  met eenige nauwkeurigheid bepaald worden, dan is het wenschelijk dat het getijverschil  $\Delta_0 h$  klein is in vergelijking met het waargenomen hoogteverschil  $\Delta h$ , waarvan het moet worden afgetrokken. Dit is het geval in de kom der Zuiderzee. Het getij is daar zwak en de „correctie” die het moet ondergaan, ofschoon procentsgewijze zeer groot, niet van veel belang. Bovendien kan die correctie in vele gevallen met tamelijke zekerheid worden aangebracht.

De waarnemingen in de kom der Zuiderzee hebben dus gediend om de opwaaiing te bepalen en een daarvoor opgestelde formule op de proef te stellen.

De gekozen formule luidt:

$$H = p \frac{V^2 l \cos \varphi}{q} \quad (3)$$

waarin:

$H$  de opwaaiing tusschen twee plaatsen  $A$  en  $B$  (cm).

$p$  de opwaaiingsconstante.

$V$  de windsnelheid (m per sec).

$l$  de afstand  $A-B$  (kilometers).

$\varphi$  de hoek tusschen  $AB$  en de windrichting.

$q$  de diepte (meters).

De beschouwingen, waarop de formule is gegrond, zullen later worden gegeven (§§ 60 en 62); de formule is in overeenstemming met (23) van § 62.

Voor het bepalen van de constante  $p$  zijn gekozen de stormen van 6/8 December 1895, 13/14 Januari 1916 en 6/7 November 1921.

De aantekeningen van de registreerende peilschalen te Urk, Kraggenburg, Nijkerk en de aflezingen aan de Oranjesluizen zijn voor deze bepaling gebruikt.

Door meer dan twee stations in aanmerking te nemen maakt men zich eenigermate vrij van locale omstandigheden.

Men heeft eerst een punt  $P$  gedefinieerd, dat de verbindingslijn van de Oranjesluizen naar Kraggenburg in redden van 1 tot 3 verdeelt (figuur 13). De lijn  $P$ -Nijkerk, 27 kilometer lang, loopt dan vrijwel NW-ZO, dus in de windrichting. Evenzoo is op de verbindingslijn van Kraggenburg naar Nijkerk een punt  $Q$  ingevoerd, dat die lijn in redden van 2 tot 3 verdeelt. De van Urk naar  $Q$  getrokken lijn, die een lengte van 21 kilometer heeft, heeft dezelfde richting als  $P$ -Nijkerk.



Figuur 13.

Wanneer men de hoogteverandering van den zeespiegel langs de lijnen die de peilschalen verbinden als lineair aanneemt kan men het gemiddelde van de opwaaiing langs de lijnen  $P$ -Nijkerk en Urk- $Q$  uitdrukken als:

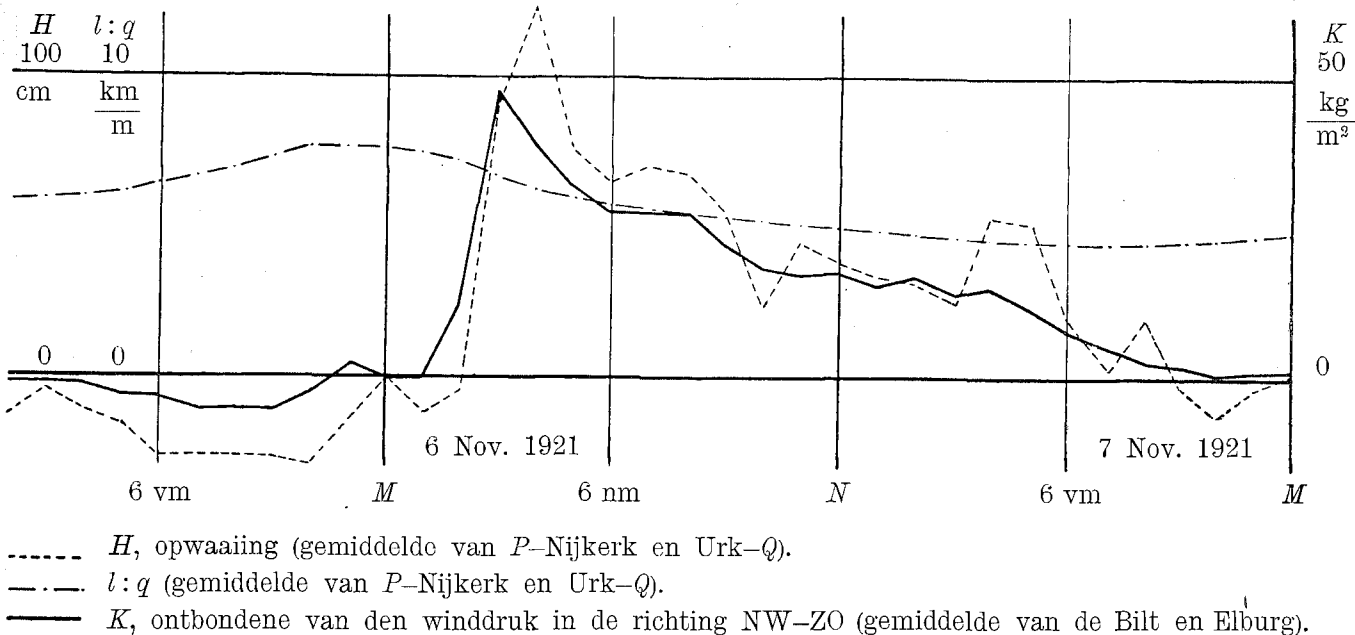
$$H = 0,700 N - 0,375 O + 0,175 K - 0,500 U.$$

Daarin zijn  $N$ ,  $O$ ,  $K$  en  $U$  de waargenomen windeffecten (berekend met het gecorrigeerd getij) in Nijkerk, aan de Oranjesluizen, te Kraggenburg en op Urk. Elburg is niet gebezigd omdat waarnemingen van die plaats voor 1895 niet beschikbaar waren.

De grootheid  $V^2 \cos \varphi$  in formule (3) kon worden bepaald uit de diagrammen van de anemometers te Helder, Elburg, de Bilt en Amsterdam, terwijl bij de bepaling van  $\frac{l}{q}$  er rekening mee moet worden gehouden dat de diepte  $q$  niet overal dezelfde is. De berekening is voor een aantal uren gedaan; voor elk daarvan moet de geschikte waarde van de diepte  $q$  worden genomen. De gemiddelde diepte onder N.A.P. is voor  $P$ -Nijkerk 2,8 m, voor Urk- $Q$  3,5 m.

In figuur 14 zijn de grootheden  $H$ ,  $V^2 \cos \varphi$  (of  $K$ ) en  $\frac{l}{q}$  voor den storm van 6/7 November 1921 in tekening gebracht; men ziet duidelijk het gelijke verloop van de beide eerste. Alleen bij het plotseling doorkomen van den

## WIND EN OPWAAIING IN DE KOM DER ZUIDERZEE.



Figuur 14.

storm na 1 uur is er ruim een uur noodig om de opwaaing tot stand te doen komen (verg. §§ 56 en 57).

De uitkomst waartoe de waarnemingen van dit drietal stormen hebben geleid is, dat de opwaaingsconstante  $p$  in formule (3) een waarde heeft tusschen 0,035 en 0,045 (§ 62); vermoedelijk dichter bij de onderste grens dan bij de bovenste.

Met  $p = 0,036$  is daarna bij een grooter aantal stormen en ook op een grooter aantal plaatsen (Dollart, Lauwerszee, Terschellinger Wad, Waddenzee enz.) de opwaaing berekend en, met inachtneming van de getijbeweging, vergeleken met de waarnemingen. Daarbij bleek dat de zooeven genoemde grenzen van de constante kunnen worden gehandhaafd.

Tot bevestiging van de gevonden uitkomsten zijn voorts nog de hoogteverschillen die bij den storm van Januari 1916 tusschen Enkhuizen en Nijkerk bestaan hebben, vergeleken met de volgens formule (3) berekende opwaaingen. Het bleek dat zij gedurende het eerste gedeelte van den storm niet onaanzienlijk kleiner zijn dan die opwaaingen, terwijl later het omgekeerde het geval was. De verschillen zouden nu, als aan de in het begin dezer § genoemde voorwaarden voldaan was, de hoogteverschillen moeten zijn, die bij de getijbeweging voorkomen. Bij nader onderzoek bleek de eerstgenoemde periode samen te vallen met de vulling van de kom der Zuiderzee en de tweede met het weder leegstroomen. Er is toen getracht uit de verschillen tusschen berekende opwaaing en waargenomen hoogteverschillen, met de gewone formule voor eenparige beweging (1) de vulling van de kom te bepalen. De gevonden stroomkromme vertoont geheel hetzelfde beeld als die uit het verloop van den gemiddelden waterstand in de kom volgt (de correlatiefactor bedraagt + 0,86). Wanneer de berekende opwaaing in eenigszins beteekenende mate van de werkelijke zou afwijken kon van een dergelijke overeenstemming geen sprake zijn.

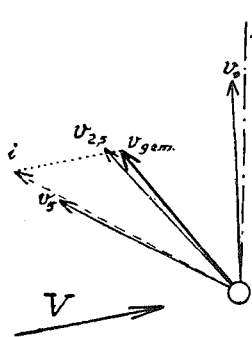
Bij deze bewerking is alleen met den zuiveren verhangstroom rekening gehouden, van complicaties als versnelling, aardrotatie en dergelijke is, als zijnde van minder belang, afgezien.

Een en ander bevestigt de over de opwaaing gegeven beschouwingen, maar uit de waarnemingen blijkt tevens dat in den regel zuivere opwaaing niet voorkomt, zelfs in de kom der Zuiderzee niet. De evenwichtstoestand wordt niet bereikt en daardoor zal de wind behalve hoogteverschillen ook stroomen doen ontstaan.

Dit is rechtstreeks geconstateerd op het Breezand bij de stroommetingen in 1920. Er woei toen de eerste dagen een harde westen-tot noordwesten-wind, die de metingen ten zeerste bemoeilijkte. Toch bleek uit de resultaten duidelijk dat de stroom niet meer uitsluitend door het verhang werd beheerscht, maar dat hij onder invloed van den wind een afwijking in richting en grootte onderging. Die afwijking was bij den oppervlaktestroom het sterkst en nam naar beneden toe af; aan den bodem was soms de windinvloed nauwelijks merkbaar. De gemiddelde stroom over de volle diepte vertoonde den windinvloed steeds.

Door met den stroom, zooals die alleen door het verhang zou moeten zijn, samen te stellen een door den wind veroorzaakten stroom, den driftstroom, vindt men den stroom die door de gezamenlijke werking van verhang en wind ontstaat.

Een voorbeeld hiervan geeft figuur 15, die aan de stroommetingen van 1920 is ontleend. De meting werd verricht in de lijn van den Oever naar Piaam op 9 kilometer afstand van eerstgenoemde plaats, op 29 April 1920 om 12 uur bij krachtigen wind, richting WtZ. Waterdiepte 6 m. Het verhang was naar het WNW en ruim 1,6 cm per km groot; de daarmee corresponderende stroom is ongeveer 50 cm per sec, dit is juist de stroom die op 5 meter diepte is gemeten. De stroom op 2,5 m diepte is  $20^\circ$ , die aan de oppervlakte  $60^\circ$  naar rechts gedraaid; de gemiddelde stroom over de geheele diepte is bijna gelijk aan den stroom op 2,5 m diepte. Deze gemiddelde stroom  $v_{gem.}$  moet worden opgevat als de resultante van



Figuur 15.

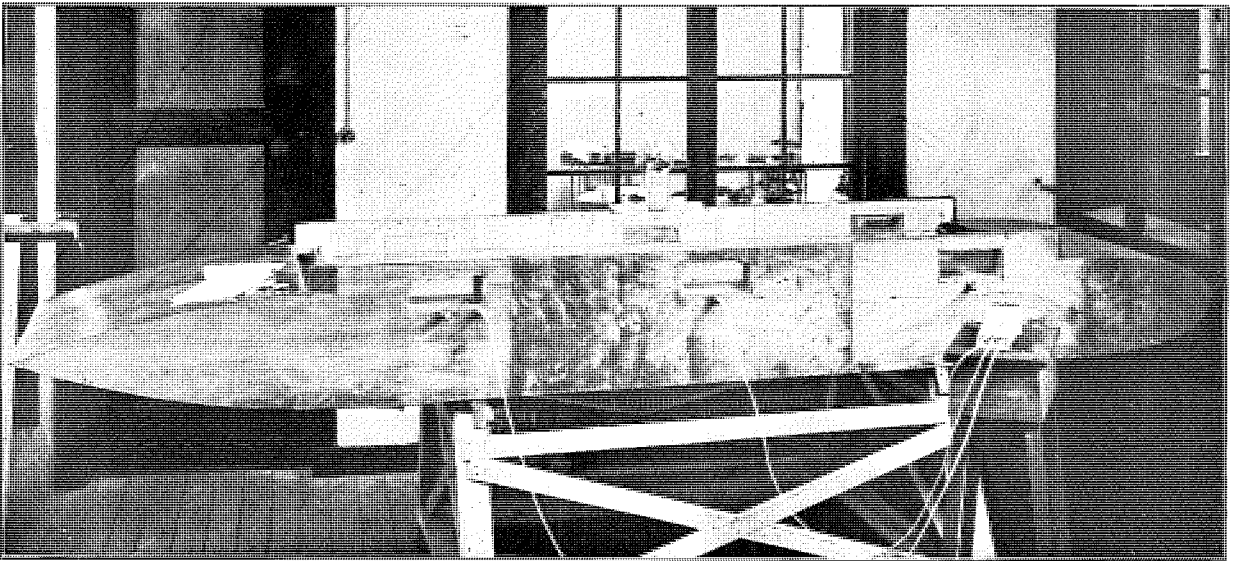
den stroom die bij afwezigheid van wind door het verhang zou worden veroorzaakt en den bij den wind behoorenden driftstroom. Deze laatste heeft uit den aard der zaak dezelfde richting als de wind, terwijl zijn snelheid (zooals in § 62 zal worden vermeld) ongeveer 3% van de windsnelheid, dat is in dit geval 30 cm per sec, bedraagt.

In figuur 15 stelt de stippellijn van  $i$  naar  $v_{gem.}$  dus den driftstroom voor, waaruit volgt, dat de uit den oorsprong naar  $i$  getrokken pijl moet overeenkomen met den verhangstroom. Inderdaad heeft deze pijl de richting van het verhang, doch hij stelt een stroomsnelheid van 65 cm per seconde voor in plaats van de juist berekende 50 cm. Dit verschil is intusschen goed verklaarbaar uit het feit dat noch de stroom, noch het verhang bij ruwe zee nauwkeurig is te meten.

Gaat de wind recht tegen den stroom in, dan heeft geen afwijking in richting plaats; wel ziet men dan dat de stroom zwakker is dan uit het verhang zou volgen; de verzwakking is het grootst in de bovenste lagen. Bij gelijk met den stroom gerichten wind, z.g. strijkend tij, heeft het omgekeerde plaats. De toeneming van de stroomsnelheid bij het oppervlak is nu echter meestal niet zoo groot als de verzwakking in het vorige geval. Dit zal het gevolg zijn van de door de golfbeweging versterkte turbulentie in de bovenste lagen, waardoor de weerstand die zich tegen den stroom verzet grooter wordt. In geulen, waarin geen noemenswaardige afwijking van de stroomrichting mogelijk is, ziet men het verschijnsel ook bij wind die dwars op den stroom staat. De oppervlaktestroom is dan in den regel zwakker dan hij zonder wind zou zijn, terwijl de stroom in de diepere lagen de gewone sterkte heeft.

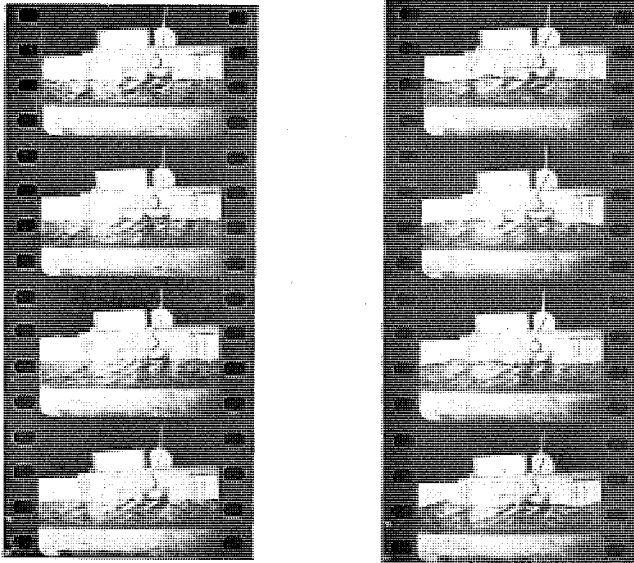
Een kwestie die samenhangt met die van den middenstand (§ 16) is de gemiddelde opwaaiing over een lang tijdvak genomen. Hoe die berekend kan worden, kan men aan formule (3) zien. Zet men in de richting van den wind een gerichte grootte of vector uit, waarvan de grootte door de tweede macht van de windsnelheid  $V$  bepaald wordt, dan is  $V^2 \cos \varphi$  de component van dien vector in de beschouwde richting. Men kan nu, b.v. gedurende een jaar, de vectoren  $V^2$ , zooals zij achtereenvolgens op verschillende tijdstippen zijn, uitzetten, en het gemiddelde van die alle in het

PROEFBAK VOOR METING VAN OPWAAIING.  
(wind moet van rechts komen).



Figuur 16.

GOLFFORMING IN PROEFBAK.  
8 m/sec      windsnelheid      19 m/sec



Figuur 17.

oog vatten, d.w.z. den vector dien men krijgt door ze alle samen te stellen en de resultante door het aantal te deelen, een bewerking die men het eenvoudigst uitvoert door de afzonderlijke vectoren volgens twee onderling loodrechte richtingen te ontbinden, zoowel voor de eene als voor de andere richting het gemiddelde van al de componenten te nemen en ten slotte de twee gemiddelden met elkander samen te stellen. Een snelheid in de richting der resultante en waarvan de tweede macht gelijk aan de grootte dier resultante is, kan men de middelbare windsnelheid gedurende het beschouwde tijdsverloop noemen.

Voert men deze berekeningen voor Helder uit, voor het jaar 1917, dan is de uitkomst: windsnelheid 3,6 m per sec; richting N 254° O. Volgens (3) veroorzaakt zij een opwaaiing van bijna een halven centimeter per kilometer bij een diepte van een meter; in de kom van de Zuiderzee, waar de diepte gemiddeld 3 meter is, dus ruim een centimeter over 10 kilometer afstand, wat goed overeenkomt met de verschillen in middenstand van de plaatsen rondom die kom (figuur 2 en § 16).

Het windgemiddelde over een jaar kan niet onbelangrijk afwijken van dat over een lange periode. Er moet daarom worden nagegaan of het gebruikte jaar 1917 te Helder voor den wind normaal is geweest. Een langjarig gemiddelde van  $V^2$  is nooit berekend; wel kent men het gemiddelde van  $V$  voor de lichtschepen. Op dezelfde wijze als zooeven met  $V^2$  is daarom met de vectoren  $V$  te werk gegaan. Voert men dit uit voor Helder, eveneens voor het jaar 1917, dan blijft de richting van den gemiddelden wind nageoeg dezelfde als zooeven die van den middelbaren wind, nl. N 248° O; de snelheid wordt echter veel kleiner, nl. 1,17 m per sec.

Deze waarden kan men vergelijken met de langjarige gemiddelden voor de lichtschepen, die men in een publicatie van het Kon. Ned. Meteorologisch Instituut <sup>1)</sup> kan vinden, nl.:

|                    |                  |             |
|--------------------|------------------|-------------|
| Terschellingerbank | 1,30 m per. sec; | N 255° O.   |
| Haaks              | 1,15 " " "       | ; N 261° O. |
| Maas               | 1,13 " " "       | ; N 244° O. |

In het jaar 1917 is de wind te Helder dus gelijk aan den normalen geweest en de uit dien wind afgeleide opwaaiing kan als een gemiddelde worden beschouwd.

§ 20. *Laboratoriumproeven.* In de windtunnel van den Rijks Studiedienst voor de Luchtvaart te Amsterdam zijn vanwege de Staatscommissie metingen verricht over de opwaaiing in een bak met water. De ingenieur van den studiedienst Ir. C. KONING verleende daarbij zijn medewerking.

De proefbak, waarvan een afbeelding voorkomt in figuur 16, is zoodanig uitgevoerd dat hij, in de vrijstraalkamer van de windtunnel geplaatst, aan den luchtstroom zoo weinig mogelijk weerstand biedt. De lengte binnenwerks is ruim 2 meter, de breedte 80 en de diepte 30 cm. Door vulblokken, die elk een derde deel van de breedte beslaan, kan de diepte tot 20 of 10 cm worden verminderd.

Er is gemeten met profielen van 30 × 80, 20 × 80 en 10 × 80 cm en met een profiel dat over het derde deel van de breedte een diepte van 30 cm had en overigens 10 cm diep was. Door de diepe geul beurtelings links en rechts aan te brengen kon tevens een indruk worden verkregen van het dwarsverval dat in dat geval optreedt.

De metingen omvatten luchtsnelheid, niveaoverschillen van het wateroppervlak, watersnelheden en golfbeweging.

De eerste werd bepaald met buizen van Prtor. Het bleek dat de luchtstroom dicht bij het watervlak sterk wordt vertraagd, juist zooals ook op zee voorkomt. Waterstanden werden op drie plaatsen bepaald: in den linker zijwand zijn drie kraantjes aangebracht, die door middel van slangen in

<sup>1)</sup> Literaturopgave n°. 18.

verbinding staan met buiten den luchtstroom geplaatste hellende buisjes, die de waterstandverschillen vijfmaal vergroot aangeven.

De stroommeter berust op hetzelfde principe als die van JACOBSEN: een aan een draad opgehangen gewichtje wordt door den stroom meegenomen tot de draad een bepaalde helling heeft verkregen. De draad loopt door een glazen buis, die wordt gedraaid tot de draad samenvalt met haar as; de draaiingshoek wordt dan afgelezen aan een verdeelden cirkelrand met horizontale as. Het instrumentje, dat op de foto zichtbaar is, is geijkt door het met bekende snelheden door stilstaand water te slepen.

De golfbeweging is bestudeerd door een filmopname te doen en daarbij een liniaal, een stophorloge en een anemometer mee te fotograferen.

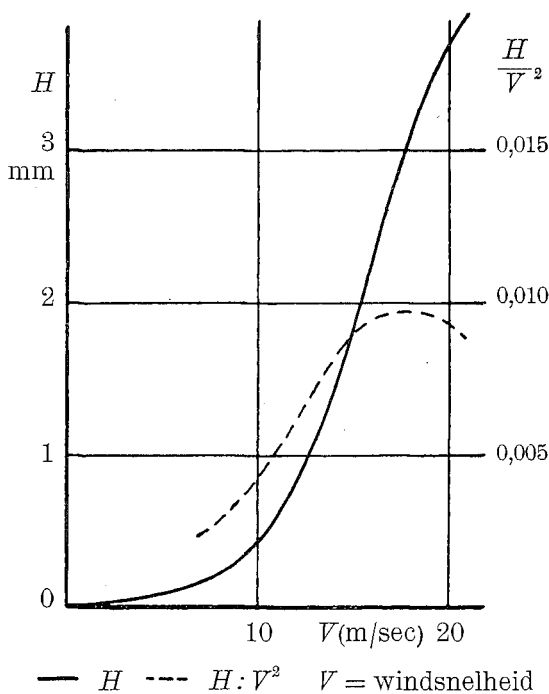
De opwaaiing in een diepte van 20 cm was voor alle windsnelheden vrij nauwkeurig gelijk aan de helft van die in 10 cm diepte; bij een waterdiepte van 30 cm was zij wederom kleiner, maar de resultaten van de verschillende meetseries liepen bij deze kleine niveauverschillen te veel uiteen dan dat men met zekerheid kan zeggen, dat de opwaaiing precies het derde deel is van die bij 10 cm diepte, in elk geval maakt het weinig verschil. De in (3) uitgedrukte wet dat de opwaaiing omgekeerd evenredig met de diepte is, wordt door deze metingen dus bevestigd.

Een eigenaardigen indruk maakt het dat de waterstand in het midden van den bak niet of nauwelijks hooger is dan aan het bovineinde en steeds veel lager dan met het gemiddelde bij de twee uiterste kraantjes overeenkomt. Dit is een afwijking van den regel dat de opwaaiing bij gelijke diepte over de volle lengte even groot is. Men mag dit toeschrijven aan storingen bij de einden van den bak en waarschijnlijk ook aan het feit dat de watersnelheden in het midden van den bak grooter zijn dan nabij de einden.

Het verband tusschen opwaaiing en windsnelheid vertoonde een eigenaardig verloop (figuur 18). Bij kleine windsnelheden was er zoo goed als geen opwaaiing: de wind schijnt op het dan nog vrij gladde wateroppervlak geen vat te hebben. Stijgt de luchtsnelheid  $V$  boven 10 meter per seconde (5 à 6 BEAUFORT) dan beginnen zich golven te ontwikkelen en de opwaaiing  $H$  gaat snel toenemen, veel sneller dan met  $V^2$  overeenkomt. Dit gaat door tot 18 meter (9 BEAUFORT), de verhouding  $H : V^2$  bereikt bij die windsnelheid haar maximum en gaat dan weer dalen. Dit verschijnsel wordt bij luchtsnelheden boven 20 meter per seconde steeds duidelijker. Jammer genoeg

#### OPWAAIING $H$ IN PROEFBAK.

lengte 1,75 m; diepte 19 cm.



was het niet mogelijk met een sterkeren wind dan 23 meter per seconde te werken, daar dan het spatwater een gevaar voor de luchtschroef gaat opleveren. Bij herhaling van de metingen is het van veel belang te trachten het verloop van  $H : V^2$  ook bij grootere waarden van  $V$  na te gaan. Men zal dan, door de golven aan de benedenwindsche zijde van den bak beter te breken, moeten trachten de hoeveelheid spatwater te verminderen.

Het verschijnsel is vooral van belang voor de bepaling van dijkhoogten op plaatsen waar de opwaaiing over een betrekkelijk klein gebied en gedurende korten tijd die hoogte bepaalt, zooals b.v. op het IJsselmeer zal voorkomen. Men kan dan op geringer opwaaiing rekenen dan uit formule (3) zou volgen.

Figuur 18.

Deze laboratoriumuitkomst vertoont een bevredigende overeenstemming met de krommen voor het verband tusschen windsterkte en opwaaiing, voor verschillende windrichting bij de onderzoekingen der Staatscommissie van den Rotterdamschen Waterweg verkregen (literatuuropgave n<sup>o</sup>. 14, bijlage 36). Aan de onzekerheid, zoowel van de windbepaling op zee als in de berekening van de opwaaiing uit de waarnemingen bij storm, mag het worden toegeschreven, dat de ombuiging bij groote windkracht bij sommige richtingen niet, bij andere sterker voor den dag kwam. Aan deze onzekerheid moet ook worden toegeschreven dat de waterstanden in Waddenzee en Zuiderzee geen antwoord kunnen geven op de vraag of de opwaaiingsconstante bij zeer hooge windsnelheden kleiner is dan anders. Wel wijzen de waarnemingen gedurende den zeer hevigen storm van 30/31 Januari 1877 sterk in deze richting.

Bij het profiel dat uit een diepe en een ondiepe strook bestaat bleek de opwaaiing aan de diepe zijde veel kleiner te zijn dan aan den ondiepen kant. Er is dus een merkbaar dwarsverhang noodig om de uitwisseling van water tusschen de beide gedeelten te veroorzaken. Het verhang in het diepe gedeelte was maar weinig grooter dan wanneer het geheele profiel de volle diepte heeft; dat aan de ondiepe zijde was ten opzichte van de opwaaiing in de kleinste diepte met bijna 30 % afgenomen. Gemiddeld komt dit neer op de opwaaiing die bij een diepte van 20 cm behoort, dus iets meer dan de gemiddelde diepte van het profiel (16 cm) maar minder dan de 23 cm, die later — § 61, formule (22) — voor de „opwaaiingsdiepte” zal worden gevonden. Zekerheid hierover kan men niet verkrijgen, daar het niet bekend is hoe het dwarsverval over de breedte van den bak is verdeeld.

De snelheidsmetingen hebben het resultaat opgeleverd dat er van werd verwacht: bij de enkelvoudige profielen gaat de bovenstroom met den wind mee, de onderstroom er tegen in. De krommen die aangeven hoe de stroomsterkte tusschen het oppervlak en den bodem verloopt vertoonen over het geheel den vorm dien zij moeten hebben, wanneer de beweging zich volgens de onderstellingen voor turbulente beweging van § 35 gedraagt; ook de numerieke waarden komen daar goed mee overeen. Bij de diepte van 30 centimeter is voor een windsnelheid van 16 à 17 meter, die een verhang van 1 : 1000 veroorzaakt, de oppervlaktestroom 10 cm per sec, de bodemstroom iets kleiner.

Bij het samengestelde profiel treedt in het ondiepe gedeelte ook aan den bodem de met den wind meegaande stroom op, de terugstrooming vindt geheel in het diepe gedeelte plaats. De teruggaande stroom neemt het diepe deel bijna geheel in beslag; alleen bij de oppervlakte is daar sprake van stroom met den wind mee.

Bij de metingen met dit samengestelde profiel was te zien dat de bodemstroom in het diepe gedeelte niet onmiddellijk tot stand kwam: eerst wanneer de opwaaiing was ontstaan kwam deze tegenstroom tot ontwikkeling.

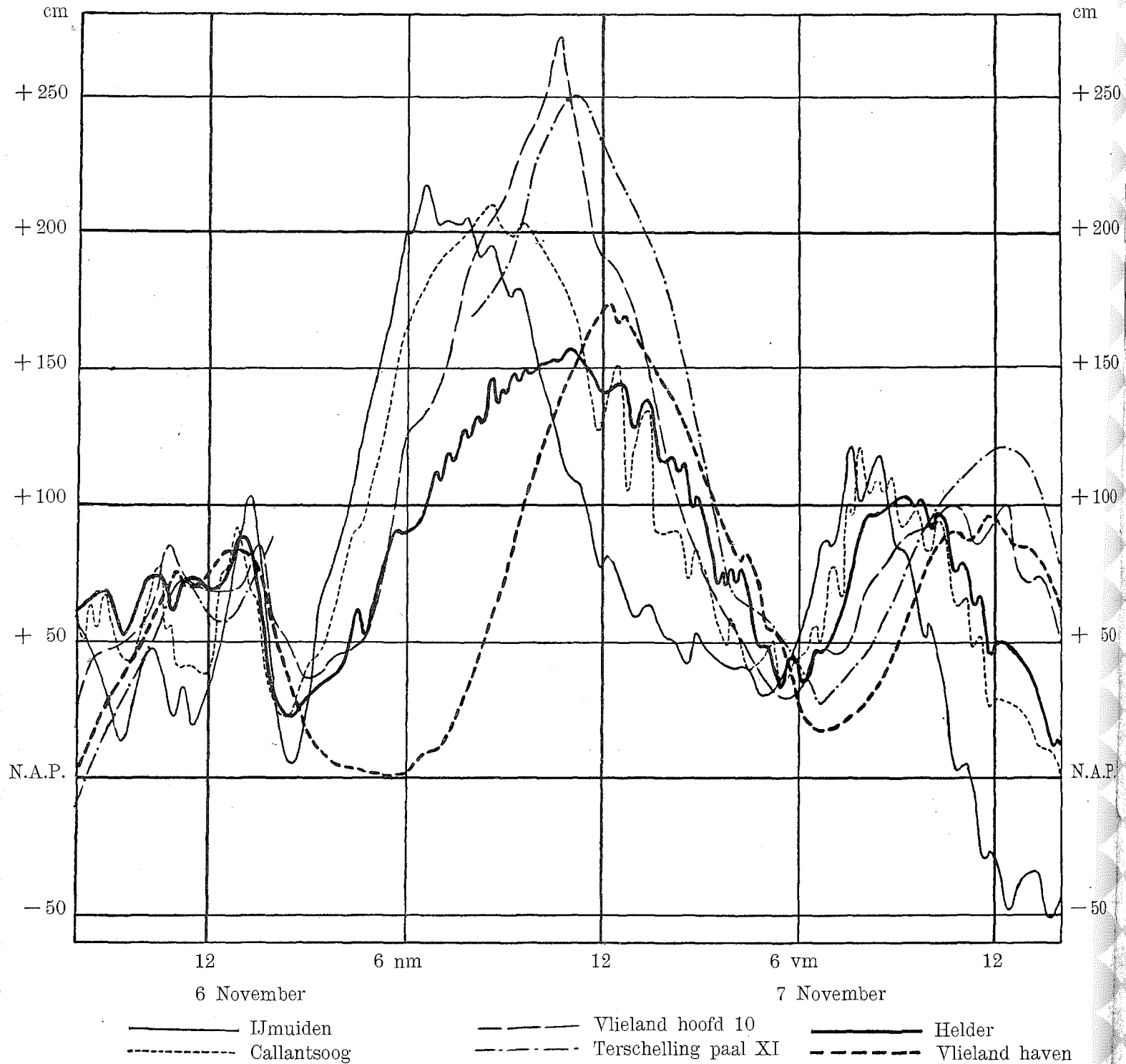
De studie van de golfbeweging in den proefbak is voor de Staatscommissie niet van belang. Uit de opgenomen film, waarvan een klein gedeelte in figuur 17 wordt weergegeven, kan men golfvorm, -snelheid en -lengte opmeten en nagaan hoe die grootheden van de windsnelheid afhangen.

§ 21. *De zeegaten.* Door den heer DE MURALT werd reeds in 1918 bij de behandeling van het wetsontwerp tot afsluiting en gedeeltelijke droogmaking der Zuiderzee in de Tweede Kamer der Staten-Generaal <sup>1)</sup> gewezen op de mogelijkheid dat door de aanwezigheid van de Zuiderzee de waterstanden bij stormvloed aan de peilschalen Helder en Vlieland aanmerkelijk lager blijven dan in de Noordzee buiten de zeegaten. Dit verschijnsel, dat wel de „afzuiging” in de zeegaten wordt genoemd, zou na de afsluiting der Zuiderzee vervallen, waardoor op de genoemde plaatsen de stormvloedstanden zouden stijgen. Een globale schatting van die verhooging was 30 centimeter.

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 10.

Zoolang men niet beschikte over peilschalen in de open zee was het niet mogelijk waarnemingen omtrent deze afzuiging te verzamelen. In § 18 is reeds vermeld dat aan de gewone peilschaal bij Petten bij storm geen betrouwbare aflezing kan worden verricht.

WATERSTANDEN BIJ DEN STORMVLOED VAN 6/7 NOVEMBER 1921.



Figuur 19.

De registreerende peilschaal te Callantsoog en de vloeipeilschalen op het Noordzeestrand van Vlieland en Terschelling hebben bij een tiental matige stormvloeden de standen buiten de zeegaten gegeven en daardoor het bewijs geleverd dat de afzuiging geregeld optreedt, soms zelfs in zeer hooge mate. In tabel 3 zijn de hoogste bereikte waterstanden verzameld.

De waterstand buiten het Texelsche zeegat zal gemiddeld ongeveer 40 cm hooger zijn opgelopen dan te Helder, voor het Vlie is het gemiddelde

TABEL 3.

| Datum van den storm.          | Hoogste waterstanden in cm boven N.A.P. |              |             |              |         |            |             |
|-------------------------------|---|--------------|-------------|--------------|---------|------------|-------------|
|                               | IJmuiden.                               | Callantsoog. | Vliet. str. | Tersch. str. | Helder. | Vliet. hv. | Tersch. hv. |
| 18/19 Januari 1921 . . . . .  | 226                                     | > 190        | > 210       | —            | 190     | 211        | 213         |
| 23/24 October 1921 . . . . .  | 188                                     | > 150        | —           | > 198        | 131     | 161        | 172         |
| 30 October 1921 . . . . .     | 175                                     | 154          | 127         | 181          | 120     | 138        | 141         |
| 1/2 November 1921 . . . . .   | 208                                     | 192          | 224         | 217          | 156     | 202        | 219         |
| 5 November 1921. . . . .      | 168                                     | 167          | 161         | > 183        | 126     | 138        | 146         |
| 6/7 November 1921 . . . . .   | 213                                     | 209          | 267         | 248          | 159     | 173        | 185         |
| 17/18 December 1921 . . . . . | 191                                     | 185          | 268         | 238          | 147     | 198        | 215         |
| 21 December 1921 . . . . .    | 234                                     | 226          | 253         | 248          | 173     | 216        | 226         |
| 29 December 1921 . . . . .    | 147                                     | —            | 188         | 183          | 127     | 140        | 148         |
| 31 December 1921 . . . . .    | 231                                     | —            | 241         | 248          | 178     | 205        | 217         |
| 2 Januari 1922. . . . .       | 196                                     | —            | 236         | 258          | 183     | 208        | 224         |

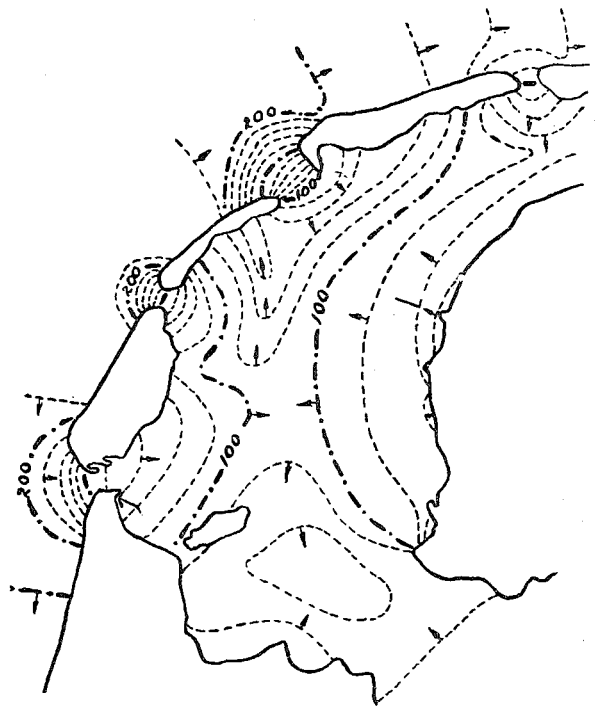
verschil 35 cm. Bij den storm van 6/7 November 1921, toen de vulling van de Waddenzee en Zuiderzee in een snel tempo geschiedde en dus een zeer sterke stroom door de zeegaten moet hebben geloopt, zijn deze getallen veel grooter, nl. 55 en 75 cm.

In figuur 19 ziet men de krommen van den waterstand op de zes stations; het kaartje figuur 20 geeft den toestand van 9 uur 's avonds, toen de niveauverschillen het grootst waren. De stroom was op dat oogenblik zeer sterk: tusschen 8 en 9 uur bedroeg de toeneming van de waterhoeveelheid in de Waddenzee 117 000 en in de Zuiderzee 150 000, samen 267 000 m<sup>3</sup> per sec. Uit de zeestanden en windrichting volgt dat er op dat oogenblik geen sprake kan zijn geweest van een beteekenenden stroom over het wad achter Terschelling naar de Waddenzee, zoodat deze geheele waterhoeveelheid door de Heldersche, Eierlandsche en Terschellingsche zeegaten moet zijn gekomen. Dat hiervoor groote niveauverschillen noodig waren wordt duidelijk als men in aanmerking neemt, dat het gebied van de afzuiging zich verscheidene kilometers buiten de eigenlijke zeegaten, op de buitengronden, uitstrekt.

Bij het Vlie bijvoorbeeld is het natte profiel op het nauwste gedeelte ongeveer 60 000 m<sup>2</sup> bij een waterstand van N.A.P. en 67 000 m<sup>2</sup> bij een één meter hooger waterstand. Een profiel ongeveer halverwege de buitengronden heeft bij N.A.P. een oppervlak van 80 000 m<sup>2</sup> en bij een stand van 1,50 m + N.A.P. van 95 000 m<sup>2</sup>. Langs den buitenrand van de gronden zijn de inhouden 100 000 m<sup>3</sup> bij N.A.P. en 130 000 m<sup>3</sup> bij een 1,75 m hooger stand.

Tot ruim 10 kilometer buiten de lijn waarin de peilschalen in de havens liggen komen dus nog groote stroomsnelheden voor, waarvoor een niet

WATERSTANDEN OP 6 NOV. 1921  
9 UUR NM.

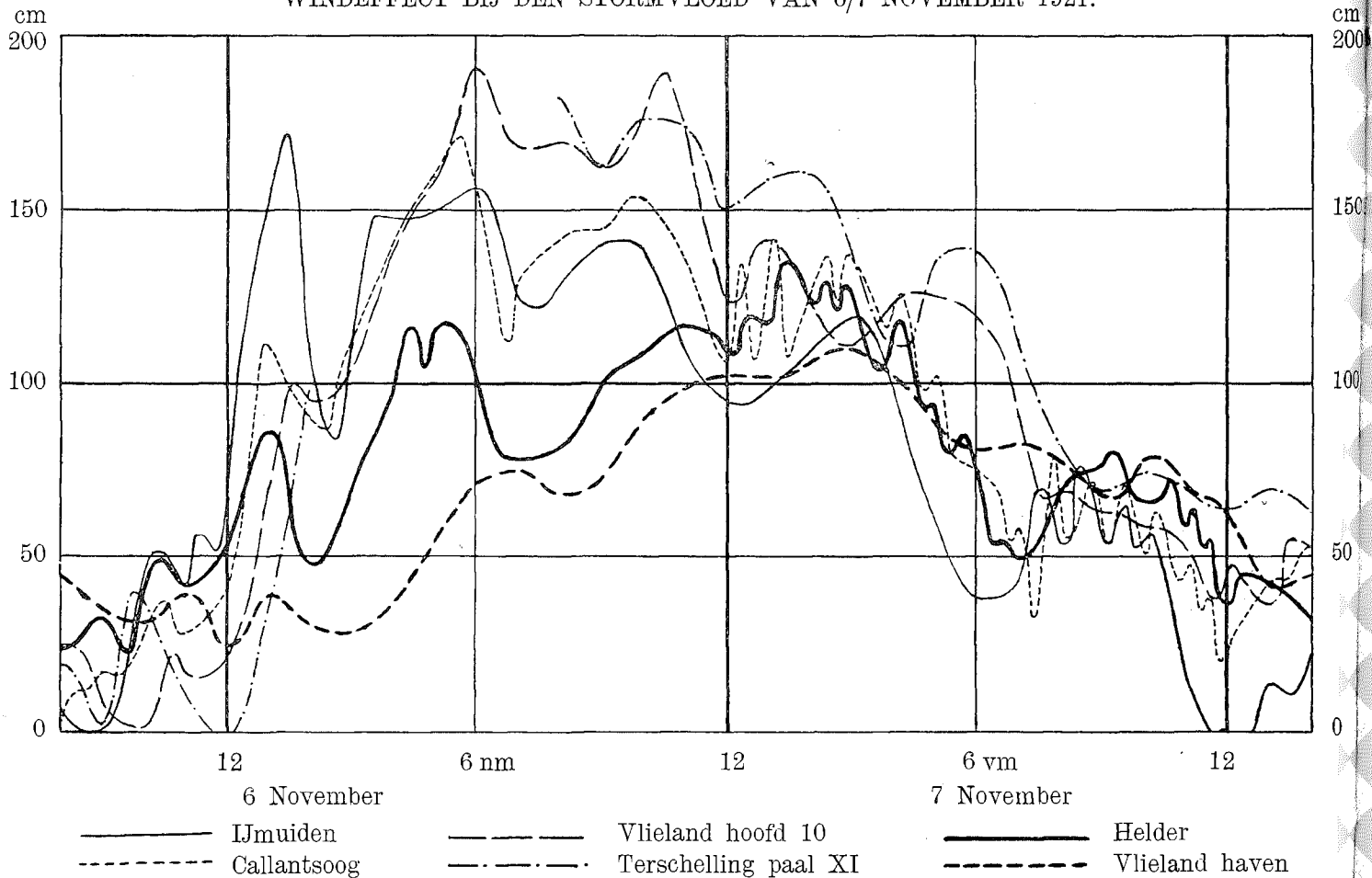


Figuur 20.

onbeteekenend verhang wordt vereischt. Uit de bekende dieptecijfers en met een constante  $C$  van  $485 \text{ cm}^{1/2}$  per sec kan worden berekend dat met de in figuur 20 gegeven waterstanden een stroom van  $130\,000 \text{ m}^3$  per sec door het Vlie overeenkomt. In werkelijkheid zal de stroom zwakker zijn geweest, daar de stroom op het beschouwde oogenblik aan het toenemen was, waardoor de term  $\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$  in (2) een deel van het verhang eischte. Brengt men dit in rekening, dan wordt de instroomende hoeveelheid  $120\,000 \text{ m}^3$  per sec.

Bij het voorgaande is geen rekening gehouden met de opwaaiing tusschen de lijn waarin de buitenpeilschalen zich bevinden en die waarin de binnenpeilschalen staan. Deze opwaaiing is niet groot en wordt bovendien vrijwel geheel gecompenseerd door locale afwaaiing bij de havens.

WINDEFFECT BIJ DEN STORMVLOED VAN 6/7 NOVEMBER 1921.



Figuur 21.

Ook voor het Hieldersche zeegat kan men een dergelijke berekening uitvoeren. Men moet daar nog rekening houden met de groote stroomsnelheid die in het profiel waarin de peilschaal Helder staat, heerscht. Deze peilschaal wijst daardoor te laag (§ 16; verg. ook §§ 34 en 108); men kan in dit geval aan 15 à 20 cm denken. De stroom wordt dan  $110\,000$  à  $115\,000 \text{ m}^3$  per sec, zoodat voor het Eierlandsche zeegat nog ruim  $30\,000 \text{ m}^3$  per sec overblijft, wat, gezien de onzekerheden in de berekening, een zeer bevredigende uitkomst is: men had  $20\,000$  à  $30\,000 \text{ m}^3$  kunnen verwachten.

Na het beschouwde oogenblik neemt het verval in de zeegaten snel af, zooals men in figuur 19 kan zien. Te middernacht is het in het Vlie nog 45 cm, in het Hieldersche zeegat slechts enkele centimeters. Omstreeks 1 uur is het daar gelijk water, in het Vlie is dat om halfdrie het geval.

Om twee uur is de toestand zoodanig dat het naar binnen gerichte verval in het Vlie ongeveer even groot is als het verval in de richting van de Noordzee in het Texelsche zeegat; hiermede in goede overeenstemming

is het feit dat een half uur later Waddenzee en Zuiderzee te zamen het grootste volume water hebben bevat.

In verband met het boven besprokene is ook het windeffect in de Noordzee veel grooter dan binnen (figuur 21). De grootste waarden waren 6/7 November 1921 in centimeters: IJmuiden 171, Callantsoog 171, Vlieland-buiten 193, Terschelling-buiten meer dan 183; daarentegen Helder 134, Vlieland-haven 110 en Terschelling-haven 121. Het verloop van het windeffect is op de Noordzeestations onderling ongeveer gelijk, waaruit men kan besluiten dat bij de waarnemingen geen groote fouten zijn gemaakt. Opvallend is het zeer snel toenemen van het effect bij het plotseling doorkomen van den storm en de daarop volgende vermindering te IJmuiden en Callantsoog (zie ook § 59). Dat het windeffect in de haven van Vlieland zooveel kleiner was dan in die van Terschelling zal moeten worden verklaard door de sterke afwaaiing op de eerstgenoemde plaats over de ondiepe Waardgronden; hiermee is in overeenstemming dat het bedoelde verschil bij het begin van den storm, toen de waterdiepten nog klein waren, het grootst was.

Uit den aard der zaak is het bepalen van de tijdens stormvloed voorkomende stroomen nog veel moeilijker dan het meten van de waterstanden. Stroommetingen in de Waddenzee zijn dan ook niet uitgevoerd. Echter is een poging gedaan om bij stormvloed stroomsnelheden in het Heldersche zeegat te meten. Een mijnlichaam, zoodanig geballast dat het diep in het water lag en dus weinig door den wind werd beïnvloed, werd losgelaten. Door op een stoomboot, die de mijn zou volgen, geregeld plaatsbepalingen uit te voeren, kon de weg van den drijver op een kaart worden uitgezet, zoodat de stroomsnelheid was te berekenen.

Het is niet gelukt een geval van sterke instrooming te meten, voornamelijk omdat de plaatsbepaling dan meestal door slecht zicht of duisternis niet was uit te voeren. Een aantal drijvingen gedurende en na een hoogen, echter niet bijzonder hoogen, stand op 11 en 12 Januari 1921 gaf een maximum stroomsnelheid van 220 centimeter per seconde.

§ 22. *De stroom achter Ameland.* Reeds bij het begin der werkzaamheden was het de vraag of, zooals de heer MANSHOLT <sup>1)</sup> meende, wegens de lage waterstanden in de Zuiderzee bij stormvloed een sterke stroom over het Amelandsche Wad in westwaartsche richting kan gaan.

Allereerst zocht men het antwoord op deze vraag in de configuratie van den bodem van het Amelandsche Wad. Een daarvoor ingestelde sub-commissie, waarvan de heer GOCKINGA voorzitter was, ging na of er verband kon bestaan tusschen het al of niet optreden van den bedoelden stroom en het feit dat in het Amelandsche Wad geen doorlopende geulen voorkomen. Wanneer immers een nu en dan voorkomende stroom een diepe geul zou vormen mocht men uit het ontbreken van zulk een geul concludeeren dat de stroom niet bestaat.

Dat een stroom die alleen bij stormvloed voorkomt een geul vormt kon echter niet worden aangetoond. Er kon in de Waddenzee geen enkele geul worden gevonden, waarvan het ontstaan uitsluitend aan stormvloeden kan worden toegeschreven. De getijbeweging is voldoende om van de vorming van alle bestaande geulen rekenschap te geven.

Wel kan het voorkomen dat bij stormvloed een wijziging in het geulenstelsel optreedt, maar een dergelijke wijziging is dan door het gewone getij voorbereid. Een voorbeeld hiervan is de Vliesloot.

Een plaats waar zeer waarschijnlijk alleen bij storm sterke stroomen loopen is het bankencomplex tusschen het Foksdiep en den Texelstroom. Daar komt evenmin als achter Ameland een doorlopende geul voor.

Mocht zich al eens een dergelijke geul vormen, dan bestaat nog de mogelijkheid dat zij weder verzandt vóór zij bij hydrografische opnemingen is gevonden.

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 6.

Uit de bodemgesteldheid achter Ameland is dus geen besluit te trekken omtrent den door den heer MANSHOLT genoemden stroom. Men is er daarom toe overgegaan bij storm achter Ameland drijvers los te laten met het doel om den stroom rechtstreeks te constateeren. Hiervoor werd door de Directie Friesland en Drenthe van den Rijkswaterstaat gebruik gemaakt van den veerdienst tusschen Holwerd en Ameland. Telkens wanneer bij noordwestenwind een hooge waterstand voorkwam werden door de veerboot bij hoogwater in verschillende gaten van den ouden verbindingsdam drijvers uitgezet. Daarvoor werden gebruikt houten blokken, flesschen en stellen van twee aan elkander verbonden flesschen, waarvan de eene was geballast en daardoor enkele meters diep onder water bleef (dubbele fleshdrijvers).

De drijving is viermaal uitgevoerd, nl. 30 Juli, 23 October en 31 December 1921 en 10 Maart 1926. Het totale aantal der drijvers was 55, daarvan zijn er 18 niet teruggevonden. Van de overige is één aangespoeld bij Blija, 20 aan de Friesche kust oostelijk van Holwerd, 5 aan de Groningsche kust, één is blijven steken in den verbindingsdam naar Ameland, 3 zijn gevonden op de Engelsmanplaat, 1 op Schiermonnikoog, 4 op Borkum en 1 op Juist, terwijl de laatste in de nabijheid van Helgoland is opgevischt.

Er is dus maar één drijver westwaarts gegaan en nog niet eens ver, ofschoon eenige malen de omstandigheden voor het ontstaan van een stroom in de richting van de Zuiderzee gunstig waren.

Men mag derhalve wel aannemen dat de stroom in den regel niet voorkomt. Toch is het niet uitgesloten dat het een enkelen keer wel eens gebeurt; zoo waren bij den stormvloed van 12/13 Maart 1906 de omstandigheden nog gunstiger dan op 10 Maart 1926, voornamelijk door de zeer hooge standen bij de Lauwerszee. Daarom is bij de in hoofdstuk VI uitgevoerde berekeningen met de mogelijkheid van een stroom in westelijke richting achter Ameland wel rekening gehouden.

§ 23. *De golfoploop.* Omtrent den golfoploop zijn door de Staatscommissie geen waarnemingen verricht omdat de dienst der Zuiderzeewerken dit punt voldoende heeft onderzocht. Deze onderzoekingen worden beschreven in hoofdstuk VIII.

---

## V. DE VOORNAAMSTE STORMVLOEDEN EN HUN OORZAKEN.

§ 24. *Inleiding.* Zooals ook elders wordt uiteengezet, ontstaat in het algemeen een stormvloed door samenwerken van een getij met een verhooging van den waterstand door windinvloed. Van deze beide factoren vertoont de windinvloed de grootste variatie: bij een station als Harlingen varieert het astronomische hoogwater tusschen 90 en 15 cm + N.A.P., terwijl de stormvloeden die hier beschouwd zullen worden van 293 tot 65 cm + N.A.P. variëren waarbij de windinvloed in het eene geval ongeveer 250, in het andere 20 cm bedroeg.

Wil men den invloed van de afsluiting der Zuiderzee op toekomstige stormvloeden nagaan, dan is het noodig daarbij op de beide hoofdfactoren te letten. Wat het getij betreft levert de harmonische analyse het middel om het getij zooals het onder normale omstandigheden zou zijn opgetreden nauwkeurig te berekenen (§ 41); behalve de hoogte van het hoogwater speelt ook de tijd gedurende welken de hoogte nabij het maximum bleef (de vorm van den vloedkop) een rol en zal het voorafgaande laagwater vooral op de Zuiderzeestanden van invloed kunnen zijn.

Onder de abnormale omstandigheden gedurende den stormvloed wordt op sommige punten de amplitude der getijden vergroot, hun phase gewijzigd (§ 11). Met beide omstandigheden moet rekening worden gehouden wanneer men uit de waarnemingen den windinvloed wil afleiden.

Waar bij de door volkomen berekenbare krachten veroorzaakte getijden reeds zooveel variatie voorkomt, is het geen wonder dat de invloed der stormen, wier oorzaken gedeeltelijk aan berekening ontsnappen, die bovendien behalve een verschil in kracht ook groot verschil in richting vertoonen, nog aanzienlijk grooter variatie vertoont. Indien dus hier enkele typen worden opgesteld, bedenke men wel dat ongeveer alle overgangen tusschen deze typen kunnen voorkomen of voorgekomen zijn.

Het gevaarlijkste type is de noordwester-storm, als hij voorafgegaan wordt door een dagenlange periode van zuidwester- en wester-stormen zonder belangrijke pauzen en gevolgd wordt door een gedurende verscheidene dagen voortdurende barometerstijging, verband houdende met een uitgebreid gebied van hooge luchtdrukking. In de eerste plaats is dan door de zuidwesten- en westenwindperiode het niveau van den Atlantischen Oceaan aan de Europeesche kust en van de Noordzee reeds belangrijk verhoogd, vóór dat de noordwestenwind optreedt, terwijl gewoonlijk de noordwestenwind zich niet zoover naar het Zuiden uitstrekt, dat belangrijke afvoer door het Kanaal mogelijk wordt. De groote breedte van het noordwestenwind-gebied, dat bij deze drukverdeeling past, maakt dat het geheele Noordzeegebied een verhoogd niveau krijgt en behoudt, terwijl de noordelijke herkomst der op de Noordzee waaiende winden een afkoeling in hoogere lagen meebrengt die medehelpt om abnormaal krachtige stormen te doen ontstaan.

Wegens voorgeschiedenis en breedte van het noordwestenwind-gebied is er een belangrijk verwijderd windeffect <sup>1)</sup>, wegens de kracht dezer noordwester-stormen een belangrijk kusteffect, en vanzelf zijn dergelijke stormen ook lang van duur, zoodat ook in een uitgebreide binnenzee als de Waddenzee de evenwichtstoestand vrijwel bereikt kan worden.

<sup>1)</sup> Brochure GALLÉ (literatuuropgave n<sup>o</sup>. 7).

Minder gevaarlijk zijn de korter durende noordwester-stormen die door een enkele diepe depressie met een naar het ZO gerichte baan, zooals die vooral in den herfst voorkomen, worden veroorzaakt. Het verwijderde effect is hier om verschillende redenen van minder beteekenis, de duur is korter en ten slotte kan bij het voorbij NW ruïnen van den wind afvloeiing door het Kanaal optreden, zoodat vooral bij de Waddeneilanden een aanmerkelijke daling van het niveau na de ruiming optreedt. Alleen voor de kom der Zuiderzee, inzonderheid het zuidelijk gedeelte, kan de meer noordelijke wind aanleiding worden voor belangrijke opwaaiing, nadat eerst bij noordwestenwind een sterke stroom die kom introk.

Het minst gevaarlijk zijn de zeer lokale stormen wier centrum over ons land trekt, zoodat over de Waddeneilanden zelfs oostelijke winden optreden. Deze kunnen alleen in de Zeeuwsche wateren tot buitengewone verhooging leiden.

De kennis, niet alleen van den wind op zeker oogenblik, maar ook van de voorgeschiedenis van den storm en van het karakter van het getij, is van belang omdat het deze gegevens zijn, die den stroom naar de Zuiderzee bepalen. Deze stroom heeft een verlagenden invloed op de waterstanden aan de Friesche kust <sup>1)</sup> en hij is het in de eerste plaats die een punt van onderzoek voor de Staatscommissie heeft uitgemaakt.

Ongelukkigerwijze is het moeilijk juist hieromtrent nauwkeurige gegevens te verkrijgen: voldoende zekerheid heeft men alleen voor de stormen die na 1880 zijn voorgekomen. Vóór dien tijd was het aantal registreerende peilschalen in de Zuiderzee nog zeer gering waardoor men alleen met groote onzekerheid tot den gemiddelden Zuiderzeestand op een bepaald oogenblik kan besluiten <sup>2)</sup>.

Bij de stormen tusschen 1820 en 1880 zal men zich dan ook veelal moeten bepalen tot het verkrijgen van een indruk of de vulling van de Zuiderzee langzaam of vlug is geweest. De weinige bekende waterstanden stellen ons daar meestal wel toe in staat, maar het is in den regel uitgesloten een numerieke waarde te verkrijgen voor den stroom die naar de Zuiderzee heeft geloopt.

Van de stroomen bij nog oudere stormen is in het geheel niets bekend, want eerst in het begin van de negentiende eeuw is men, hoewel aanvankelijk op bescheiden schaal, begonnen met systematische peilschaalwaarnemingen, terwijl ook de eerste omvangrijke waterpassingen in dien tijd zijn uitgevoerd. Daaraan is het te danken dat men voor den uiterst belangrijken stormvloed van Februari 1825 over betrekkelijk veel gegevens beschikt. Uit vroegere tijden is slechts zeer weinig bekend en dan nog maar alleen over de allerswaarste vloeden. De standen zijn voor die stormen opgegeven ten opzichte van een of ander plaatselijk peil, zooals dijkskruin of noodpeil, waarvan de hoogteligging thans in den regel niet meer is na te gaan. Ook de maat waarin de standen zijn uitgedrukt is niet altijd gelijk: er waren voeten en duimen van zeer verschillende lengte in gebruik.

Een studie van die oudere stormen is gemaakt door den hoofdingenieur van den Rijkswaterstaat Ir. D. A. VAN HEIJST <sup>3)</sup>. Daaruit blijkt, al zijn de gegevens uiterst onvolledig, dat de waterstanden vermoedelijk bij geen enkelen storm in beteekenende mate hooger zijn geweest dan bij den stormvloed van 3/4 Februari 1825.

Ook met de gegevens omtrent de windsterkte kan men niet ver teruggaan zonder in groote onzekerheid te komen. Geregelde waarnemingen beginnen eerst in 1849 te Utrecht en hadden geregeld aan het in 1854

<sup>1)</sup> Proefschrift LELY (literatuuropgave n°. 11).

<sup>2)</sup> Het feit dat de af te sluiten Zuiderzee ongeveer 360 000 hectaren groot is maakt het gemakkelijk uit de voor twee opeenvolgende uren berekende gemiddelde Zuiderzeestanden den stroom af te leiden. Elke centimeter stijging komt namelijk overeen met een stroom van 10 000 m<sup>3</sup> per seconde (zie echter § 114, d).

<sup>3)</sup> Literatuuropgave n°. 15.

TABEL 4. Windrichting (rechtwijzend), windsterkte (graden Beaufort) en hoogste waterstanden (cm + N.A.P.) bij eenige stormvloeden.

| Datum van den stormvloed.                         |                                    | 3/5 Februari 1825. | 1/2 Januari 1855. | 20/21 December 1862. | 20/21 Januari 1863. | 3/4 December 1863. | 30/31 Januari 1877. | 14/15 October 1881. | 12/13 December 1883. | 22/23 December 1894. | 5/8 December 1895. | 28 Januari 1901. | 12/13 Maart 1906. | 30 September/<br>1 October 1911. | 13/14 Januari 1916. | 2/3 December 1917. | 6/7 November 1921. | 30/31 Augustus 1923. | 9/10 Maart 1926. |
|---|------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------|
| WIND TE HELDER.                                   |                                    |                    |                   |                      |                     |                    |                     |                     |                      |                      |                    |                  |                   |                                  |                     |                    |                    |                      |                  |
| Richting 8 uur voor hoogwater Waddenzee . . . . . | NWtW                               | NWtW               | WtN               | WtZ                  | WtN                 | WtZ                | WZW                 | WNW                 | NWtW                 | WtN                  | West               | NW               | Noord             | WtN                              | West                | NW                 | ZW                 | NW                   |                  |
| Richting tijdens hoogwater Waddenzee . . . . .    | NWtW                               | NW                 | WNW               | West                 | WNW                 | WNW                | WtN                 | NW                  | NWtW                 | WNW                  | West               | NW               | Noord             | West                             | West                | NW                 | West               | NNW                  |                  |
| Sterkte tijdens hoogwater Waddenzee . . . . .     | 8?                                 | 10—11              | 11                | 11—12                | 12                  | 12                 | 12                  | 12                  | 8                    | 10                   | 10                 | 8                | 8                 | 10                               | 10                  | 10                 | 10                 | 10                   | 10               |
| Aantal uren met sterkte van 9 en meer . . . . .   | 48?                                | 32                 | 36                | 40                   | 24                  | 21                 | 28                  | 22                  | 13                   | 60                   | 8                  | 5                | 7                 | 16                               | 19                  | 16                 | 13                 | 24                   |                  |
| HOOGSTE WATERSTANDEN.                             |                                    |                    |                   |                      |                     |                    |                     |                     |                      |                      |                    |                  |                   |                                  |                     |                    |                    |                      |                  |
| Noordzee en zeegaten.                             | Katwijk . . . . .                  | 369                | 343               | 293                  | 273                 | 243                | 265                 | 263                 | 265                  | 343                  | 261                | 237              | 324               | 247                              | 250                 | 300                | 300                | 170                  | 234              |
|   | IJmuiden, haven . . . . .          | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | 285                  | —                    | 247                | 224              | 320               | 167                              | 291                 | 306                | 213                | 127                  | 178              |
|   | IJmuiden, sluizen . . . . .        | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | 320                  | 368                  | 280                | 224              | 324               | 190                              | 292                 | 295                | 254                | —                    | 180              |
|   | Callantsoog . . . . .              | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | —                    | —                    | —                  | —                | —                 | —                                | —                   | —                  | 209                | —                    | —                |
|   | Helder . . . . .                   | —                  | 213               | 226                  | 203                 | 215                | 204                 | 198                 | 213                  | 248                  | 220                | 188              | 204               | 96                               | —                   | 218                | 159                | 112                  | 146              |
|   | Nieuwediep . . . . .               | 247                | 212               | 207                  | 197                 | 202                | 207                 | 199                 | 215                  | 260                  | 217                | 182              | 212               | 87                               | 212                 | 212                | 157                | —                    | —                |
|   | Oude Schild . . . . .              | 245                | —                 | 220                  | 200                 | 197                | 211                 | 195                 | 205                  | 254                  | 205                | 192              | 213               | —                                | 205                 | 209                | 157                | 115                  | 158              |
|   | Vlieland, strandh. 10 . . . . .    | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | —                    | —                    | —                  | —                | —                 | —                                | —                   | —                  | 267                | —                    | —                |
|   | Terschelling, str.pl. XI . . . . . | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | —                    | —                    | —                  | —                | —                 | —                                | —                   | —                  | 248                | —                    | —                |
|   | Vlieland, haven . . . . .          | 284                | 274               | 249                  | 269                 | 194                | 219                 | 204                 | 232                  | 287                  | 231                | 218              | 256               | 52                               | 221                 | 224                | 173                | 167                  | 158              |
| Terschelling, haven . . . . .                     | 295                                | 260                | 275               | 255                  | 222                 | 237                | 225                 | 243                 | 286                  | 238                  | 235                | 275              | 55                | 233                              | 234                 | 185                | 171                | 177                  |                  |
| Noordkust van Friesland en Groningen.             | (Nieuw) Statenzijl . . . . .       | 509                | 474               | 394                  | 409                 | 489                | 541                 | 398                 | 413                  | 427                  | 379                | 531              | 516               | 149                              | 506                 | 443                | 286                | 259                  | 320              |
|   | Delfzijl . . . . .                 | 460                | 405               | 350                  | 362                 | 410                | 426                 | 381                 | —                    | 385                  | 354                | 453              | 451               | 140                              | 432                 | 382                | 274                | 229                  | 272              |
|   | Zoutkamp . . . . .                 | 445                | 395               | 340                  | 345                 | 385                | 433                 | 379                 | 411                  | 371                  | 364                | 388              | 424               | 150                              | 396                 | 385                | 288                | 229                  | 307              |
|   | Ezumazijl . . . . .                | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | 383                 | 313                 | 375                  | 359                  | 322                | 355              | 415               | —                                | 360                 | 358                | 270                | 194                  | 286              |
|   | Nieuw Bildt . . . . .              | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | 391                 | 322                 | 311                  | —                    | —                  | 311              | —                 | —                                | 290                 | —                  | 238                | 195                  | —                |
| Westkust van Friesland.                           | Roptazijl . . . . .                | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | 307                  | 295                  | 298                | 318              | 74                | 286                              | 280                 | 230                | 211                | 226                  |                  |
|   | Harlingen . . . . .                | 293                | 263               | 273                  | 278                 | 268                | 288                 | 252                 | 274                  | 271                  | 269                | 259              | 275               | 65                               | 273                 | 272                | 225                | 193                  | 218              |
|   | Zurig . . . . .                    | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | —                    | —                    | —                  | —                | —                 | —                                | —                   | —                  | 227                | —                    | —                |
|   | Makkum . . . . .                   | 280                | 226               | 256                  | 256                 | 231                | 260                 | —                   | 242                  | 251                  | 260                | 228              | 230               | —                                | 222                 | 230                | 182                | 173                  | —                |
|   | Piaam . . . . .                    | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | —                    | —                    | —                  | —                | —                 | —                                | —                   | —                  | 198                | —                    | —                |
|   | Workum . . . . .                   | 309                | 224               | 284                  | 264                 | 254                | 264                 | —                   | —                    | 229                  | 251                | —                | —                 | —                                | 230                 | 225                | —                  | —                    | —                |
|   | Hindeloopen . . . . .              | 283                | 211               | 241                  | 211                 | 231                | 238                 | 218                 | 238                  | 243                  | 242                | 210              | 236               | 78                               | 220                 | 220                | 183                | 134                  | 184              |
|   | Molkwerum . . . . .                | —                  | 219               | 241                  | 219                 | 217                | 253                 | 225                 | 225                  | 229                  | 247                | —                | 240               | 70                               | 230                 | 190                | 185                | —                    | —                |
| Stavoren . . . . .                                | 239                                | 204                | 202               | 208                  | 204                 | 227                | 223                 | 198                 | 204                  | 225                  | 185                | 179              | 77                | 213                              | 203                 | 160                | 98                 | 160                  |                  |
| Kust van Noordholland.                            | van Ewijcksluis . . . . .          | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | 224                 | 247                  | 220                  | —                  | 215              | —                 | 232                              | 210                 | 162                | 85                 | 160                  |                  |
|   | Westerland . . . . .               | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | —                    | —                    | —                  | —                | —                 | —                                | —                   | 158                | 85                 | 195                  |                  |
|   | den Oever . . . . .                | 235                | 194               | 201                  | 194                 | 192                | 214                 | 187                 | 179                  | 233                  | 209                | 176              | 200               | 64                               | 211                 | 215                | 169                | 100                  | 178              |
|   | Medemblik . . . . .                | 277                | 227               | 220                  | 197                 | 202                | 252                 | 206                 | 211                  | 255                  | 233                | 176              | 225               | 94                               | 235                 | 205                | 184                | 95                   | 174              |
| Enkhuizen . . . . .                               | 241                                | —                  | 211               | 191                  | 211                 | 227                | 223                 | 226                 | 213                  | 228                  | 170                | 177              | 94                | 241                              | 221                 | 191                | 88                 | 186                  |                  |
| Kom der Zuiderzee.                                | Urk . . . . .                      | 283                | 233               | 235                  | 224                 | 237                | 238                 | 251                 | 247                  | 223                  | 241                | 195              | 208               | 102                              | 263                 | 244                | 211                | 91                   | 188              |
|   | Kraggenburg . . . . .              | (305)              | 244               | 279                  | 294                 | —                  | 264                 | 277                 | 273                  | 236                  | 283                | 222              | 231               | 115                              | 274                 | 263                | 224                | 121                  | 216              |
|   | Elburg . . . . .                   | 323                | 242               | —                    | 240                 | 270                | 302                 | 274                 | 297                  | 237                  | 282                | 229              | 249               | 133                              | 308                 | 290                | 268                | 94                   | 242              |
|   | Nijkerk . . . . .                  | —                  | 330               | 306                  | 266                 | —                  | 290                 | 260                 | 277                  | 240                  | 285                | 209              | 227               | 169                              | 325                 | 290                | 295                | 87                   | 240              |
|   | Oranjesluizen . . . . .            | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | —                   | —                   | 262                  | 235                  | 261                | 187              | 202               | 121                              | 284                 | 249                | 258                | 71                   | 226              |
|   | Durgerdam . . . . .                | —                  | —                 | —                    | —                   | —                  | 247                 | 218                 | 251                  | 221                  | 203                | 144              | 210               | 130                              | —                   | —                  | —                  | —                    | —                |
|   | Hoorn . . . . .                    | 267                | 215               | 200                  | 180                 | 215                | 231                 | 212                 | 236                  | 225                  | 252                | 183              | 189               | 110                              | 263                 | 229                | 236                | —                    | 148              |

Vetgedrukte getallen hebben betrekking op den hoogst bekenden waterstand op elke plaats.

opgerichte Meteorologisch Instituut en aan de kort daarna tot stand gekomen hoofdstations plaats. Door die onafgebroken voortgezette waarnemingen is een schat van uitkomsten verkregen, die voor het onderzoek der Staatscommissie van het grootste belang is geweest.

Al mogen niet alle vroegere windwaarnemingen met de tegenwoordige goed vergelijkbaar zijn, dit is wel het geval met die welke te Helder verricht zijn. Hier is van den aanvang af eenzelfde winddrukmeter in dienst geweest, wiens schaalwaarde in 1903 nog juist bleek te zijn, zoodat uit de bewaard gebleven diagrammen, naar de tegenwoordige opvattingen uitgetrokken, betrouwbare waarden voor de windsnelheid en zeer nauwkeurige gegevens omtrent de windrichting konden worden afgeleid. Bovendien staan sinds 1859 waarnemingen van het lichtschip Noord-Hinder ter beschikking.

In verband met een en ander is het overzicht van de stormvloeden in de volgende § alleen uitgestrekt over de ruim 100 jaar tusschen 1824 en 1926. Het omvat alle in dit tijdperk voorgekomen stormen die om een of andere reden voor het onderzoek van belang zijn, met uitsluiting van alle andere <sup>1)</sup>.

§ 25. *Kort overzicht van de in de periode 1824—1926 voorgekomen zware stormvloeden.* De gegevens van deze stormen kan men in hoofdzaak vinden in de Stormvloedverslagen en de Verslagen over de openbare werken <sup>2)</sup>, beide uitgegeven door het Departement van Waterstaat. In de periode van 1825—1855 zijn de gegevens uiterst spaarzaam; het is mogelijk dat een of andere eenigszins belangrijke storm aan het onderzoek is ontsnapt, hoewel een zeer zware stormvloed in dat tijdvak zeker niet is voorgekomen.

Tabel 4 bevat de waterstanden die op een aantal plaatsen zijn voorgekomen bij die stormen, welke om een of andere reden belangrijk zijn. Dit zijn in de eerste plaats alle stormen, waarbij de waterstand te Harlingen boven het peil van 250 cm + N.A.P. is gestegen, verder, ter vergelijking, eenige minder hooge stormvloeden uit den laatsten tijd, waarvoor de waarnemingen vollediger waren. Ten slotte zijn nog opgenomen de standen van den zeer abnormalen storm van 30 September/1 October 1911 (ofschoon ze niet hoog waren), van een zeer hoogen zomerstorm en van een stormvloed die na de afsluiting van het Amsteldiep is voorgekomen. Een nadere beschouwing van deze stormen leert het volgende.

3/5 Februari 1825. Sterk ontwikkeld springtij. Diep, langzaam voortbewegend depressiecentrum over de Noordzee even ten noorden van de Waddeneilanden; daardoor zeer langdurige, doch niet buitengewoon zware storm uit WNW tot NW <sup>3)</sup>. Noordzeestanden vermoedelijk zeer hoog. Door voorafgaande depressies was de Zuiderzee reeds vrij sterk opgezet; dit, gecombineerd met den niet ver geruimden en niet bijzonder sterken wind, dus betrekkelijk kleinen naar de Zuiderzee gericht component, geeft een niet zeer snelle vulling van de Zuiderzee. Deze komt door den langen duur van den storm ten slotte op een zeer hoog peil: op een groot aantal plaatsen is een waterstand voorgekomen, die sindsdien niet meer is bereikt.

Ook de in de Waddenzee bereikte standen zijn zeer hoog geweest; dit moet in verband hebben gestaan met den betrekkelijk zwakken stroom naar de Zuiderzee, waardoor de verlagende invloed daarvan op de Waddenzeestanden niet groot kan zijn geweest.

Het belangrijkste kenmerk van dezen storm is dus zijn lange duur, terwijl het feit dat het springtij was de standen nog verhoogde.

Men kan met groote zekerheid zeggen, dat op bijna alle plaatsen de waterstanden bij afgesloten Zuiderzee minder hoog zouden zijn opgelopen dan bij den storm van 22/23 December 1894 het geval zou zijn geweest.

<sup>1)</sup> Bij de niet opgenomen stormen behoort o. a. die van 25/26 November 1925, waarbij een zeer groote golfoploop tegen sommige dijken voorkwam (noot bij § 162).

<sup>2)</sup> Literatuuropgave n<sup>os</sup>. 12 en 13.

<sup>3)</sup> „ „ n<sup>os</sup>. 15 en 17.

De Noordzeestanden immers waren in het westelijk gedeelte iets lager dan bij dien storm en de wind, die ongeveer dezelfde richting had, zal in beide gevallen vrijwel even sterk zijn geweest.

Alleen in het Noordoosten waren in 1825 de Noordzeestanden hooger dan in 1894, wat door Duitsche waarnemingen wordt bevestigd. In dit gebied, voorbij de lijn Terschelling—Roptazijl, zullen de hoogste standen, ook bij afgesloten Zuiderzee, bij den storm van 1825 behooren.

*1/2 Januari 1855.* Van dezen storm, die bij springtij voorkwam, zijn de minste gegevens voorhanden. De wind, die te Helder slechts enkele uren orkaankracht bereikte, was aanvankelijk West tot NW. Zoo bleef de windrichting tot eenige uren nadat in de Waddenzee de hoogste waterstanden waren voorgekomen; daarna ruimde de wind nog meer, tot voorbij NNW. Het gevolg daarvan was dat bij het volgende hoogwater, dat in de Waddenzee maar weinig lager was, de Zuiderzee hoog kon oploopen. Vooral in het Zuiden werden hooge standen waargenomen: te Nijkerk de hoogst bekende.

Zeer snel zal de vulling niet geweest zijn: zij heeft een vrij langen tijd in beslag genomen en is ook niet bevorderd door een bijzonder hooge Waddenzee. Met het oog op de vrij lage standen in de Waddenzee mag met gerustheid besloten worden dat deze storm zeker niet bij afgesloten Zuiderzee in de Waddenzee de allerhoogste standen zou hebben gegeven.

*20/21 December 1862.* Vrij hooge astronomische standen (middenstand, 3 dagen vóór springtij). Niet zeer harde wind, lange duur, niet verder geruimd dan WNW. De Noordzeestanden, hoewel tamelijk hoog, bleven verscheidene decimeters onder die van 1825. De Zuiderzee, die op 19 December reeds vrij hoog stond, liep, ook in verband met den betrekkelijk kleinen windcomponent daarheen, vrij langzaam op, zoodat de stroom niet sterk kan zijn geweest. De hoogste stand in de Zuiderzee werd eerst op den 21<sup>sten</sup> December bereikt, toen de wind bij kracht 10 à 11 tot NW was geruimd.

*20/21 Januari 1863.* Hooge astronomische standen: het tij van 21 Januari was een hoog springtij. De storm werd veroorzaakt door twee opeenvolgende depressies. De eerste bracht op 19 Januari stormachtigen westnoordwestenwind; de tweede depressie deed den wind in den nacht tot ZW krimpen en gaf 20 Januari een harden storm (3 uur windkracht 12) uit het Westen tot WtN. Deze storm stond met weinig verminderde kracht door tot den morgen van 21 Januari.

De Noordzeestanden zijn iets lager geweest dan een maand te voren; het gemiddelde peil in de Zuiderzee zal ongeveer hetzelfde zijn geweest. Door den harden westenwind liep het water bij de IJsselmonden zeer hoog op; de stand te Kraggenburg is de hoogste aldaar bekende, al zal hij in 1825 eenigszins zijn overtroffen. De westkant daarentegen was laag.

Deze typische westenwind-stormvloed heeft geen sterken stroom naar de Zuiderzee veroorzaakt, mede door het feit dat die zee te voren reeds hoog was opgezet. De Zuiderzee-invloed op de Friesche kust was dan ook niet groot, waaraan de daar bereikte hooge standen zullen zijn toe te schrijven. Deze standen zijn echter lager dan die in 1877 bij een veel grooteren Zuiderzee-invloed zijn bereikt, en het is dus zeker dat bij afgesloten Zuiderzee de standen in de Waddenzee lager zouden zijn geweest dan bij dien stormvloed.

*3/4 December 1863.* Astronomisch hoogwater middelmatig. De wind nam een oogenblik tot orkaankracht toe (Helder vermeldt tot dusver grootsten geregistreerden winddruk), maar de storm duurde niet lang. Het hoogtepunt valt, 12 uur na het opsteken van den storm, ongeveer op het oogenblik van de hoogste standen in de Waddenzee (middernacht); de wind was toen nog niet verder geruimd dan WtN, hij liep eerst in den morgen van 4 December, toen het minder stormde, tijdelijk naar het Noordwesten.

Hooge Noordzeestanden kwamen ditmaal niet voor, ook in de Waddenzee bereikte het water lang niet het niveau van 1825. Toch liep de Zuiderzeestand tamelijk hoog op, wat ook bij dezen stormvloed hoofdzakelijk aan een hoogen stand vóór den storm zal moeten worden toegeschreven. Van een zeer snelle vulling is evenmin sprake geweest als in 1825, 1862 en Januari 1863. Wel zijn de gegevens nog niet voldoende om een numerieke waarde voor den stroom te bepalen, het is echter zeker dat de stroomsterkte ver is gebleven beneden de waarde die later, in 1877 en 1894, is bereikt.

In het verslag van den storm (V.O.W. 1863) <sup>1)</sup> wordt herhaaldelijk gewezen op het uitblijven van de eb in de Waddenzee. Van het standpunt van thans bezien is dit niet verwonderlijk meer: de storm kwam ongeveer op het tijdstip van hoogwater in de Waddenzee door en daardoor overtrof de toeneming van het windeffect in de eerstvolgende zes uren de daling die de waterstand door de getijbeweging moest ondergaan. In het diagram van Helder is de invloed van de eb duidelijk te zien.

In genoemd verslag wordt ook de aandacht gevestigd (l.c. blz. 134) op de zeer groote afwaaiing aan de Noordhollandsche kust: 's avonds om 11 uur, tijdens den krachtigsten wind, moet tusschen Monnikendam en Edam eenerzijds en Marken anderzijds, een afstand van slechts vier kilometer in de windrichting gemeten, een niveauverschil van ruim een meter hebben bestaan, veel meer dan men op grond van formule (23) aanvankelijk zou verwachten. Hier heeft waarschijnlijk een deel van den zeebodem zoo goed als droog gelegen, terwijl ook onafhankelijk van den wind de bestaande waterbeweging met een zeker verhang zal zijn gepaard gegaan.

*30/31 Januari 1877.* Hoog springtij. De storm had een eigenaardig verloop, waardoor over het noordelijk deel van ons land een buitengewoon zware orkaan uit het Westen tot WNW is voorgekomen. Daarbij was de windverdeling in de Noordzee niet zoodanig, dat daar een zeer groote stuwing werd veroorzaakt. Op het lichtschip Noord-Hinder was gedurende bijna 24 uren de windkracht 9 BEAUFORT of hooger, maar slechts eenmaal wordt windkracht 11 West gemeld. De standen in de Noordzee en langs de Waddeneilanden waren dan ook niet zeer hoog; wèl die langs de Friesche kust tengevolge van de bijzonder groote opwaaiing in de Waddenzee.

De stroom naar de Zuiderzee was buitengewoon sterk, niettegenstaande de windrichting niet bijzonder gunstig daarvoor was en de Zuiderzee vóór den storm reeds iets was opgezet. De maximum stroomsterkte bedroeg ongeveer 210 000 m<sup>3</sup> per seconde en in de kom bereikte het water nog in hetzelfde getij, dat in de Waddenzee de hoogste standen gaf, een hoog peil.

*14/15 October 1881.* Getij van iets minder dan middelmatige hoogte.

De storm was reeds bij zuidwestelijke richting hevig; het zwaarste gedeelte tijdens richting WtN duurde slechts 3 à 4 uren, maar hield daarna met richtingen tusschen West en WNW met kracht 10 gedurende 8 uren aan, zoodat de stormvloed zich over twee hoogwaters uitstreckte.

De Noordzeestanden waren minder hoog dan bij de vorige stormvloeden, de Waddenzeestanden in verband daarmee eveneens. De vulling van de Zuiderzee was niet zeer snel: de windrichting, het niet hooge peil van de Waddenzee en de vrij hooge beginstand van de Zuiderzee waren daarvan de oorzaken. Door den langen duur werd toch nog een hooge Zuiderzeestand bereikt.

In de Waddenzee zou deze storm ook bij afgesloten Zuiderzee geen hooge waterstanden hebben gegeven.

*12/13 December 1883.* De getijhoogte was middelmatig. De wind te Helder was nog iets sterker dan in 1881 en ruimde verder, maar de

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 13.

duur was iets korter. De Noordzee was tamelijk hoog en de standen in de Waddenzee eveneens, ook omdat de sterkste wind gedurende de vloedperiode voorkwam waardoor de grootste stuwving omstreeks hoogwater viel. Alle omstandigheden waren dus gunstig voor een snelle vulling van de Zuiderzee, die vóór den storm op een laag niveau stond. Deze stroom is dan ook sterk geweest; het maximum bedroeg ongeveer 180 000 m<sup>3</sup> per seconde en de kom bereikte in een enkel getij een hoogen stand. Bij afgesloten Zuiderzee zou de verhooging van de Waddenzeestanden groot zijn geweest. Wel was de stroom naar de Zuiderzee minder sterk dan in 1877, maar de doorstromingsprofielen waren door minder hooge zeestanden (lage stand van den Oever) ook kleiner. Rekent men dit laatste op 5 à 6 % (meer was het zeker niet) dan zouden dezelfde vervallen bij de waterdiepten zooals ze in 1877 waren een stroom van 200 000 m<sup>3</sup> per seconde hebben veroorzaakt. De verlagende invloed van de Zuiderzee zal in 1883 dus maar heel weinig minder zijn geweest dan in 1877.

*22/23 December 1894.* Het was doortij, toch waren de astronomische hoogwaters hoog, wat ten deele door den hoogen middenstand in December, overigens door samenwerking van een groot aantal partieele getijden werd veroorzaakt.

De storm te Helder was bij zuidwestelijke tot westzuidwestelijke richting minder zwaar dan die van 1883 en bereikte slechts gedurende 2 uren orkaankracht uit westnoordwestelijke richting, terwijl bij het bereiken van de noordwestelijke richting de kracht reeds tot 8 BEAUFORT was afgenomen.

Ten opzichte van het astronomische getij viel de sterkste wind iets vroeger dan in 1883: te Helder kwam de grootste kracht omstreeks laagwater voor, het grootste windeffect kort daarna gedurende de rijzing.

Het hoogwater is in de Noordzee buitengewoon hoog opgelopen. De Zuiderzee echter, die in het begin laag stond, kon geen hoogen stand bereiken, ofschoon het instroomen aanvankelijk, vooral tengevolge van het groote niveauverschil tusschen Waddenzee en Zuiderzee, zeer snel ging. De maximum stroom bedroeg 210 000 m<sup>3</sup> per seconde, dus meer dan in 1883 en evenveel als in 1877. De doorstromingsprofielen waren in 1877 en 1894 even groot, zoodat men die stormen, wat Zuiderzee-invloed aangaat, op één lijn mag stellen.

*5/8 December 1895.* Deze storm heeft als voornaamste kenmerk zijn buitengewoon langen duur. In een periode van weinig ontwikkeld springtij woei het vier dagen lang met matige stormkracht uit westelijke tot westnoordwestelijke richting. De waterstanden stegen tot een hoog niveau en bleven daarop eenigen tijd terwijl de getijbeweging gewoon doorging (§ 17). De Noordzeestanden waren iets lager dan in 1883 en meer dan een halven meter lager dan in 1894. De vulling van de Zuiderzee verliep geleidelijk en werd geheel voltooid ruim een etmaal nadat de Waddenzee op den hoogen stand was gekomen. Dat het peil in de kom niet nog hooger werd is te danken aan het feit dat de wind niet verder ruimde. De standen aan de Friesche kust waren hoog; door den geringen stroom naar de Zuiderzee (niet meer dan 120 000 m<sup>3</sup> per seconde) was de invloed daarvan gering, zoodat bij afgesloten Zuiderzee de standen niet sterk zouden zijn opgelopen.

*28 Januari 1901.* Bijna doortij, door de groote enkeldaagsche ongelijkheid was toch nog een vrij hoog ochtendtij te verwachten. De storm werd voorafgegaan door eenige dagen van harden zuidwesten- tot westenwind, die het Zuiderzee-niveau reeds op ongeveer 80 cm + N.A.P. bracht. Tijdens het hoogste water in de Waddenzee kwam de grootste windsterkte uit het Westen tot WNW voor; de windkracht steeg echter niet boven 10 BEAUFORT. Er werd geen zeer hoog peil bereikt, voornamelijk tengevolge van de lage Noordzeestanden. De stroom naar de Zuiderzee had naar globale schatting op het kritieke oogenblik een sterkte van ongeveer 175 000 m<sup>3</sup> per seconde,

dus toch nog belangrijk minder dan in 1877 of in 1894. Later liep de wind naar NW, waardoor het volgende hoogwater op sommige plaatsen langs de Zuiderzee nog iets hoger kwam dan het eigenlijke stormtij.

De opwaaiing in den Dollart was bij dezen storm zeer groot.

*12/13 Maart 1906.* Buitengewoon sterk ontwikkeld springtij, waardoor deze stormvloed in Zeeland, waar het getij veel sterker is dan in het Noorden, zoo hoog is geweest. Toch was wegens den lagen middenstand het berekende hoogwater b.v. te Harlingen niet hoger dan 75 cm + N.A.P.

De storm zelf was niet hevig: de windkracht was minder dan bij alle andere hier behandelde stormen.

In de Noordzee kwamen hooge standen voor, in het bijzonder bij het Vlie.

Niettegenstaande den ver geruimden wind (te Helder NW tot NNW, de laatste richting niet meer met stormkracht) en den tamelijk langen duur, is de Zuiderzee niet hoog opgelopen. De vulling geschiedde ook vrij langzaam: niet meer dan 160 000 m<sup>3</sup> per seconde. De verlagende invloed in de Waddenzee was dus niet groot en daaruit volgt dat de waterstanden aan de zijde van Noordholland bij afgesloten Zuiderzee zeker onder die van 1894 en aan den Frieschen kant lager dan die in 1877 zouden zijn gebleven.

Wat de waterstanden bij open Zuiderzee betreft, tabel 4 doet zien dat deze langs de Friesche kust bij de stormen, zoowel van 1825 als van 1877, hooger waren dan bij den nu beschouwden. Op grond hiervan mag worden aangenomen dat te Roptazijl, waar 1906 een grootste hoogte van 318 geeft, den hoogsten daar ooit waargenomen stand, in 1825 en 1877 een nog iets hoogere stand zal zijn voorgekomen (verg. tabel 42, kolom 11).

*30 September/1 October 1911.* Volledigheidshalve zijn nog de cijfers gegeven van dezen bekenden storm; de Waddenzee bleef zeer laag, ofschoon men uit de standen in de kom ziet, dat de opwaaiing groot is geweest. De kern van de depressie die dezen storm veroorzaakte is niet ten noorden van de Waddeneilanden gegaan, maar dwars door Nederland, waarmee een noordoostelijke en noordelijke wind in de Waddenzee en in de zee ten noorden daarvan gepaard ging. Hooge standen in de Waddenzee konden dus niet voorkomen.

*13/14 Januari 1916.* Deze typische Zuiderzee-stormvloed viel bij doodtij, waardoor hij voor plaatsen met een belangrijk tijverschil niet zeer hoog kon worden. De Noordzeestanden zijn dan ook vrij laag gebleven.

Oorspronkelijk stormde het na een korten tijd van stormachtigen noordwestenwind hard uit het Westen; in deze periode viel het middagtij, waarbij de hoogste standen in de Waddenzee voorkwamen. De stroom naar de, reeds eerder opgezette, Zuiderzee bereikte in deze periode een maximum waarde van 170 000 m<sup>3</sup> per seconde.

Toen de wind ruimte was het water in de Waddenzee zoover gevallen, dat een sterkere stroom niet meer voorkwam. Doordat de storm tot het volgende hoogwater aanhield werd de Zuiderzee gevuld tot een niveau dat voorheen alleen in 1825 was bereikt; bij den zeer ver geruimden wind — tot NNW — werden in den zuidwesthoek ook de bij dien storm voorgekomen standen overtroffen.

*2/3 December 1917.* Zwak springtij. Langdurige storm.

In het Noordoosten gaf het dagtij van 2 December de hoogste standen bij westnoordwestenwind, overigens het nachttij van den tweeden op den derden, toen de wind, na tijdelijk iets te zijn afgenomen, naar het NW was gelopen. De Noordzeestanden waren gelijk of maar weinig hooger dan in 1916, ook de Waddenzeestanden zijn ongeveer gelijk. De Zuiderzee was reeds eenige dagen te voren hoog opgezet; gedurende den storm rees zij niet zeer snel meer: tijdens hoogwater van het dagtij in de Waddenzee was de stroom

omstreeks 170 000 m<sup>3</sup> per seconde, bij het nachttij niet veel meer dan 100 000 m<sup>3</sup>. In den morgen van 3 December nam de windkracht iets af, waardoor het middagtij van dien dag het nachttij niet heeft overtroffen; het bleef nog hard uit NW tot NNW waaien tot den voormiddag van 4 December.

*6/7 November 1921.* Alleen opgenomen omdat van dezen storm de gegevens het meest volledig zijn. Doodtij. Zeer krachtige storm uit het NNW. De Zuiderzee werd daardoor, de kleine doorstromingsprofielen in aanmerking genomen, snel gevuld (maximum stroom 170 000 m<sup>3</sup> per seconde); de standen in het zuidwestelijk deel van de kom waren slechts 30 cm lager dan in 1916. Van veel belang is het groote verschil tusschen de standen in de Noordzee en binnen de zeegaten (§ 21).

*30/31 Augustus 1923.* Dit is de hoogst bekende zomerstormvloed (tusschen 15 April en 15 September).

*9/10 Maart 1926.* Na de afsluiting van het Amsteldiep. De omstandigheden hadden veel overeenkomst met die van den storm van November 1921. Door de waterstanden van Helder, Westerland, den Oever en Medemblik voor de beide gevallen te vergelijken kan men den verhoogenden invloed van de afsluiting van het Amsteldiep op den waterstand te Westerland nagaan (verg. § 120).

Van alle andere besproken stormvloeden kan men zeggen, dat ze bij afgesloten Zuiderzee minder hooge waterstanden zouden hebben veroorzaakt dan die van 1877 of die van 1894. Bij open Zuiderzee staat ook de storm van 1825 op den voorgrond.

Wat de niet beschouwde stormen betreft, moge het volgende worden opgemerkt. De storm van 1877 gaf te Harlingen een waterhoogte van 288 cm + N.A.P. Voor alle niet in de tabel opgenomen stormen is die hoogte beneden 250 cm + N.A.P., dus 38 cm minder. De verhooging door de afsluiting bedraagt voor Harlingen 1877 (§ 111) omstreeks 60 cm en dus zou een der niet besproken stormen eerst dan bij afgesloten Zuiderzee gevaarlijk worden, indien de verhooging  $60 + 38 = 98$  cm bedroeg. Een dergelijke verhooging kan gerustelijk als uitgesloten beschouwd worden.

Een overeenkomstige redeneering kan men toepassen voor Nieuwediep. Hier hebben alle niet beschouwde stormvloeden een hoogte beneden 210 cm + N.A.P. De storm van 1894 gaf daar een stand van 260 cm + N.A.P. en als verhooging bij afsluiting (tabel 42, kolom 8) omstreeks 45 cm. Een andere storm zou dus om gevaarlijk te worden 95 cm verhooging moeten hebben.

Men kan dus volstaan met twee stormvloeden te behandelen: die van 30/31 Januari 1877 en van 22/23 December 1894. Men kan ze beide beschouwen als vertegenwoordigers van het eerste der drie in § 24 genoemde stormtypen. De storm van 1894 onderscheidt zich alleen door zijn korten duur maar wijkt verder nagenoeg niet van het normale type af. De zeer groote stuwing op de Noordzeekust (verwijderd windeffect) ontwikkelt zich volledig. Bij den storm van 1877 trad een complicatie op in den vorm van een secundaire depressie die tijdens de westenwind-periode, dus vóór de grootste Noordzeestuwing, een groote opwaaiing in de Waddenzee veroorzaakte (locaal windeffect).

In de volgende §§ zullen deze stormen nader worden besproken.

§ 26. *De stormvloed van 30/31 Januari 1877.* De waterstanden, die op den stormdag bij afwezigheid van wind te Helder, Vlieland en Harlingen zouden zijn voorgekomen, konden met de methode der harmonische analyse worden berekend. Om zooveel mogelijk partieele getijden in rekening te brengen is de rekenwijze gevolgd, die in bijlage 3 is aangegeven. Die

rekenwijze wijkt van de gebruikelijke af; in de bijlage is aangetoond dat zij goede resultaten geeft.

Het bleek dat de enkeldaagsche getijden elkander over het algemeen versterkten; ook het dubbeldaagsche getij was zeer groot. Het hoogwater van de belangrijkste partieele getijden viel nagenoeg op denzelfden tijd als dat van het hoofdgetij en de sterkte van de dubbeldaagsche golf (ongeveer 1,25 maal zoo sterk als  $M_2$  alleen) was slechts weinig minder dan de waarde ( $1,28 \times M_2$ ), die in bijlage 3 als maximum is aangenomen.

Tengevolge van den lagen middenstand van eind Januari bleven de hoogwaters ongeveer 10 cm lager dan de practisch hoogst bereikbare waarden van bijlage 3, ofschoon de enkel- en dubbeldaagsche hoogwaters bijna op hetzelfde tijdstip vielen.

Zoover het de astronomische standen betreft had de stormvloed dus niet meer dan 10 cm hooger kunnen zijn.

Reeds in den morgen van 29 Januari woei een matige storm uit WZW en West, die de waterstanden in Noordzee en Waddenzee ongeveer een meter boven de astronomische standen deed stijgen. Ook de Zuiderzee begon in den loop van den dag op te loopen, zooals men in het diagram (figuur 24, blz. 78—79) kan zien aan de kromme voor Urk, waar de waterstand nooit veel verschilt van het gemiddelde van de geheele Zuiderzee ten zuiden van de afsluitingslijn.

In den nacht van 29 op 30 kromp de wind; bij het aanbreken van den dag stormde het uit het ZZW, waardoor het windeffect op verscheidene plaatsen iets afnam en te Hoorn en Durgerdam zelfs sterk negatief werd. Kort na den middag liep de wind vrij plotseling naar het Westen terwijl de storm in hevigheid toenam. Uit het diagram van Helder werd afgeleid dat de windsnelheid tusschen 4 en 5 uur 30 m per sec overschreed en tusschen 6 en 10 uur de ongehoord groote maximum waarde van 37 m per sec bereikte, waarbij de wind zeer geleidelijk naar WNW liep. In den morgen van 31 Januari nam de wind weer in kracht af, daarbij nog iets verder ruimende.

Het diagram van den anemometer te Elburg vertoont wat de windrichting betreft hetzelfde beeld als dat van Helder, de snelheid is echter veel minder.

Alle waarnemers in het noordwestelijk deel van Nederland maken melding van een buitengewoon hevigen orkaan, zoodat er geen reden is de uit den winddrukmeter te Helder afgeleide waarden in twijfel te trekken.

Het is duidelijk dat bij een dergelijke hooge windsnelheid groote opwaaiingen moesten ontstaan. Dit is dan ook geschied. In figuur 22 is getracht de waterstanden omstreeks 9 uur in den avond van 30 Januari, dus in de periode van de grootste windsnelheid, weer te geven. Zoowel in het noordelijk deel van de Waddenzee als in de kom van de Zuiderzee waren de niveauverschillen buitengewoon groot.

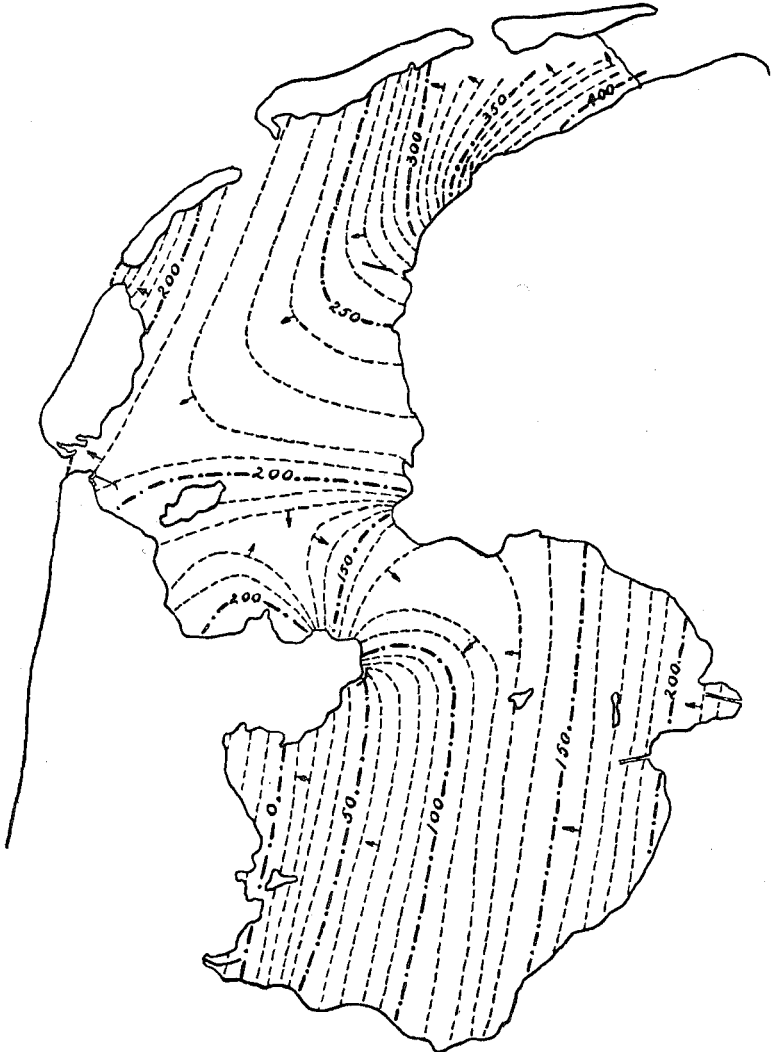
Het niveauverschil van 170 cm over de 25 km tusschen de haven van Terschelling en het Hooghuis van het Nieuw Bildt is geheel aan de werking van den wind toe te schrijven. De astronomische stand van Terschelling was ongeveer 70 cm + N.A.P., te Nieuw Bildt een decimeter lager. Men zal echter rekening moeten houden met de mogelijkheid, dat de hooge waterstanden de voortplanting van het getij hebben versneld waardoor de berekende stand voor Nieuw Bildt iets te laag kan zijn. Een opwaaiing van  $6\frac{1}{2}$  à 7 cm per km is zeker bereikt en dit in een waterdiepte van gemiddeld minstens  $5\frac{1}{2}$  à 6 m. Volgens formule (23) (§ 62) is daarvoor een winddruk van 72 à 84 kg per  $m^2$  of een snelheid van 32 à 34 m per sec noodig. Daar bij deze zeer groote windsnelheid de constante van (23) kleiner dan 0,5 is (§ 20), moet de windsnelheid nog grooter zijn geweest, zoodat de abnormaal hooge stand te Nieuw Bildt en de abnormaal groote windsnelheid te Helder elkander bevestigen.

In de Zuiderzee met haar klein tijverschil komen de niveauverschillen eveneens vrijwel overeen met de opwaaiing. In het westelijk deel van de

kom is de toestand niet na te gaan, omdat bij de lage waterstanden langs den westrand de diepte te onzeker wordt. Aan den oostkant schijnt de opwaaiing in ongeveer  $4\frac{1}{2}$  m diepte tusschen  $3\frac{1}{2}$  en 4 cm per km te zijn geweest. Dit komt overeen met een winddruk van 32 tot 36 kg per  $m^2$  of een snelheid van 21 à 22 m per sec, dus nog ruim een graad BEAUFORT meer dan het instrument te Elburg aangaf. De wind is dus verder naar het Zuidoosten minder geweest; de stormrapporten van Urk spreken toch nog over een zeer zwaren storm.

In de beide genoemde gebieden staan de lijnen van gelijke waterhoogte loodrecht op de windrichting (WNW), een teeken dat de opwaaiing grooten-

WATERSTANDEN OP 30 JANUARI 1877, 9 UUR NM.



Figuur 22.

deels den toestand beheerscht. In het tusschenliggende deel loopen de hoogtelijnen geheel anders: ze staan dwars op de Friesche kust. Tusschen Nieuw Bildt en Stavoren is het verval ruim 250 cm, ofschoon de verbindingslijn loodrecht op den wind staat en deze rechtstreeks dus geen belangrijke niveauverschillen kan geven.

Dit verval staat in verband met den naar de Zuiderzee trekkenden stroom, die zeer sterk was. Maakt men een dergelijk kaartje ook voor andere tijdstippen, dan blijkt het, dat de Zuiderzeestand in de volgende drie uur met bijna 60 cm is gestegen, de gemiddelde stroom over de afsluitingslijn is dus niet veel minder dan  $200\ 000\ m^3$  per sec geweest, en de maximum waarde heeft (omstreeks 10 uur), zoover men uit de onvolledige gegevens kan nagaan, dicht bij  $210\ 000$  gelegen.

Daar het in het overgangsgebied vrijwel hoogwater was moet een even groote hoeveelheid door het niet veel meer dan  $100\ 000\ m^3$  groote

profiel tusschen de Ven en Stavoren zijn gepasseerd. De stroomsnelheid bij de uitstekende punt van Stavoren was dus belangrijk grooter dan 2 m per sec. Dit verklaart den lagen stand bij Stavoren, want niet alleen is de waarde van  $\frac{v^2}{2g}$  (§ 34) zeer groot, ook doordat het snelstroomende water de scherpe bocht van de Friesche kust moet volgen ontstaat een aanzienlijke verlaging (§ 16). Aan de sluis te Molkwerum, waar de eene invloed veel kleiner en de andere in omgekeerden zin aanwezig is, moest de waterstand veel hooger zijn. De twee genoemde omstandigheden zullen tusschen de beide plaatsen een niveauverschil van ongeveer 40 cm hebben teweeggebracht. Voegt men daarbij nog het verval, dat overeenkomt met den door den stroom ondervonden weerstand en houdt men rekening met het feit dat Molkwerum een weinig meer beneden den wind ligt dan Stavoren, dan kan men begrijpen dat het niveauverschil tusschen deze, slechts enkele kilometers van elkander verwijderde, plaatsen bijna een meter en een uur later zelfs 110 cm is geweest.

Langs het overige gedeelte van de kust spelen de „secundaire” verschijnselen een ondergeschikte rol en men mag wel aannemen dat het niveauverschil van rond twee meter tusschen Nieuw Bildt en de zuidwestpunt van Friesland ongeveer overeenkomt met den weerstand dien de stroom ondervindt. Daarvoor moet de gemiddelde stroomsnelheid van de grootte van 80 cm per sec zijn, een getal dat met de vulling van de Zuiderzee in goede overeenstemming is.

Aan de Noordhollandsche zijde vindt men dergelijke verschijnselen; hier is het verval voornamelijk geconcentreerd tusschen Medemblik en Enkhuizen.

In het zuidelijk deel van de Noordzee heeft het blijkens de waarnemingen op het lichtschip Noord-Hinder veel minder hard gewaaid, en was de windrichting tijdens de grootste kracht (10 à 11) gemiddeld West, dus niet gunstig voor grooten opzet van water tegen onze kust. Het wind-effect te Helder en vooral op Vlieland was, tenminste in den aanvang van den storm, niet bijzonder groot: om 10 uur nm was het te Helder 135, te Vlieland 135 cm. Later, toen de stroom naar de Zuiderzee sterk afnam, werd het windeffect te Helder grooter (210 cm), wat ook in verband kan staan met den ruimenden wind, die toen de voor stuwung meest gunstige richting (NWtW) had bereikt.

Hoe het toen met de stuwung te Vlieland ging is niet uit te maken, daar tusschen halfelf 's avonds en halftien 's morgens alle gegevens in deze streek ontbreken; wel kan men aannemen dat 200 cm niet is overschreden.

Wanneer men voor Harlingen bij de berekening der astronomische standen van de gewone getijconstanten uitgaat vindt men een windeffect met een duidelijke dubbeldaagsche periode. Tusschen 6 en 7 uur 's avonds (30 Januari) is het grooter dan 260 cm, daarna daalt het tot 170 cm (1 uur 's nachts) om vervolgens weer tot 210 cm te stijgen.

Hier moet de snellere voortplanting van het getij (§ 17) in rekening worden gebracht. De berekening van bijlage 9 geeft een waarschijnlijke vervroeging van drie kwartier tot een uur aan; wordt de berekende kromme zooveel verschoven, dan is het stijgen tot het tweede maximum verdwenen: het windeffect vertoont alleen een maximum van 225 cm om 7 uur 's avonds en neemt dan langzaam af: 's morgens 6 uur is het nog 195 cm.

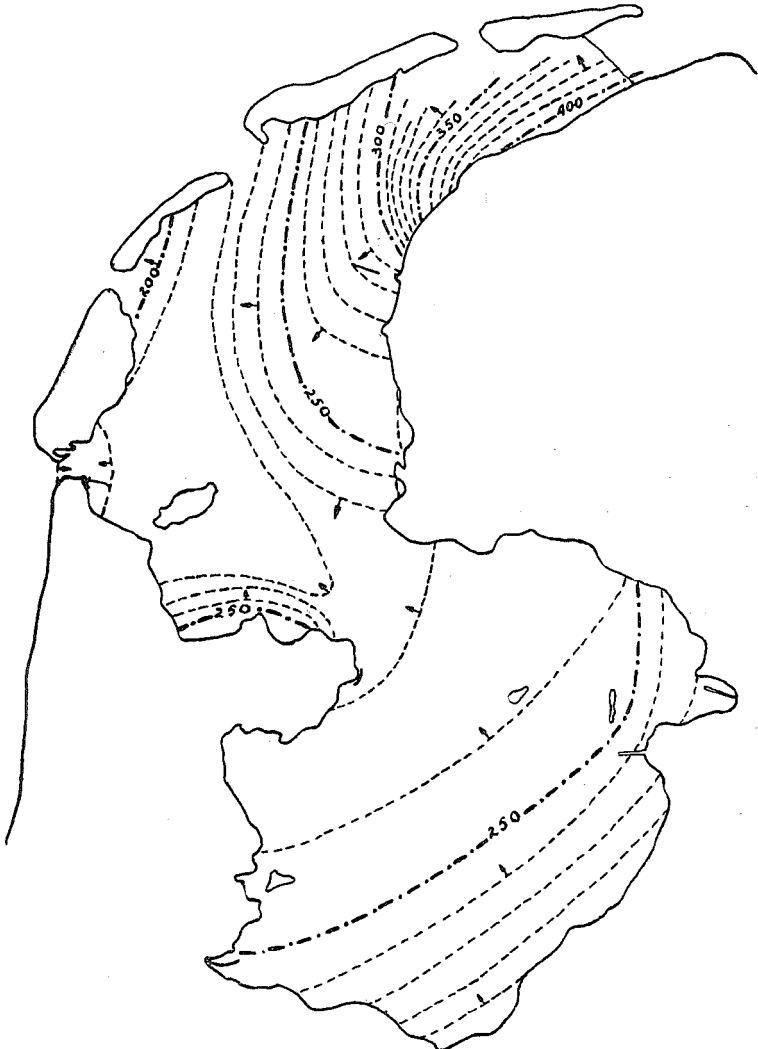
De locale stuwung in de Waddenzee, dus het verschil tusschen het windeffect te Harlingen en het gemiddelde van Helder en Vlieland, was om 6 en 7 uur 's avonds grooter dan 100 cm (onzeker door onvoldoende waarnemingen op Vlieland), maar nam af toen de stroom naar de Zuiderzee sterker werd; om halfelf was die stroom op zijn sterkst, de locale stuwung bedroeg toen nog 45 à 50 cm. Toen de stroom afnam verminderde ook de kracht van den wind, zoodat de opwaaiing om 6 uur vermoedelijk (Vlieland onzeker!) nog 40 cm was.

De hooge standen langs de Friesche kust zijn bij dezen storm voor-  
namelijk veroorzaakt door de groote locale opwaaiing in de Waddenzee.

Het windeffect in de Noordzee was toen nog niet zeer groot, het  
bereikte verscheidene uren later, toen de wind verder was geruimd, zijn  
maximum waarde. Men kan nu de vraag stellen of de groote opwaaiing  
in de Waddenzee had kunnen samenvallen met de maximum stuwung  
buiten de zeegaten.

Dit is uit meteorologische overwegingen onmogelijk te achten. De  
sterke wind, die de opwaaiing in de Waddenzee zoo groot maakte en slechts  
plaatselijk voorkwam, stond namelijk, zooals reeds in § 25 gezegd is, in

MAXIMUM WATERSTANDEN BIJ DEN STORMVLOED VAN  
30/31 JANUARI 1877.

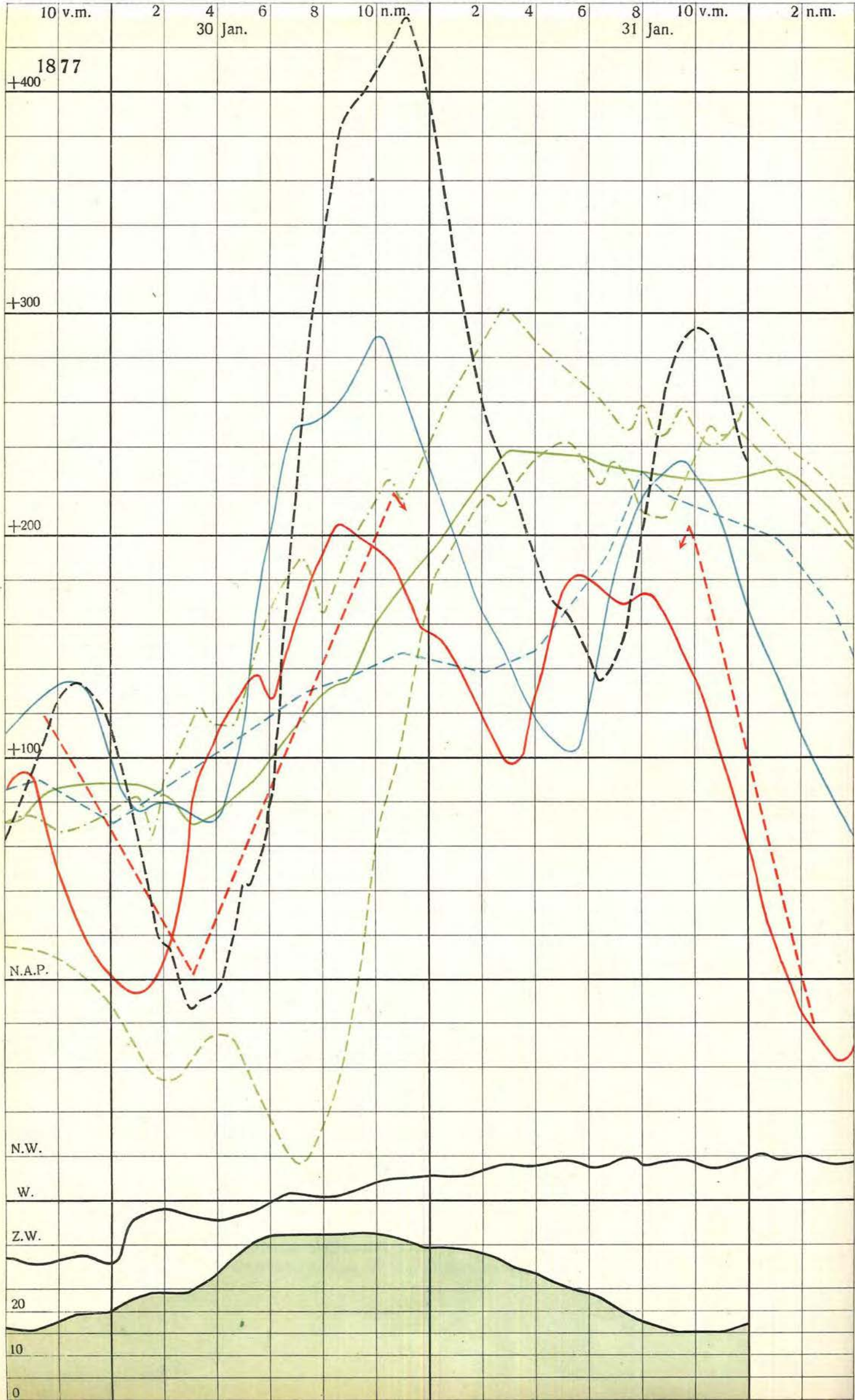


Figuur 23.

verband met een secundaire depressie, die tusschen de kern van de hoofd-  
depressie en ons land passeerde. Dergelijke secundairen kunnen voorkomen  
aan alle zijden van het stormgebied maar zullen alleen een stormachtigen  
westelijken wind kunnen veroorzaken indien zij aan de zuidzijde van het  
depressiegebied liggen.

De achterzijde (westkant) der depressie, waar de zware noordwesten-  
winden waaien die het windeffect op de Noordseekust groot maken, ligt  
dan nog aan de Engelsche kust. Zal dit windeffect zeer groot zijn dan  
moet de noordwestenwind sinds eenigen tijd over de geheele Noordzee  
voorkomen en is het daardoor uitgesloten dat aan den rand van dit storm-  
veld nog orkaankracht met afwijkende richting heerscht.

Ofschoon voor de Staatscommissie niet van veel belang, mag de  
groote opwaaiing die bij dezen stormvloed in den Dollart is waargenomen



Figuur 24 en 25

Waterstanden

te:

Ijmuiden ———

Zoutkamp - - - - -

Helder ——— (red)

Vlieland - - - - - (red)

Harlingen ——— (blue)

Stavoren - - - - - (blue)

Urk ——— (green)

Durgerdam (1877) - - - - - (green)

Oranjesluizen (1894) - - - - - (green)

Elburg - - - - - (green)

(centimeters t.o.v. N.A.P.)

Wind te Helder

Richting

Snelheid

(meters per seconde)

Figuur 24 en 25

Waterstanden

te:

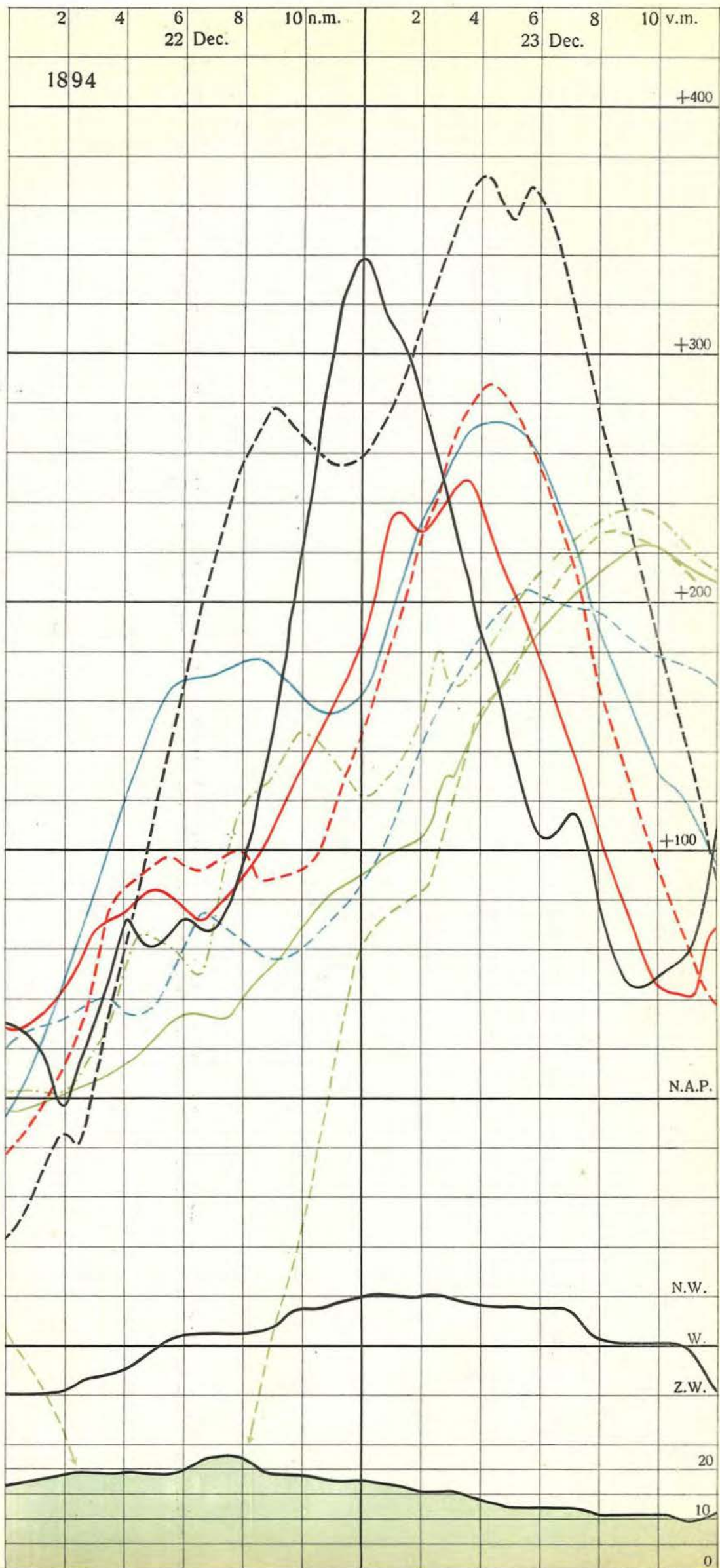
- Ijmuiden —————
  - Zoutkamp - - - - -
  - Helder —————
  - Vlieland - - - - -
  - Harlingen —————
  - Stavoren - - - - -
  - Urk —————
  - Durgerdam (1877) } - - - - -
  - Oranjesluizen (1894) } - - - - -
  - Elburg - - - - -
- (centimeters t.o.v. N.A.P.)

Wind te Helder

Richting

Snelheid

(meters per seconde)



niet onvermeld blijven. In het verschil van 115 cm tusschen hoogwater Delfzijl en Nieuw Statenzijl is een bedrag van 15 cm voor het astronomische hoogteverschil begrepen; voor de opwaaiing blijft dus een meter, d.i. 4,5 cm per km, in water van zeer verschillende diepte, over. Dit is verreweg het grootste bedrag dat hier ooit is waargenomen en anderhalf maal zoo groot als de daarop volgende waarneming (28 Januari 1901). Wel zijn de waarnemingen op beide plaatsen aan gewone peilschalen verricht en te Nieuw Statenzijl zelfs onder zeer ongunstige omstandigheden (bijlage n<sup>o</sup>. 4 van het Stormvloedverslag) <sup>1)</sup>, zoodat er een vrij groote onzekerheid bestaat, maar ook door deze waarnemingen wordt bevestigd dat de windsnelheid buitengewoon groot is geweest.

§ 27. *De stormvloed van 22/23 December 1894.* In tegenstelling met dien van 1877 viel deze storm met doottij samen. Toch waren de astronomische hoogwaters geenszins laag. Het maansgetij  $M_2$  wordt wel is waar door het zonsgetij  $S_2$  verzwakt, maar daarentegen door alle andere partieele getijden in meerdere of mindere mate versterkt, zoodat het geheel nog iets sterker is dan de gemiddelde waarde. Daarbij komt dat de dagelijksche ongelijkheid, die juist zeer groot was, het stormtij verhoogde, terwijl men ten slotte moet rekenen met het feit dat de middenstand in December boven den normalen ligt.

Het resultaat van een en ander is, dat het astronomische hoogwater van het morgentij van 23 December 1894 bepaald hoog is. Met de rekenwijze van bijlage 3 vindt men voor Helder, Vlieland en Harlingen resp. 60, 71 en 70 cm + N. A. P., dus 13 à 14 cm hooger dan gemiddeld hoogwater, en slechts ruim 15 cm lager dan de hoogste standen waarop nog moet worden gerekend.

De op deze wijze berekende astronomische standen wijken niet veel af van de waarden die door den heer GALLÉ zijn berekend in tabel VIII van zijn brochure <sup>2)</sup>. Ook daarin komen de hooge astronomische hoogwaters voor.

De storm kan onder de zware stormen worden gerekend, hoewel de windsnelheden van 1877 lang niet werden bereikt. In den morgen van 22 December wakkerde de zuidwestenwind aan: kort na den middag was de sterkte te Helder 9 à 10 Beaufortgraden. Daarna ging de wind geleidelijk ruimen, zoodat te middernacht de richting NW was geworden. In deze periode viel de grootste windsnelheid, nl. bijna 11 BEAUFORT (23 m per sec) tusschen 7 en 8 uur 's avonds.

Tijdens de hoogste standen in de Waddenzee in den vroegen morgen van 23 December was de kracht niet grooter dan 8 en 7 (16—14 m per sec). Het kaartje van de waterhoogten om 3 uur (figuur 26) ziet er dan ook geheel anders uit dan dat van het overeenkomstige tijdstip van 1877 (figuur 22). Wel is de opwaaiing belangrijk, maar zij is nergens grooter dan 2 cm per km. Dit komt in de Zuiderzee ( $4\frac{1}{2}$  m diep) overeen met een winddruk van 18 kg of een snelheid van 16 m. Aan de lijnen van gelijken waterstand is duidelijk te zien dat de wind verder was geruimd dan in 1877. De opwaaiing in het Terschellingsche Wad is nu zoo klein, dat de storingen door de getijden en door den stroom naar de Zuiderzee een relatief grooten invloed hebben. De stand te Nieuw Bildt is niet goed bekend. Hij zal tusschen 280 en 290 cm + N. A. P. zijn geweest.

In de Waddenzee en in het overgangsgebied is het verval in de richting naar de Zuiderzee weer aanwezig. Tusschen de Waddeneilanden en het nauw van Stavoren is het nog grooter dan in 1877. Daardoor is het mogelijk dat de naar de Zuiderzee trekkende stroom even groot is, niettegenstaande de wind zooveel minder sterk was.

Aan de Friesche kust daarentegen is het verval kleiner, een verschijnsel dat in verband staat met den verder geruimden wind. Stavoren ligt bij

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 12.

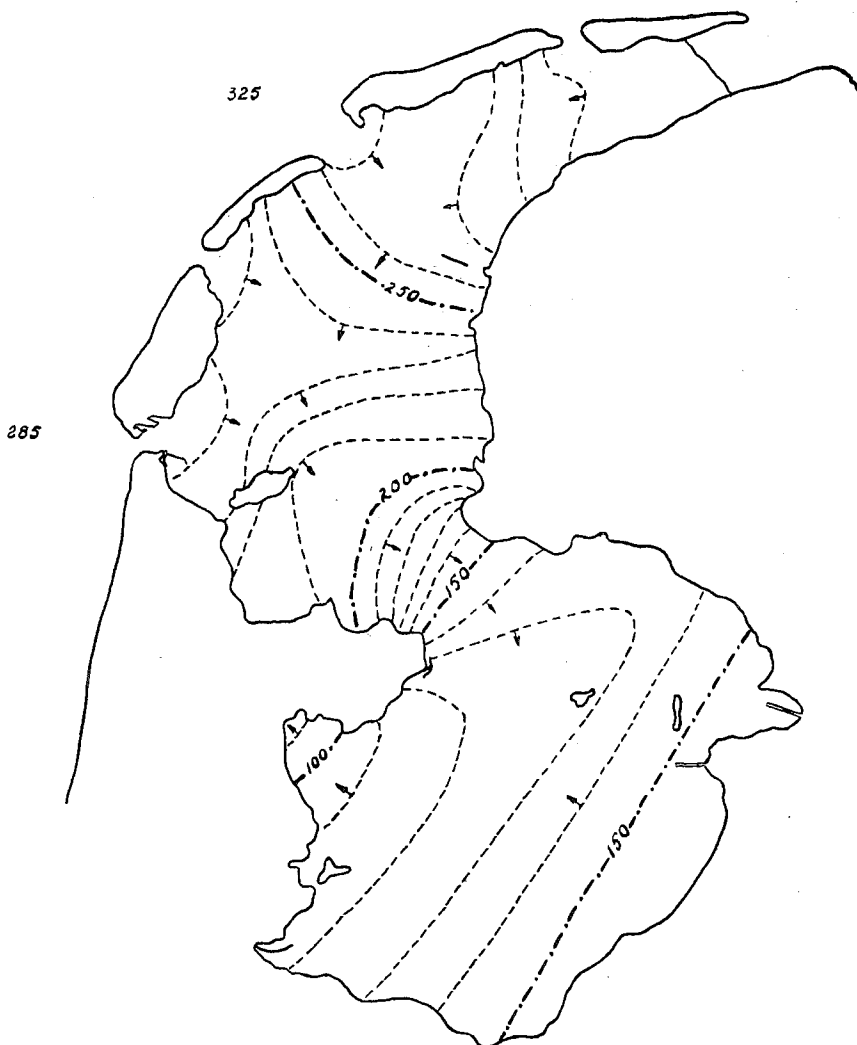
<sup>2)</sup> „ „ n<sup>o</sup>. 7.

noordwestenwind niet meer dwars van Nieuw Bildt, maar bijna 25 km benedenwaarts, waarmee een opwaaiing daarheen van een halven meter overeenkomt. Bij evenwichtopwaaiing zou de stand bij Stavoren dus met dit bedrag hoger zijn dan bij het Hooghuis en het verval ten opzichte van het evenwichtoppervlak was dus in 1894 van dezelfde grootte als in 1877.

Men kan derhalve een even grooten stroom naar de Zuiderzee verwachten als in 1877, en werkelijk blijkt dat de maximum waarde, die in het volgende uur optreedt, evenals bij dien storm 210 000 m<sup>3</sup> per sec is geweest.

Omtrent het verloop van dezen stroom zijn nog eenige gegevens vermeld in bijlage 10.

WATERSTANDEN OP 23 DECEMBER 1894, 3 UUR VM.



Figuur 26.

De Noordzeestanden in het kaartje (figuur 26) zijn geschat naar analogie van de waarnemingen van 6/7 November 1921 (§ 21) met behulp van den stand te IJmuiden. Op deze laatste plaats was de registreerende peilschaal om 11 uur 's avonds defect geraakt, het verdere gedeelte van de kromme voor die plaats is gebaseerd op de uurwaarnemingen aan de sluizen. Hier is de waterstand sterk gestoord geweest door de z.g. haling: een schommeling van het water in het complex van de buitenhavens. De verklaring daarvan is wel deze dat, wanneer eenige windstooten op elkander volgen met een tusschenruimte niet veel afwijkend van de periode van vrije slingering van het havengebied, die schommeling zeer groot kan worden; de waterstand bij het gesloten einde aan de sluizen gaat dan in enkele minuten soms een meter op en neer. Bij den nu beschouwden storm moet de haling zeer sterk zijn geweest: de beide hoogwaters (10.45 nm 362 en 1.50 vm

368), die ver boven de door de uurwaarnemingen getrokken lijn liggen, zijn anders niet te verklaren.

Al is de Noordzeestand niet zoo hoog geweest als men uit het getal 368 voor IJmuiden in de stormvloedverslagen zou afleiden, er is toch wel een groote stuwing ontstaan. Te IJmuiden heeft ze de waarde van 270 cm bereikt, evenals op de verder zuidwaarts gelegen Noordzeestations en in analogie van wat er bij de stormen in 1921 is gebeurd kan men aannemen, dat het windeffect buiten het Heldersche zeegat niet veel minder en buiten het Vlie vermoedelijk nog iets grooter zal zijn geweest (verg. figuur 21, § 21).

De invloed van den intrekenden stroom in de zeegaten (afzuiging, § 21) is duidelijk aanwezig, want te Helder bereikte de stuwing nog niet geheel de twee meter, terwijl te Vlieland het grootste windeffect omstreeks 225 cm was <sup>1)</sup>.

Voor Harlingen heeft men weder rekening te houden met het door de grootere waterdiepte vervroegde getij (§ 17). Doet men dit niet, dan vindt men in de vloedperiode een te groot en gedurende den tijd waarin de astronomische stand daalt een te klein windeffect. Het maximum is dan meer dan 250 cm. Wordt de getijlijn weer, evenals in 1877, drie kwartier vooruit geschoven, dan verdwijnt de dubbeldaagsche periode uit het windeffect, het maximum daarvan is dan slechts 230 cm.

In onderstaande tabel 5 zijn voor het tijdvak waarin de hoogste standen voorkwamen de grootheden voor Helder, Vlieland en Harlingen gegeven.

TABEL 5. Waterstanden en stuwingen 22/23 December 1894.

| Tijd (uur).            |                                | 9 nm | 10 nm | 11 nm | 12 nm | 1 vm | 2 vm | 3 vm | 4 vm | 5 vm | 6 vm |             |
|------------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Astronomische stand.   | Helder . .                     | — 70 | — 65  | — 23  | 27    | 48   | 46   | 47   | 49   | 36   | 11   | cm + N.A.P. |
|                        | Vlieland .                     | — 50 | — 74  | — 82  | — 63  | — 28 | 11   | 38   | 57   | 70   | 62   | "           |
|                        | Harlingen.                     | — 36 | — 50  | — 56  | — 53  | — 26 | 12   | 40   | 57   | 70   | 62   | "           |
| Waargenomen stand.     | Helder . .                     | 97   | 128   | 160   | 174   | 237  | 229  | 242  | 243  | 214  | 182  | cm + N.A.P. |
|                        | Vlieland .                     | 94   | 94    | 105   | 136   | 176  | 224  | 262  | 277  | 280  | 256  | "           |
|                        | Harlingen.                     | 171  | 162   | 155   | 163   | 204  | 236  | 267  | 270  | 270  | 258  | "           |
| Windeffect.            | Helder . .                     | 167  | 193   | 183   | 147   | 189  | 183  | 195  | 194  | 178  | 171  | cm          |
|                        | Vlieland .                     | 144  | 168   | 187   | 199   | 204  | 213  | 224  | 220  | 210  | 194  | "           |
|                        | Harlingen(a)                   | 207  | 212   | 211   | 216   | 230  | 224  | 227  | 213  | 200  | 196  | "           |
|                        | Gemidd. Vlieland en Helder (b) | 156  | 180   | 185   | 173   | 196  | 198  | 210  | 207  | 194  | 182  | "           |
| Verschil a—b . . . . . |                                | 51   | 32    | 26    | 43    | 34   | 26   | 17   | 6    | 6    | 14   | cm          |

Te Helder valt het grootste windeffect volkomen, te Vlieland bijna geheel, samen met den hoogsten astronomischen stand. Een hogere stand had daar bij dit getij en met deze grootte van de windstuwing niet kunnen worden bereikt.

Te Harlingen was het windeffect tijdens den hoogsten stand reeds met een tweektal decimeters afgenomen. De oorzaak hiervan mag men in den sterken stroom die op dat oogenblik naar de Zuiderzee trok zien. De stuwingen in de Waddenzee tusschen Vlieland en Helder eenerzijds en Harlingen anderzijds (laatste regel van tabel 5) zijn kleiner dan men op grond van windrichting en -snelheid alleen (opwaaing) zou verwachten.

Formule (23) geeft om 9 uur voor deze stuwing een waarde van omstreeks 55 cm, die geleidelijk afneemt tot 20 cm om 6 uur 'smorgens. De kleine waarden om 3, 4 en 5 uur staan in verband met den verlagenden

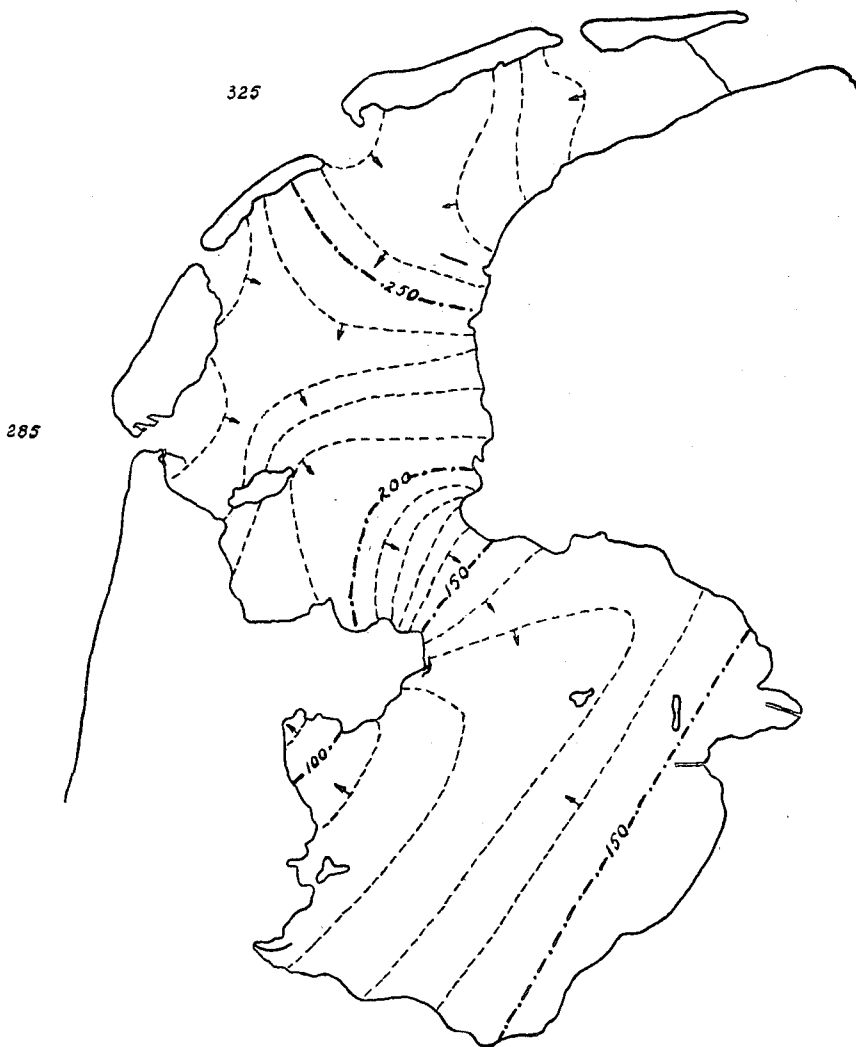
<sup>1)</sup> Deze cijfers wijken een weinig af van die in tabel VIII van de brochure van den heer GALLÉ omdat de berekening der astronomische standen is geschied op een andere wijze, waarbij meer partieele getijden in rekening zijn gebracht.

noordwestenwind niet meer dwars van Nieuw Bildt, maar bijna 25 km benedenwaarts, waarmee een opwaaiing daarheen van een halven meter overeenkomt. Bij evenwichtopwaaiing zou de stand bij Stavoren dus met dit bedrag hooger zijn dan bij het Hooghuis en het verval ten opzichte van het evenwichtoppervlak was dus in 1894 van dezelfde grootte als in 1877.

Men kan derhalve een even grooten stroom naar de Zuiderzee verwachten als in 1877, en werkelijk blijkt dat de maximum waarde, die in het volgende uur optreedt, evenals bij dien storm 210 000 m<sup>3</sup> per sec is geweest.

Omtrent het verloop van dezen stroom zijn nog eenige gegevens vermeld in bijlage 10.

#### WATERSTANDEN OP 23 DECEMBER 1894, 3 UUR VM.



Figuur 26.

De Noordzeestanden in het kaartje (figuur 26) zijn geschat naar analogie van de waarnemingen van 6/7 November 1921 (§ 21) met behulp van den stand te IJmuiden. Op deze laatste plaats was de registreerende peilschaal om 11 uur 's avonds defect geraakt, het verdere gedeelte van de kromme voor die plaats is gebaseerd op de uurwaarnemingen aan de sluisen. Hier is de waterstand sterk gestoord geweest door de z.g. haling: een schommeling van het water in het complex van de buitenhavens. De verklaring daarvan is wel deze dat, wanneer eenige windstooten op elkander volgen met een tusschenruimte niet veel afwijkend van de periode van vrije slingering van het havengebied, die schommeling zeer groot kan worden; de waterstand bij het gesloten einde aan de sluisen gaat dan in enkele minuten soms een meter op en neer. Bij den nu beschouwden storm moet de haling zeer sterk zijn geweest: de beide hoogwaters (10.45 nm 362 en 1.50 vm

368), die ver boven de door de uurwaarnemingen getrokken lijn liggen, zijn anders niet te verklaren.

Al is de Noordzeestand niet zoo hoog geweest als men uit het getal 368 voor IJmuiden in de stormvloedverslagen zou afleiden, er is toch wel een groote stuwing ontstaan. Te IJmuiden heeft ze de waarde van 270 cm bereikt, evenals op de verder zuidwaarts gelegen Noordzeestations en in analogie van wat er bij de stormen in 1921 is gebeurd kan men aannemen, dat het windeffect buiten het Heldersche zeegat niet veel minder en buiten het Vlie vermoedelijk nog iets grooter zal zijn geweest (verg. figuur 21, § 21).

De invloed van den intrekkenen stroom in de zeegaten (afzuiging, § 21) is duidelijk aanwezig, want te Helder bereikte de stuwing nog niet geheel de twee meter, terwijl te Vlieland het grootste windeffect omstreeks 225 cm was <sup>1)</sup>.

Voor Harlingen heeft men weder rekening te houden met het door de grootere waterdiepte vervroegde getij (§ 17). Doet men dit niet, dan vindt men in de vloedperiode een te groot en gedurende den tijd waarin de astronomische stand daalt een te klein windeffect. Het maximum is dan meer dan 250 cm. Wordt de getijlijn weer, evenals in 1877, drie kwartier vooruit geschoven, dan verdwijnt de dubbeldaagsche periode uit het windeffect, het maximum daarvan is dan slechts 230 cm.

In onderstaande tabel 5 zijn voor het tijdvak waarin de hoogste standen voorkwamen de grootheden voor Helder, Vlieland en Harlingen gegeven.

TABEL 5. Waterstanden en stuwingen 22/23 December 1894.

| Tijd (uur).            |                                | 9nm  | 10nm | 11nm | 12nm | 1 vm | 2 vm | 3 vm | 4 vm | 5 vm | 6 vm |             |
|------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Astronomische stand.   | Helder . .                     | — 70 | — 65 | — 23 | 27   | 48   | 46   | 47   | 49   | 36   | 11   | cm + N.A.P. |
|                        | Vlieland . .                   | — 50 | — 74 | — 82 | — 63 | — 28 | 11   | 38   | 57   | 70   | 62   | "           |
|                        | Harlingen.                     | — 36 | — 50 | — 56 | — 53 | — 26 | 12   | 40   | 57   | 70   | 62   | "           |
| Waargenomen stand.     | Helder . .                     | 97   | 128  | 160  | 174  | 237  | 229  | 242  | 243  | 214  | 182  | cm + N.A.P. |
|                        | Vlieland . .                   | 94   | 94   | 105  | 136  | 176  | 224  | 262  | 277  | 280  | 256  | "           |
|                        | Harlingen.                     | 171  | 162  | 155  | 163  | 204  | 236  | 267  | 270  | 270  | 258  | "           |
| Windeffect.            | Helder . .                     | 167  | 193  | 183  | 147  | 189  | 183  | 195  | 194  | 178  | 171  | cm          |
|                        | Vlieland . .                   | 144  | 168  | 187  | 199  | 204  | 213  | 224  | 220  | 210  | 194  | "           |
|                        | Harlingen(a)                   | 207  | 212  | 211  | 216  | 230  | 224  | 227  | 213  | 200  | 196  | "           |
|                        | Gemidd. Vlieland en Helder (b) | 156  | 180  | 185  | 173  | 196  | 198  | 210  | 207  | 194  | 182  | "           |
| Verschil a—b . . . . . |                                | 51   | 32   | 26   | 43   | 34   | 26   | 17   | 6    | 6    | 14   | cm          |

Te Helder valt het grootste windeffect volkomen, te Vlieland bijna geheel, samen met den hoogsten astronomischen stand. Een hoogere stand had daar bij dit getij en met deze grootte van de windstuwing niet kunnen worden bereikt.

Te Harlingen was het windeffect tijdens den hoogsten stand reeds met een tweetal decimeters afgenomen. De oorzaak hiervan mag men in den sterken stroom die op dat oogenblik naar de Zuiderzee trok zien. De stuwingen in de Waddenzee tusschen Vlieland en Helder eenerzijds en Harlingen anderzijds (laatste regel van tabel 5) zijn kleiner dan men op grond van windrichting en -snelheid alleen (opwaaiing) zou verwachten.

Formule (23) geeft om 9 uur voor deze stuwing een waarde van omstreeks 55 cm, die geleidelijk afneemt tot 20 cm om 6 uur 'smorgens. De kleine waarden om 3, 4 en 5 uur staan in verband met den verlagenden

<sup>1)</sup> Deze cijfers wijken een weinig af van die in tabel VIII van de brochure van den heer GALLÉ omdat de berekening der astronomische standen is geschied op een andere wijze, waarbij meer partieele getijden in rekening zijn gebracht.

invloed van de Zuiderzee, die blijkbaar te Harlingen grooter is dan het gemiddelde te Helder en Vlieland.

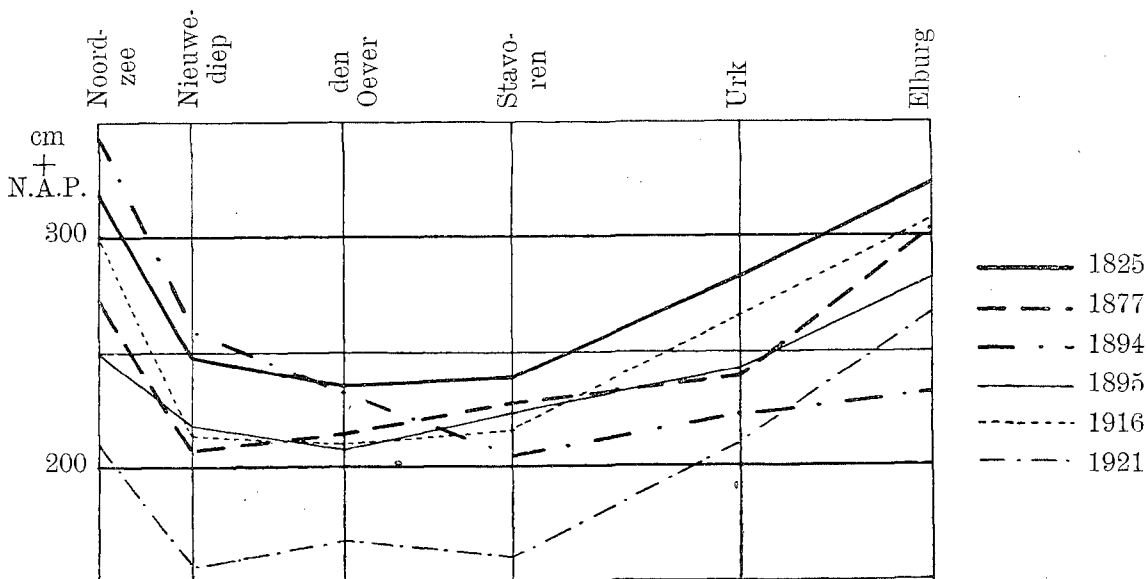
De verschillen tusschen de beide stormvloedën komen het duidelijkst uit wanneer men de figuren 23, 22 en 24 voor den storm van 1877 vergelijkt met de overeenkomstige teekeningen voor dien van 1894, nl. de nummers 10, 26 en 25.

Na deze beschouwingen omtrent de verschillende het meest op den voorgrond tredende stormen kan men nog het volgende opmerken. Wanneer bij een stormvloed van hetzelfde type als 1894 de stroom naar de Zuiderzee zwakker is, b.v. doordat de Zuiderzee gedurende de vorige getijden reeds vrij ver was gevuld, zal het windeffect te Harlingen grooter kunnen worden dan 230 cm. Dit heeft plaats gevonden in 1825. De stuwing te Harlingen is bij dien storm vermoedelijk 250 cm geweest, ofschoon de stuwing in de zeegaten iets kleiner bleef dan in 1894 en de wind ook niet sterker was.

Bij den storm van Januari 1916 was het windeffect in de zeegaten vrijwel even groot als in 1894. Het viel echter *later*, nl. na hoogwater, toen de stroom door de zeegaten niet sterk meer was. In Harlingen werd de waarde van 255 bereikt; op dat oogenblik was de stroom naar de Zuiderzee niet groot meer en nam daarna nog verder af, zoodat de Zuiderzee-invloed, evenals in 1825, klein was.

Bij de andere stormvloedën zijn deze groote stuwingen te Helder, Vlieland en Harlingen niet voorgekomen.

In figuur 27 zijn de waterstanden op eenige belangrijke punten schematisch voor enkele interessante stormvloedën aangegeven. Duidelijk blijkt de invloed van den tijd die voor de vulling van de Zuiderzee beschikbaar is geweest: bij den storm van 1894 is de waterstand het verst van den evenwichtsstand verwijderd gebleven.



Figuur 27.

## VI. OVERZICHT DER BESCHOUWINGEN EN BEREKENINGEN.

§ 28. *Inleiding.* De Staatscommissie heeft langs drie verschillende wegen getracht een antwoord op de haar gestelde vraag te vinden.

In de eerste plaats is een rekenwijze gevolgd, waarvan het lid der Commissie, de heer P. H. GALLÉ in zijn in 1917 verschenen verhandeling: „Stormvloed en Noordzee- en Zuiderzeekusten”<sup>1)</sup> het voorbeeld heeft gegeven. Zij komt hierop neer dat uit de bekende gegevens over de opwaaiing wordt afgeleid wat de invloed van een storm op de na de afsluiting overgebleven watervlakte, de Waddenzee, zal zijn.

Een geheel andere methode is die, welke het lid der Commissie, Dr. Ir. C. W. LELY in 1921 in zijn proefschrift: „De invloed van de Zuiderzee op de stormvloedstanden langs de Friesche kust”<sup>2)</sup>, heeft uiteengezet. Hij behandelt het vraagstuk door uit een zeer uitgebreid waarnemingsmateriaal af te leiden wat men den „verlagenden invloed” kan noemen, dien de Zuiderzee op de stormvloedstanden aan de Friesche kust heeft. Dien invloed eenmaal kennende, kan men gemakkelijk berekenen hoeveel hooger, als hij na de afsluiting niet meer bestaat, de bedoelde standen zullen worden.

De derde methode, met welke ontwikkeling en toepassing vooral de voorzitter en de tweede-secretaris der Staatscommissie zich hebben beziggehouden, tracht iets dieper in het mechanisme der verschijnselen door te dringen; zij gaat uit van de wiskundige vergelijkingen die de beweging van het water bepalen. Om het terrein te verkennen en de methode op de proef te stellen heeft men die in de eerste plaats op de normale getijbeweging, zooals die thans is, toegepast. Nadat daarbij bevredigende uitkomsten waren verkregen, is men er toe overgegaan de getijden te berekenen die na de afsluiting in de Waddenzee zullen bestaan; de vergelijking der uitkomsten met die, welke op den tegenwoordigen toestand betrekking hebben, doet den invloed van de afsluiting op de getijconstanten kennen.

Vervolgens is de derde methode ook op de door een storm veroorzaakte waterstanden toegepast; zij leidt tot een wijze van beschouwen, zooals reeds in 1917 het lid der Commissie, de heer J. KOOPER had gebezigd<sup>3)</sup>.

Het behoeft nauwelijks gezegd te worden op hoeveel moeilijkheden men bij een onderzoek van dezen aard stuit. De verschijnselen zijn zoo ingewikkeld dat men niet kan hopen zich door theoretische beschouwingen van alle bijzonderheden rekenschap te geven. Ook deed zich, ondanks de pogingen om door nieuwe waarnemingen de toestanden beter te leeren kennen, nog menigmaal het gemis aan kennis der feiten gevoelen, terwijl eindelijk, om een berekening mogelijk te maken, veelal benaderende en vereenvoudigende onderstellingen die men liever verneden had, te hulp moesten worden geroepen.

De drie methoden zijn in de uitwerking niet geheel gescheiden gebleven. In het bijzonder is bij de eerste en de tweede gebruik gemaakt van hetgeen volgens de derde over de gewone getijbeweging en over den toestand in de zeegaten was gevonden.

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 7.

<sup>2)</sup> „ „ n<sup>o</sup>. 11.

<sup>3)</sup> „ „ n<sup>o</sup>. 8.

Het zal daarom doelmatig zijn, eerst de derde methode en haar toepassing op de getijden te behandelen (§§ 29—53); daarop zullen, na eenige inleidende beschouwingen (§§ 54—63), de eerste (§§ 64—67) en de tweede (§§ 68—80) wijze van berekenen volgen, en eindelijk de behandeling van den storminvloed naar de derde methode (§§ 81—115).

#### A. DE DERDE METHODE EN HAAR TOEPASSING OP DE GETIJDEN.

§ 29. *De richting der waterbewegingen veelal door de geulen bepaald.*  
 Bij een deel der berekeningen zal gebruik worden gemaakt van de omstandigheid dat, zoolang het water niet te hoog staat, de richting der stroomen vrijwel door den loop der geulen is aangewezen. Door het geheele gebied in een stelsel van geulen te verdeelen wordt het vraagstuk tot dat van de waterbeweging in een net van kanalen teruggebracht. Bij de eerste berekeningen naar de derde methode en sommige latere, waarbij het er om te doen was, den invloed van deze of gene omstandigheid eenigermate te schatten, is van een vrij eenvoudig geulenstelsel gebruik gemaakt. De definitieve uitkomsten voor de getijden zijn echter verkregen door stelsels van geulen aan te nemen, die zich meer en meer bij den werkelijken toestand aansluiten. Daarbij werd rekening gehouden met het feit dat de diepte van een geul menigmaal niet in elk punt van een dwarsdoorsnede dezelfde is; vele geulen worden daarom in een zeker aantal naast elkander liggende (die men veelal als hoofdgeul en een of meer bijgeulen onderscheiden kan) verdeeld. In het bijzonder werden ook in acht genomen de bij laag water droogvallende banken.

In §§ 45, 46, 89 en 98 vindt men bijzonderheden omtrent in verschillende gevallen aangenomen geulenstelsels.

Bij de behandeling der stormvloed en is aan het einde der berekening nagegaan of de stroomen in de verschillende naast elkander liggende geulen inderdaad, zooals bij het werken met vooraf aangenomen stroombanen ondersteld is, naast elkander kunnen bestaan zonder door den overgang van water van het eene gebied naar het andere, gestoord te worden. Aan deze voorwaarde was niet voldaan, en daarom werd (§ 92) ten slotte een berekening uitgevoerd met vloeiende, niet meer aan geulen gebonden, stroomlijnen.

Sommige der bij het onderzoek gebruikte stellingen gelden ook bij een willekeurige configuratie van den bodem, waarbij niet van te voren bepaalde stroomrichtingen kunnen worden aangewezen.

§ 30. *De voornaamste krachten die bij de waterbeweging werkzaam zijn.*  
 In de eerste plaats komen de krachten in aanmerking, die uit een verhang en uit de werking van den wind voortvloeien.

Het verhang heeft een horizontale kracht ten gevolge, in de richting in welke de waterspiegel het snelst daalt, en wel is die kracht per massa-eenheid

$$gi,$$

als  $g$  de versnelling van de zwaartekracht is, en  $i$  het verhang, nl. de verandering der waterhoogte per eenheid van afstand.

Drukt men alles in de eenheden van het centimeter-gram-seconde-stelsel uit, dan is  $g = 981$ .

Het verhang  $i$  bedraagt bij de getijbeweging zelden meer dan 3,5 cm per km; bij stormvloed en kan het wel eens meer dan 10 cm per km bedragen.

De wind oefent een horizontaal gerichte kracht uit, die per oppervlakte-eenheid een zekere grootte  $F$  heeft. Was deze kracht, in plaats van op het oppervlak te werken, gelijkmatig over de geheele diepte van het water verdeeld, dan zou, als  $q$  de diepte is, de kracht per volume-eenheid  $\frac{F}{q}$  bedragen en per massa-eenheid

$$\frac{F}{\rho q},$$

als  $\rho$  de dichtheid is. Dit staat gelijk met de kracht die uit een verhang

$$i = \frac{F}{g \rho q} \quad (4)$$

zou voortvloeien.

Onder de beweegkrachten is niet opgenomen de getijverwekkende kracht. Voor zoover deze op het water van de Zuiderzee en de Waddenzee zelf werkt, is zij zoo zwak dat van haar invloed kan worden afgezien. De getijden in de Zuiderzee ontstaan doordat de golven, die door de getijverwekkende krachten in verwijderde deelen van den oceaen worden opgewekt, door de zeegaten binnendringen. Wil men de waterbeweging berekenen, die aldus in de Zuiderzee en Waddenzee ontstaat, dan mag men de schommelingen in de waterhoogte in de Noordzee even buiten de zeegaten als gegeven beschouwen. Het staat vast dat de waterstanden op die plaatsen door de afsluiting niet merkbaar zullen veranderen.

§ 31. *De weerstand die zich tegen de waterbeweging verzet.* Terwijl bij snelheden eener vloeistof beneden een zekere grens (die van de afmetingen der vloeistofnassa afhangt) de weerstand evenredig met de stroomsnelheid is, neemt hij sneller dan deze laatste toe, zoodra men boven de „kritische snelheid” komt. Dit hangt hiermede samen dat de banen der waterdeeltjes niet meer rechte of flauw gebogen lijnen zijn; er ontstaan wervelbewegingen, die de verschijnselen in hooge mate compliceeren. Bij de te behandelen vraagstukken heeft men steeds met zulke „turbulente” bewegingen te doen.

Terwijl door de wervels de verschillende waterlagen voortdurend dooreengeroerd worden, wordt de verplaatsing dier lagen, in hun geheel genomen, en dus het ophoopen van water op de eene en het wegvloeien van de andere plaats bepaald door hetgeen men de „stroomsnelheid” kan noemen. Men kan die definieeren als de gemiddelde snelheid, die in een bepaald punt bestaat gedurende een tijdsverloop, dat lang is in vergelijking met de tijdsintervallen, gedurende welke de snelheidswisselingen bij de turbulente bewegingen zich voordoen. De stroomsnelheid zal nu in den regel in de doorsnede van een geul van punt tot punt veranderen, maar op elk oogenblik zal zij over de geheele doorsnede een zekere gemiddelde waarde  $v$  hebben <sup>1)</sup>. Deze wordt bedoeld als men zonder meer van de snelheid spreekt, die op zeker punt (d.w.z. in zekere doorsnede) en op zeker oogenblik bestaat. Zij hangt samen met het volume water dat per tijdseenheid door de doorsnede stroomt. Is nl.  $b$  de breedte der geul en  $q$  de diepte, dan is dat doorgestroomde volume, dat men als maat voor den stroom in de geul kan beschouwen,

$$s = b q v. \quad (5)$$

De weerstand die per lengte-eenheid op de vloeistof in een kanaal werkt, is tegengesteld aan de snelheid  $v$  gericht en kan bij benadering evenredig met de tweede macht daarvan gesteld worden. Hij is klaarblijkelijk evenredig met de breedte  $b$  en kan dus in grootte worden voorgesteld door het product van  $b v^2$  met een constante. Schrijft men voor deze laatste

$$\frac{g \rho}{C^2},$$

zoodat de grootte van den weerstand per lengte-eenheid

$$b \frac{g \rho}{C^2} v^2 \quad (6)$$

wordt, dan is  $C$  de constante van EYTELWEIN. Deze is des te kleiner naarmate de weerstand grooter is.

De snelheid bij een stationairen „standvastigen” verhangstroom wordt bepaald door de voorwaarde, dat de weerstand per lengte-eenheid gelijk is

<sup>1)</sup> Wanneer het noodig is de stroomsnelheden op verschillende diepten te onderscheiden (§§ 35 en 55) zullen deze door  $v$  worden voorgesteld en zal voor de gemiddelde snelheid over de geheele diepte  $\bar{v}$  worden geschreven.

aan de uit het verhang voortvloeiende kracht, die per massa-eenheid  $g i$ , en dus per lengte-eenheid van het kanaal  $b q g e i$  bedraagt. Dit geeft

$$v = C \sqrt{q i}. \tag{7}$$

Men leidt gemakkelijk uit het voorgaande af dat de dimensies van  $C$  die zijn van den vierkantswortel uit een lengte, gedeeld door een tijd. De numerieke waarde zal in het vervolg in eenheden van het C.G.S.-stelsel worden opgegeven, van welke eenheden meestal bij de berekeningen zal worden gebruik gemaakt <sup>1)</sup>.

§ 32. *De constante van Eytelwein.* De in het jaar 1919 verrichte stroommetingen (§ 12) leerden dat de constante  $C$  niet veel verschilt van een door BAZIN <sup>2)</sup> voor kanalen met aarden wanden aangegeven waarde

$$C = 100: \sqrt{0,028 \left(1 + \frac{125}{q}\right)}, \tag{8}$$

waarin  $q$  de diepte van het kanaal in centimeters is.

Bij de eerste berekeningen der getijden (§ 45, a) zijn deze waarden van  $C$ , die varieeren van  $450 \frac{\text{cm}^{1/2}}{\text{sec}}$  tot  $600 \frac{\text{cm}^{1/2}}{\text{sec}}$ , gebruikt.

Om de juistheid ervan op de proef te stellen is de berekening herhaald met waarden van  $C$ , die ongeveer 20 % hooger of ongeveer 20 % lager zijn. De daarbij verkregen uitkomsten stemden zonder twijfel minder goed met de getijwaarnemingen overeen dan die, welke met de uit (8) volgende waarden van  $C$  waren gevonden. Eerst nadat op deze wijze was gebleken dat men met BAZIN's waarden op den goeden weg was, werden die waarden bij meer ingewikkelde geulennetten gebezigd (§ 45, b) (vergelijk verder bijlage 9).

Eindelijk heeft men bij sommige berekeningen nog met een andere waarde van  $C$  gewerkt.

In den zomer van 1921 is nl. getracht door opzettelijk daarvoor ingerichte stroommetingen in Vlie- en Texelstroom de constante  $C$  voor diepe geulen te bepalen (§ 14).

Uit deze metingen, die in 1923 herhaald werden, bleek dat de uit de formule van BAZIN volgende waarden van 550 à 600 voor deze geulen met een diepte van meer dan 16 meter een weinig te groot zijn. Uit de metingen volgde een gemiddelde waarde van 530, terwijl een afname van  $C$  in geulen met geringere diepte niet kon worden geconstateerd. Bij de na dien tijd uitgevoerde getijberekeningen is daarom voor alle geulen, ongeacht de diepte,  $C$  op 530 gesteld.

Ook voor de toepassing der derde methode op de stormvloeden is de kennis van den weerstandscoëfficiënt noodig. Men heeft voor  $C$  bij dit vraagstuk een waarde, iets kleiner dan de zoeven genoemde, nl. 500 aangenomen, aldus rekening houdende met den invloed dien hevige golfbeweging op den weerstand kan hebben (§§ 90 en 114, h).

§ 33. *Invloed van de aswenteling der aarde.* Er moeten nog eenige andere krachten vermeld worden, die bij de waterbewegingen in het spel zijn, en die, althans bij sommige becijferingen, in rekening zijn gebracht. De eerste daarvan is de zoogenaamde kracht van CORIOLIS, die aan de aswenteling der aarde is te danken. De horizontale component dezer kracht, en dit is de eenige die in aanmerking komt, staat loodrecht op de snelheid  $v$  van de vloeistof. Haar richting wordt gevonden door de richting der snelheid over een rechten hoek te draaien in een richting die (op het noordelijk halfrond), van boven gezien, met die van de beweging der wijzers

<sup>1)</sup> Bij het gebruik van deze eenheden worden voor de numerieke waarden van  $C$  getallen gevonden, die tienmaal zoo groot zijn als de in de waterbouwkunde gewoonlijk gebruikte. Daar zijn de eenheden meters en seconden.

Een  $C$  van 530 ( $\text{cm}^{1/2}$  per sec) komt dus overeen met 53 ( $\text{m}^{1/2}$  per sec) volgens de gebruikelijke schrijfwijze.

<sup>2)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 57.

van een uurwerk overeenkomt. De grootte der kracht van CORIOLIS, per massa-eenheid, krijgt men door de stroomsnelheid  $v$  met  $2 \omega \sin \varphi$  te vermenigvuldigen, waarbij  $\omega$  de hoeksnelheid der aarde en  $\varphi$  de geografische breedte is.

Nu is

$$\omega = \frac{2\pi}{24.60.60} = 0,0000727$$

en op een breedte van  $53^\circ$  wordt

$$2 \omega \sin \varphi = 0,000116.$$

Bij een stroomsnelheid van 100 cm per sec wordt de kracht van CORIOLIS 0,0116,

even groot als door een verhang

$$\frac{0,0116}{g} = 0,0000118,$$

d.w.z. van 1,18 cm per km zou worden teweeggebracht.

Dat voor de beantwoording der aan de Staatscommissie gestelde vraag de hier beschouwde kracht van eenige beteekenis kan zijn, wordt duidelijk als men bedenkt dat thans, nu de Zuiderzee open is, gedurende een storm een tijd lang een stroom naar binnen bestaat, en later bij het leegloopen der Zuiderzee een stroom in tegengestelde richting. Aan den eersten, in zuidelijke richting gaanden, stroom beantwoordt een kracht van CORIOLIS die naar het Westen, aan den tweeden stroom een kracht die naar het Oosten gericht is. Na de afsluiting der Zuiderzee zullen, met diestroomen, deze krachten verdwijnen; het zal zijn alsof nieuwe krachten in tegengestelde richting werden ingevoerd. Zoo zal na de afsluiting, op een oogenblik waarop thans de binnenwaarts gerichte stroom de grootste snelheid heeft, het water, in vergelijking met den tegenwoordigen toestand, naar de Friesche kust worden opgezet.

Het verdient hierbij opmerking dat, indien de waterbeweging tot vaste kanalen beperkt was zonder de mogelijkheid van overgang van het eene in het anderè, de kracht van CORIOLIS, loodrecht op de stroomrichting staande, slechts bij elk kanaal een hoogteverschil tusschen de beide zijden ervan zou kunnen teweegbrengen. De geulen zijn echter niet geheel van elkander gescheiden, vooral niet bij hoge stormvloeden, zooals reeds in § 29 werd opgemerkt. Vandaar de noodzakelijkheid om bij de behandeling dier vloeden met de kracht van CORIOLIS rekening te houden; de invloed daarvan op den waterstand kan tot bijna 20 cm bedragen.

De invloed bij de getijbeweging is kleiner en werd aanvankelijk bij de behandeling dezer beweging verwaarloosd. Intusschen is na afloop der berekeningen (§ 45) gebleken, dat de overeenstemming van de uitkomsten met de werkelijkheid op sommige plaatsen iets beter wordt als men de kracht van CORIOLIS in rekening brengt. De invloed dezer kracht is trouwens uit de waarnemingen aan de peilschalen aan weerszijden van het Vlie gebleken (§ 16).

De getijlijnen aan de beide zijden van het zeegat opgeteekend, doen zien, dat, zoolang de vloedstroom bestaat, het water aan den kant van Vlieland het hoogst staat, terwijl gedurende den ebstroom het tegengestelde het geval is (bijlage 6).

Het verschil is van de orde van grootte van 10 cm, wat volgens de theorie overeenkomt met een stroomsnelheid van omstreeks 1,4 m per sec, zooals inderdaad voorkomt.

Wat de aardrotatie betreft, moge nog verwezen worden naar een theoretisch onderzoek van EKMAN <sup>1)</sup>, dat voor diepe zeeën tot merkwaardige uitkomsten geleid heeft. Wordt door een standvastigen over het oppervlak strijkenden wind het water in beweging gebracht, dan ontstaat bij zeer groote diepte een toestand, waarbij de verschillende horizontale waterlagen

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>s. 58 en 59.

niet in dezelfde richting in beweging zijn, maar de bewegingsrichting van iedere waterlaag ten opzichte van die der daarboven liggende laag op noorderbreedte naar rechts, en op zuiderbreedte naar links afwijkt. Verder neemt wegens de weerstanden de snelheid naar beneden toe gestadig af, terwijl aan het oppervlak de stroom een zekeren hoek naar rechts (noorderbreedte) of naar links (zuiderbreedte) met de windrichting maakt. Men zou dus het systeem der snelheden op verschillende diepten kunnen voorstellen door een wenteltrap met naar beneden toe afnemenden straal.

Intusschen kon bij de diepten en de afmetingen der Zuiderzee van dit alles worden afgezien; de hoogte van een volle wenteling der trap zou nl. de diepte vele malen overtreffen. In verband daarmee wijkt de richting van een door den wind teweeggebrachten driftstroom zoo weinig van de richting van den wind af, dat zij geacht kan worden daarmee samen te vallen.

Een berekening (zich aansluitende aan hetgeen in § 55 zal worden besproken) leert dat b.v. bij een uitgestrekte watermassa van 4 meter diepte, en bij een oppervlaktesnelheid van een meter per seconde, de afwijking een tiental graden bedraagt. Zij zal nog kleiner zijn wanneer door geulen de bewegingsrichting min of meer is voorgeschreven. Uit de waarnemingen in de Zuiderzee is dan ook een afwijking als de nu bedoelde niet gebleken.

Over de door de aswenteling der aarde veroorzaakte centrifugaalkracht behoeft niet gesproken te worden, daar deze kracht reeds in de zwaartekracht, zooals men die waarneemt, begrepen is.

§ 34. *Krachten die van de tweede macht der snelheid afhangen.* In sommige gevallen is de centrifugaalkracht, die bij een beweging in gebogen stroomlijnen bestaat, van invloed. Ligt, zooals men mag aannemen, de stroomlijn in een horizontaal vlak, dan is dat ook met de centrifugaalkracht het geval. Zij is, loodrecht op de stroomlijn, naar dien kant gericht, waarheen deze haar bolle zijde keert en bedraagt per massa-eenheid

$$\frac{v^2}{r},$$

als  $r$  de kromtestraal der stroomlijn is.

Is  $r = 8$  km of  $8 \times 10^5$  cm en  $v = 100$  cm per sec, dan is  $\frac{v^2}{r} = 0,012$ ; de centrifugaalkracht beantwoordt dan aan een verhang van ongeveer 1,2 cm per km.

Terwijl de centrifugaalkracht loodrecht op de stroomlijn staat, is er een tweede kracht, eveneens evenredig met de tweede macht der snelheid, die langs de stroomlijn gericht is. Deze kracht, die men de kracht van BERNOULLI kan noemen, doet zich gevoelen zoodra langs de stroomlijn de snelheid verandert. De kracht is gericht naar den kant waar  $v^2$  kleiner wordt, terwijl haar grootte, ook weder voor de massa-eenheid der vloeistof, gegeven wordt door de verandering per eenheid van afstand, die het halve snelheidsquadraat ondergaat als men langs de stroomlijn voortgaat.

De kracht van BERNOULLI drijft het water van de plaats van groote, naar die van kleine snelheid. In sommige gevallen brengt zij aldus bepaalde hoogteverschillen teweeg, waardoor zij in evenwicht wordt gehouden, en wel is het hoogteverschil tusschen twee punten eener stroomlijn waar de snelheden  $v$  en  $v'$  bestaan

$$\frac{v^2 - v'^2}{2g}.$$

Voor  $v = 150$  cm per sec en  $v' = 0$  wordt dit ongeveer 11 cm.

§ 35. *Ongelijke snelheden op verschillende hoogten.* Niet altijd kan worden volstaan met de beschouwing der in § 31 genoemde over de geheele diepte gemiddelde snelheid. Met name wanneer de invloed van den wind, dus van een op het oppervlak werkende kracht moet worden nagegaan,

zal het noodig zijn de snelheden van de verschillende boven elkander liggende waterlagen te onderscheiden (verg. §§ 19 en 20). Er zijn zelfs gevallen, waarin de onderste lagen zich in tegengestelde richting als de bovenste bewegen (§ 54).

Zoodra nu de bewegingen der lagen elk afzonderlijk in het oog moeten worden gevat heeft men niet genoeg aan de kennis van den weerstand dien de watermassa in haar geheel genomen ondervindt, maar moet men rekenen met den wrijvingsweerstand die aan het grensvlak van twee lagen door de eene op de andere wordt uitgeoefend.

Voor het geval van kleine snelheden, en dus van niet turbulente beweging, mag men aannemen dat deze kracht tusschen de vloeistofmassa's aan weerskanten van een horizontaal vlak evenredig is met de verandering der horizontale snelheid  $v$  per eenheid van afstand in verticale richting, d.w.z. met het differentiaalquotient  $\frac{dv}{dx}$ , als men de  $X$ -as verticaal richt.

De kracht per eenheid van oppervlak zou dan kunnen voorgesteld worden door het product van  $\frac{dv}{dx}$  met een constanten, van den aard der vloeistof afhankelijk, coëfficiënt. Bij deze wet voor de inwendige wrijving zou men een regel voor den door den bodem uitgeoefenden weerstand kunnen voegen. Men zou dezen evenredig kunnen stellen met de snelheid  $v$  waarmee het water zich over den bodem beweegt.

Nu de bewegingen turbulent zijn is alles veel minder eenvoudig en verkeert men aangaande de wetten voor den weerstand in groote onzekerheid. Bij gebrek aan beter is bij de behandeling van sommige vraagstukken (§ 55) aangenomen, dat de wrijving tusschen twee horizontale lagen evenredig is met  $\left(\frac{dv}{dx}\right)^2$  en dus per vlakke-eenheid kan worden voorgesteld

door  $\mu \left(\frac{dv}{dx}\right)^2$ , en dat de wrijving aan den bodem evenredig is met de tweede macht der stroomsnelheid daar ter plaatse, zoodat men ervoor kan schrijven  $\nu v^2$ . Ofschoon deze onderstellingen niet anders dan een ruwe benadering van de werkelijkheid kunnen geven, schijnen zij voor het doel waarvoor de berekeningen moesten dienen, voldoende.

Later (§ 55) zal worden vermeld hoe de coëfficiënten  $\mu$  en  $\nu$  met de constante van EYTELWEIN samenhangen, en hoe zij uit deze laatste kunnen worden afgeleid als men weet in welke mate bij een verhangstroom de snelheid van het oppervlak naar den bodem toe afneemt.

§ 36. *De grondstellingen voor de beweging van het water in een geul.* Bij de behandeling der getijbeweging kan men de zoeven besproken complicaties laten rusten. Men kan de watermassa die zich tusschen twee dicht bij elkaar gelegen doorsneden van een geul bevindt, in haar geheel beschouwen, aan die massa de gemiddelde snelheid  $v$  toekennende, waarvan in § 31 gesproken werd. Evenzoo voert men den weerstand in, die op deze watermassa in haar geheel genomen werkt en die door de uitdrukking (6) bepaald wordt.

De snelheid  $v$ , die in het algemeen van oogenblik tot oogenblik wisselt (nl. met de periode der getijbeweging) en die in verband daarmee langs de geul van punt tot punt verandert, is de eene onbekende die moet worden berekend. De andere is de positieve of negatieve verheffing  $h$  van den waterspiegel, van den evenwichtsstand af gerekend.

Ter bepaling van de beide onbekenden dienen twee vergelijkingen, waarvan de eene verkregen wordt door op te merken, dat de verandering gedurende zekeren tijd van de tusschen twee doorsneden begrepen hoeveelheid water gelijk is aan de hoeveelheid die in dien tijd door de eene doorsnede meer dan door de andere gaat. Weet men hoeveel die twee hoeveelheden van elkaar verschillen, dan volgt daaruit hoe, tusschen de beide doorsneden in, de hoogte van het water toe- of afneemt.

De vergelijking die het verband tusschen het een en het ander uitdrukt, de zoogenaamde continuïteitsvergelijking, staat volkomen vast en de afleiding er van is zeer eenvoudig. Zij heeft den vorm

$$\frac{\partial s}{\partial x} = -b \frac{\partial h}{\partial t},$$

als  $b$  de breedte van het kanaal is, en de  $X$ -as in de richting van de lengte daarvan wordt genomen. Met  $h$  is de hoogte, van zekeren „nulstand” (eventueel den „evenwichtsstand”) af gerekend, bedoeld, zoodat als bij dien laatsten de waterdiepte  $q$  is, zij op het beschouwde oogenblik  $q + h$  bedraagt. Door  $s$  is de stroom door een doorsnede voorgesteld:

$$s = b (q + h) v. \quad (9)$$

Zoowel  $h$  als  $s$  veranderen in den regel van oogenblik tot oogenblik, en van punt tot punt. Zij zijn dus functiën van  $t$  en  $x$ .

De tweede vergelijking, die de dynamische grondslag der theorie is, geeft tot meer zwaarigheid aanleiding, want alle onzekerheid omtrent de werkende krachten doet zich bij haar gevoelen. Deze bewegingsvergelijking wordt nl. verkregen door de verandering die de snelheid in een bepaald punt der ruimte per tijdseenheid ondergaat, gelijk te stellen aan de resultante of de algebraïsche som der op de massa-eenheid werkende krachten. Ziet men nu van de kracht van CORIOLIS (§ 33) en de centrifugaalkracht (de geul als recht beschouwende) af, en evenzoo van de kracht van BERNOULLI (§ 34), wat geoorloofd is als de snelheid in de geul langzaam genoeg van punt tot punt verandert, dan bevat de bewegingsvergelijking drie termen. De eerste is de verandering der snelheid per tijdseenheid („versnellingsterm”), de tweede („verhangterm”) stelt de uit het verhang voortvloeiende kracht en de derde („weerstandsterm”) den weerstand voor.

De vergelijking luidt nl. als volgt

$$e \frac{\partial v}{\partial t} = -ge \frac{\partial h}{\partial x} + W,$$

als  $W$  de weerstand per vlakke-eenheid van den bodem voorstelt. Het teeken daarvan moet altijd tegengesteld aan dat van  $v$  zijn.

Een belangrijke vereenvoudiging ligt in de onderstelling dat, bij geschikte keus van den nulstand, de afwijkingen  $h$  van den waterspiegel van dien stand klein zijn in vergelijking met de diepte  $q$ . Dit zal bij bijna alle berekeningen worden aangenomen. Er volgt uit, dat men voor den stroom  $s$  door een doorsnede de uitdrukking (5) mag aannemen, in plaats van de werkelijke waarde (9).

§ 37. *Superpositie van bewegingstoestanden.* Was nu verder de weerstand evenredig met de eerste macht der snelheid, dan zouden de onbekende grootheden, de verheffing  $h$  en de stroom  $s$ , alsmede de veranderingen van deze van punt tot punt en van oogenblik tot oogenblik, alle alleen in de eerste macht en niet met elkaar vermenigvuldigd voorkomen. Dan zou een beginsel gelden, dat het onderzoek zeer zou vereenvoudigen, nl. het beginsel van het samenstellen of superponeeren van twee (of meer) bewegingstoestanden. Hebben de verheffing en de stroom bij één toestand de waarden  $h_1$  en  $s_1$ , en bij een anderen de waarden  $h_2$  en  $s_2$ , dan zou ook een toestand mogelijk zijn, dien men vindt door van de verheffingen en evenzoo van de stroomen, die bij die beide toestanden bestaan, wel te verstaan op dezelfde plaats en hetzelfde oogenblik, de algebraïsche som te nemen. Stelt men nl.  $h = h_1 + h_2$  en  $s = s_1 + s_2$ , dan valt elke term van de grondvergelijkingen uiteen in twee deelen, die niet anders zijn dan de waarden die de term zou hebben als alleen de eerste of alleen de tweede toestand bestond. Daaruit volgt dat, indien de toestanden 1 en 2 elk op zichzelf aan de vergelijkingen voldoen, dit ook het geval is met den toestand die door het samenstellen van 1 en 2 ontstaat.

Volgens het beginsel der superpositie kunnen de golven van den eenen toestand zonder verandering hunner amplituden op die van den anderen worden geplaatst. Iets dergelijks kan, als het beginsel mag worden aangenomen, gezegd worden van de bewegingen die de wind ten gevolge heeft; zij kunnen op eenvoudige wijze met de uit andere oorzaken voortvloeiende bewegingen worden samengesteld.

Het superpositiebeginsel faalt zoodra tweede machten of producten der onbekenden voorkomen. Het mag niet meer worden toegepast als de kracht van BERNOULLI een aanmerkelijke grootte heeft; evenmin als de veranderingen in de waterhoogte niet meer klein zijn in vergelijking met de diepte, zoodat in (9) het product  $h v$  niet mag worden verwaarloosd. En zelfs wanneer van de onnauwkeurigheden die in dit opzicht aan de toepassing van het beginsel verbonden zijn mocht worden afgezien, zal een quadratische weerstandswet die toepassing strikt genomen verbieden. Hebben de snelheden  $v_1$  en  $v_2$  dezelfde richting, dan zal de weerstand bij de resulterende beweging zijn

$$k (v_1 + v_2)^2,$$

als men ter vereenvoudiging

$$b \frac{g \rho}{C^2} = k$$

stelt. Dit is *niet* de som van de weerstanden  $k v_1^2$  en  $k v_2^2$ , die bij de snelheden  $v_1$  en  $v_2$  ieder afzonderlijk op het water zouden werken.

Intusschen, al is het superpositiebeginsel niet in alle strengheid geldig, men mag er veelal in eerste benadering gebruik van maken. Reeds oppervlakkige waarneming leert dat men in de ingewikkelde bewegingen die door verschillende gelijktijdig werkende oorzaken worden teweeggebracht de samenstellende deelen, die b.v. door den wind en de getijden worden voortgebracht, kan onderkennen, een gelukkige omstandigheid, zonder welke men vrijwel hulpeloos tegenover het vraagstuk zou staan. Men kan over de verschijnselen haast niet spreken zonder zich door het superpositiebeginsel te laten leiden en in dezen zin speelt het dan ook bij de beschouwingen en berekeningen, waartoe elk der in § 28 genoemde methoden aanleiding geeft, een rol.

Waar het kan zal getracht worden de uit de toepassing van het superpositiebeginsel voortvloeiende fouten zooveel mogelijk te vermijden of te corrigeeren. Men kan b.v. in rekening brengen dat de loop der getijden min of meer wordt gewijzigd, indien bij een storm de diepte van het water in de geulen aanmerkelijk is veranderd (§§ 47 en 66). Ook kan men, als men een bewegingstoestand uit twee componenten met de snelheden  $v_1$  en  $v_2$  samenstelt, de berekening zoo inrichten, dat de resulterende beweging aan de voor die beweging geldende vergelijking met den weerstand  $(v_1 + v_2)^2$  voldoet; dan is ten slotte in het geheel geen fout begaan.

De zaak wordt eenvoudig, als een benaderde bewegingstoestand met de snelheid  $v_1$  is gevonden en als die snelheid nu nog slechts een kleine correctie  $v_2$  behoeft. Kiest men ter vereenvoudiging de richting van  $v_1$  voor de positieve, dan is wegens de geringe grootte van  $v_2$ , onverschillig of deze snelheid positief of negatief is, ook de resulterende snelheid  $v_1 + v_2$  positief. De daarbij passende weerstand is  $-k (v_1 + v_2)^2$ , waarbij het negatieve teeken aanduidt, dat de weerstand tegengesteld aan de snelheid gericht is. Met weglating van den kleinen term  $-k v_2^2$  kan men er voor schrijven  $-k v_1^2 - 2k v_1 v_2$  en daar nu bij de bepaling van de beweging  $v_1$ , die geheel bekend is, de weerstand  $-k v_1^2$  in aanmerking is genomen, moet men bij de bepaling van  $v_2$  rekening houden met een weerstand  $-2k v_1 v_2$ . Deze is van het eenvoudige type van een eerste-machts weerstand, want de uitdrukking  $-2k v_1 v_2$  wijst aan, dat de weerstand tegengesteld gericht aan  $v_2$  en evenredig daarmee is. Alleen is de coëfficiënt  $2k v_1$ , waarmee de snelheid  $v_2$  vermenigvuldigd moet worden, afhankelijk van de snelheid  $v_1$  der reeds onderzochte beweging (zie verder § 130).

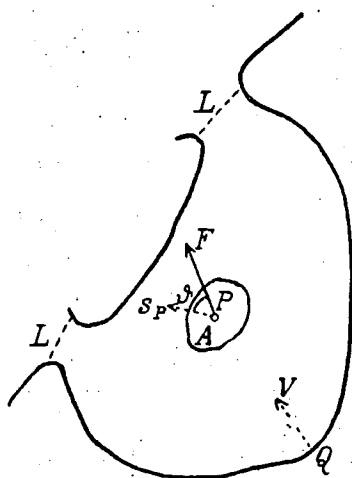
§ 38. *Verbetering van een benaderde oplossing.* Thans moge de aandacht gevestigd worden op een methode, die kan worden gevolgd om een niet geheel juiste oplossing te beoordeelen en, zoo noodig, te verbeteren (§§ 130, 151—153).

Stel, dat men voor een of ander geval waarden van de waterhoogten en de stroomsnelheden heeft gevonden, die wel aan de continuïteitsvergelijking, maar niet geheel aan de bewegingsvergelijking voldoen. Die waterhoogten en snelheden kenmerken dan een bewegingstoestand die niet zonder meer bestaan kan, maar men kan zich voorstellen, dat men de vloeistor dwingt dezen toestand wél aan te nemen, door op de deeltjes geschikt gekozen uitwendige krachten te laten werken. Van deze krachten, die voor een oogenblik met de letter  $F$  kunnen worden aangeduid, kan men richting en grootte uit de bewegingsvergelijkingen afleiden. Men kan nl. in deze termen invoeren, die uitwendige krachten voorstellen en men kan aan die termen zoodanige grootte en algebraïsch teeken geven, dat de leden der vergelijkingen, die eerst van elkaar verschilden, gelijk worden.

Om nu van den zoo gevonden denkbeeldigen toestand tot de werkelijkheid over te gaan, moet men de krachten  $F$  opheffen, of wel, wat op hetzelfde neerkomt, een stelsel daaraan gelijke en tegengestelde krachten, men kan zeggen de krachten  $-F$ , invoeren. Om dus de noodige correctie te vinden moet men de wijzigingen nagaan, die deze krachten  $-F$  in den toestand brengen. Voldeed nu de oplossing, waarvan men uitging, op weinig na aan de voorwaarden van het vraagstuk en zijn dus de „residueele krachten”, zooals men het stelsel  $-F$  noemen kan, klein, d.w.z. klein in vergelijking met de krachten die in het systeem werken, dan vergemakkelijkt dit de berekening dier wijzigingen. Allicht kan men, nu nog slechts kleine grootheden bepaald behoeven te worden, met een ruwe schatting volstaan.

De in §§ 33 en 34 genoemde krachten kunnen, zoo zij nog niet in rekening zijn gebracht, tot de residueele krachten worden gerekend.

§ 39. *Een reciprociteitsstelling.* Voor stationaire toestanden, in die gevallen waar de vergelijkingen lineair zijn, geldt een stelling, waarvan bij sommige berekeningen partij is getrokken. Men beschouwe (verg. figuur 28)



Figuur 28.

een watervlakte, zooals de Zuiderzee, deels door kusten afgesloten en verder langs zekere lijnen  $L$  aan den oceaan grenzende (zeegaten). Men vatte voorts twee bewegingstoestanden I en II in het oog. Bij den eersten werkt op het water beneden een zeker klein deel  $A$  van het oppervlak, bij het punt  $P$  liggende, een standvastige horizontaal gerichte kracht in deze of gene richting, welke kracht per volume-eenheid  $F$  bedraagt. Onder den invloed daarvan zal een stationaire toestand ontstaan, die geheel bepaald zal zijn, als men aanneemt, dat in elk punt der lijnen  $L$  de hoogte van het water gegeven is, stel  $h = 0$ , en verder bedenkt, dat overal aan de kust de stroom loodrecht daarop nul moet zijn. Zij  $Q$  een punt van de kust en  $h_Q$  de verhooging, die de waterspiegel daar ter plaatse door de werking der krachten  $F$  zal ondergaan.

Bij den toestand II (die, in tegenstelling met den vorigen, denkbeeldig is) bestaan geen krachten zooals  $F$ , maar wordt een strooming teweeggebracht, doordat aan de kust, in de nabijheid van het punt  $Q$ , voortdurend water van buiten af wordt toegevoerd, en wel per seconde een constant volume  $V$ . Laat men nu ook voor dezen toestand in alle andere punten van de kust en langs de lijnen  $L$  dezelfde voorwaarden gelden als bij I, dan is de door dat instorten van water veroorzaakte strooming geheel bepaald.

In het punt  $P$  zal de stroom een bepaalde richting hebben en door een verticaal vlak, loodrecht op die richting, per tijdseenheid een bepaald volume water doen gaan. Geeft men aan het vlak de gedaante van een rechthoek met één zijde in het wateroppervlak en deelt men het doorstroomende volume door de lengte van die zijde, dan krijgt men het getal  $s_P$ , dat als maat voor den stroom kan dienen.

Is nu  $\vartheta$  de hoek, dien  $s_P$  met de richting der kracht  $F$  maakt, dan geldt de betrekking

$$h_Q = - \frac{A F s_P \cos \vartheta}{g_Q V}, \quad (10)$$

waardoor de oplossing van geval I tot die van geval II is teruggebracht. Weet men, hoe zich de door het instorten van water ergens aan de kust veroorzaakte strooming over het watervlak verdeelt, dan kan men daaruit de niveauveranderingen afleiden, die aan de kusten door de „residueele krachten” (§ 38) worden teweeggebracht. Men verdeelt daartoe het gebied in kleine deelen  $A$ , bepaalt met verg. (10) voor elk deel den invloed van de aldaar werkende krachten  $F$  op den waterstand in een uitgekozen punt  $Q$  van de kust, en neemt ten slotte de algebraïsche som van alle waarden  $h_Q$ .

Strikt genomen zou men bij de toepassing der stelling moeten uitgaan van een nauwkeurige oplossing van vraagstuk II, verkregen met inachtneming van alle voorwaarden en van de waarden, die aan de weerstandscoëfficiënten onder de bestaande omstandigheden moeten worden toegekend.

Intusschen, wanneer de residueele krachten klein zijn, kan bij de berekening van hun invloed met een ruwe benadering worden volstaan en zal het voldoende zijn, geheel of bijna zonder berekening, te schatten hoe zich in geval II de stroom over het gebied verdeelt. Dan zal ook van de fout kunnen worden afgezien, die men begaat door de residueele krachten als standvastig te beschouwen, terwijl zij allicht van oogenblik tot oogenblik veranderen. Men merke hierbij op dat, zooals uit den verderen loop van het onderzoek zal blijken, de bewegingsverschijnselen veelal weinig verschillen van die, welke bij een stationairen toestand zouden kunnen voorkomen; zijn de afwijkingen gering, dan zullen zij bij werkingen, die toch al zwak zijn, kunnen worden verwaarloosd.

Het bewijs der reciprociteitsstelling eischt vrij lange mathematische ontwikkelingen (§ 133), maar ook zonder de hulp daarvan kan men zich eenigszins van verg. (10) rekenschap geven. Men ziet gemakkelijk in dat, wanneer in het punt  $P$  een kracht werkt tegen den stroom in die door het instorten van water in het punt  $Q$  ontstaat, ( $\vartheta = 180^\circ$ ,  $\cos \vartheta = -1$ ) die kracht water naar  $Q$  toe zal drijven, zoodat aan de kust aldaar een *positieve* verhooging ontstaat. Evenzoo dat het tegenovergestelde het geval zal zijn als de kracht  $F$  de richting van den stroom  $s_P$  heeft, en het is ook begrijpelijk dat een kracht loodrecht op dien stroom geen invloed op den waterstand in het punt  $Q$  heeft; zij brengt het water noch in de richting naar dat punt toe, noch in de tegengestelde in beweging.

Het verdient nog opmerking, dat in geval II de stroom in elk punt  $P$  evenredig zal zijn met de per tijdseenheid ingestorte waterhoeveelheid  $V$ . Dientengevolge worden, zooals het geval moet zijn, de uitkomsten onafhankelijk van de waarde, die men in het denkbeeldige geval II aan  $V$  toekent.

§ 40. *Nadere beschouwing van de drie termen in de bewegingsvergelijking* (§ 36). Er zijn gevallen denkbaar, waarin een dezer termen ontbreekt.

a. Is er geen weerstand, dan kan men gemakkelijk uit de formules de voortplantingsnelheid van golven afleiden. Men vindt daarvoor

$$\sqrt{gq},$$

wat in enkele zeer diepe geulen in en nabij de zeegaten 1500 cm per sec kan bedragen.

In het grootste deel van het gebied wisselt de diepte van ongeveer 400 tot ongeveer 700 cm, waaraan een voortplantingsnelheid van 630 à

830 cm per sec beantwoordt. Door vermenigvuldiging hiervan met de periode der getijbeweging kan men de lengte der getijgolven bepalen. Aan de periode van het hoofdgetij 44700 sec (12 uur 25 min) beantwoordt een golflengte van 280 à 370 km. Hieruit blijkt, dat de afmetingen der Zuiderzee niet geheel tegenover de golflengte te verwaarloozen zijn; zij kunnen een aanzienlijk deel daarvan zijn (verg. de waarden van  $\kappa$  in tabel 7).

Ofschoon bij nauwkeuriger berekeningen met de weerstanden rekening moet worden gehouden, zijn de nu gevonden getallen voldoende om de phaseverschillen, die bij de getijbeweging in de Zuiderzee voorkomen, begrijpelijk te maken.

b. Indien in een kanaal tusschen twee even hooge zeeën een aanvankelijke stroom bestond, zou de uitputting daarvan door den weerstand bepaald worden door de bewegingsvergelijking met weglating van den verhangterm. Het blijkt, dat de snelheid in een tijd

$$\frac{C^2 q}{g v_0}$$

van de beginwaarde  $v_0$  tot de helft daarvan zou zijn gedaald. Met  $q = 700$  cm,  $C = 530 \frac{\text{cm}^{1/2}}{\text{sec}}$  en  $v_0 = 100$  cm per sec wordt dat ruim een half uur.

c. In het geval van een stationairen verhangstroom (§ 31) ontbreekt de versnellingsterm en men zal van dien term ook dan kunnen afzien als het verhang, en dus ook de stroom, zeer langzaam met den tijd verandert. Dan mag men aannemen, dat op elk oogenblik de stroom zoo is als aan het dan bestaande verhang, in verband met den weerstand, beantwoordt en dat dus bij schommelingen de stroom tegelijk met het verhang van richting verandert of de uiterste waarden bereikt.

Bij de getijbewegingen zijn de uit de versnellingstermen voortvloeiende afwijkingen van dezen eenvoudigen samenhang zeer merkbaar. Wat hun invloed is, zal bij de berekening der getijden blijken. Thans moge er alleen op gewezen worden, dat bij schommelende bewegingen de versnellingsterm, in welken de invloed van de traagheid of inertie der vloeistof is uitgedrukt, ten gevolge heeft, dat de wisselingen van den stroom bij die van het verhang ten achter blijven (verg. ook § 13). Stel dat gedurende zekeren tijd de waterspiegel van links naar rechts daalt en in verband daarmee de stroom naar rechts is gericht. Neemt dan het verhang tot nul af om vervolgens de tegengestelde richting aan te nemen, dan zal op het oogenblik, dat de spiegel horizontaal staat, het water nog naar rechts in beweging zijn. De snelheid zal eerst worden uitgeput en in richting omgekeerd, nadat, onder den invloed van het omgekeerde verhang, eenigen tijd een kracht naar links heeft gewerkt.

Bij de getijbeweging in de Zuiderzee kan het achterblijven van den stroom ten opzichte van het wisselende verhang ongeveer een uur bedragen.

De volledige bewegingsvergelijking met haar drie termen kan voor de oplossing van verschillende vraagstukken dienen. Men kan er b.v. uit afleiden, in welke mate, in een aan de einden afgesloten kanaal, schommelingen, bij welke de vloeistof beurtelings aan het eene en aan het andere einde hoog staat, door den weerstand gedempt worden. Het blijkt, dat bij afmetingen zooals die in de Zuiderzee voorkomen, de amplitude reeds bij één heen- en weergang sterk afneemt. Vandaar dat „eigen schommelingen” van de watermassa te midden van de andere bewegingen niet in het oog vallen.

§ 41. *De getijbeweging.* Voor het onderzoek der Staatscommissie was het van veel belang, in de eerste plaats de getijden, zooals zij thans bij windstilte in het te beschouwen gebied zijn, nauwkeurig te kennen. Inderdaad beschikt men over de noodige gegevens om voor verschillende plaatsen de waterhoogten in haar voortdurende wisseling te volgen en te voorspellen.

Men kan zich daartoe bedienen van de methode van LUBBOCK<sup>1)</sup>, die door DE BRUIJN voor de toestanden hier te lande is omgewerkt en gebruikt wordt voor de samenstelling der sedert 1895 door den Algemeenen Dienst van den Rijkswaterstaat uitgegeven getijtafels<sup>2)</sup>. Zij maakt het mogelijk op dagen zonder wind (of eigenlijk op dagen met den middelbaren wind, een zwakken tot matigen westzuidwestelijken wind, verg. § 19) de tijden van hoog- en laagwater in de meeste gevallen tot op 5 à 10 minuten en de waterhoogten tot op enkele centimeters te voorspellen. Zij strekt zich echter niet uit over de fijnere bijzonderheden, die zich in den vorm der getijlijnen afspiegelen.

De methode der harmonische analyse, die men aan KELVIN te danken heeft, en die door DARWIN, VAN DER STOK en anderen veelvuldig werd toegepast, houdt met die bijzonderheden wel rekening<sup>3)</sup>. Zij stelt voor elke plaats de waterhoogte boven het nulpunt (N.A.P.) voor als de algebraïsche som van een aantal termen, waarvan eenige te zamen den zoogenaamden „middenstand” bepalen, terwijl de andere op de schommelingen aan weerskanten van dien stand betrekking hebben.

Onder de eerstgenoemde termen komt er een voor die constant is en andere, die in een periode van een jaar of van een onderdeel daarvan wisselen. Te zamen geven zij de langzame veranderingen van den middenstand weer, die, zooals uit de lengte der perioden blijkt, van astronomischen oorsprong moeten zijn, maar die toch (met uitzondering van een enkele) niet aan den rechtstreekschen invloed der aantrekking van zon en maan kunnen worden toegeschreven.

Dit laatste kan men wel doen met de bewegingen, die door de verdere termen, de eigenlijke getijtermen, worden voorgesteld en waarop het vooral aankomt. Elk dezer termen is van den vorm

$$a \cos n(t - \tau), \quad (11)$$

waarin  $t$  den tijd voorstelt, terwijl  $a$ ,  $n$  en  $\tau$  constanten zijn. De eerste is de amplitude, de tweede de frequentie, en de derde bepaalt de phase. Wat de frequentie betreft, moge er aan herinnerd worden, dat de periode van de door (11) voorgestelde veranderlijke grootte door  $\frac{2\pi}{n}$  of  $\frac{360^\circ}{n}$  wordt voorgesteld, al naarmate men den hoek  $n(t - \tau)$  in boogmaat of in graden uitdrukt.

De frequenties  $n$  zijn voor alle plaatsen dezelfde; zij hangen samen met bepaalde bijzonderheden in de beweging van zon en maan, waarmede de getijden theoretisch in verband kunnen worden gebracht. Voor het hoofdgetij, dat door het symbool  $M_2$  wordt voorgesteld, is (in boogmaat uitgedrukt en met de seconde als tijdseenheid)  $n = 1,405 \cdot 10^{-4}$ , waaraan de reeds in § 40,  $a$  genoemde periode van 12 uur 25 min beantwoordt;  $M_2$  is een dubbeldaagsch getij, met twee maxima der hoogte in het etmaal. Daarentegen zijn b.v. de getijden, waarvoor men de symbolen  $K_1$  en  $O$  heeft ingevoerd, enkeldaagsch; hun frequentie is resp.  $0,729 \cdot 10^{-4}$  en  $0,677 \cdot 10^{-4}$ , hun perioden 23 uur 56 min en 25 uur 49 min.

Vat men het getij  $M_2$  in het oog (en hetzelfde geldt van elk ander partieel getij), dan blijken, terwijl de frequentie vaststaat, de amplitude en de phase van punt tot punt te veranderen. Hoe het hiermede gesteld is hangt af van de wijze, waarop de getijgolven door de op den oceaan werkende getijverwekkende krachten ontstaan en zich van de eene plaats naar de andere voortplanten.

Wat de phase betreft, ziet men aan de uitdrukking (11) dat de hoogte op den tijd  $t = \tau$  een maximum bereikt. Men heeft intusschen reden gehad om in de tabellen der getijconstanten niet dien tijd  $\tau$  zelf op te geven,

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>s. 31–34.

<sup>2)</sup> „ „ n<sup>o</sup>. 35.

<sup>3)</sup> De harmonische analyse der getijden wordt uitvoerig behandeld in de n<sup>o</sup>s. 36 tot en met 48 van de literatuurlijst.

maar veeleer, hoeveel hij verschilt van een of ander oogenblik, dat zich bij de astronomische bewegingen, waarmede de getijden in verband staan, voordoet. Is dat tijdstip (in het geval van  $M_2$  een oogenblik waarop de middelbare maan door den meridiaan der beschouwde plaats gaat)  $t_0$ , dan stelt men

$$\tau = t_0 + \frac{\kappa}{n},$$

waardoor (11) overgaat in

$$a \cos [n(t - t_0) - \kappa].$$

Is eenmaal het tijdstip  $t_0$  gekozen, dan wordt de phase van het getij door de grootheid  $\kappa$  (het „kappagetal“) bepaald. Zij kan in graden worden opgegeven.

Het verdient hierbij opmerking, dat  $t_0$  niet voor elke plaats hetzelfde is, daar b.v. de middelbare maan voor de eene plaats op een anderen tijd door den meridiaan gaat dan voor een andere. Het phaseverschil tusschen twee plaatsen wordt dan ook strikt genomen niet door het verschil der kappagetallen, maar door het verschil der waarden van  $n t_0 + \kappa$  bepaald. Intusschen kan hiervan worden afgezien, daar de waarden van  $n t_0$  tusschen het meest oostelijk en het meest westelijk gelegen punt van het beschouwde gebied slechts iets meer dan  $1^\circ$  uiteenloopen, dat is minder dan de onzekerheden die in de kappagetallen bestaan.

Men vindt de uit de waarnemingen afgeleide amplituden en kappagetallen der partieele getijden in verschillende publicaties <sup>1)</sup>.

Met behulp der daar gegeven constanten kan men nu het getij voor een bepaald tijdstip voorspellen, waarbij men over het geheel genomen zeer bevredigende uitkomsten krijgt. Dit neemt niet weg, dat somtijds de naar de methode DE BRUIJN voorspelde waterhoogten beter met de werkelijkheid overeenstemmen en dat er bijzonderheden zijn, zooals de dubbele vloedkop te Helder, die de harmonische analyse met de termen, waartoe men zich wel dient te beperken, niet volkomen kan weergeven.

Wanneer in het vervolg van de harmonische analyse gebruik wordt gemaakt, zal het dan ook noodig zijn, zich er van te overtuigen, dat niet te veel van de werkelijkheid wordt afgeweken.

Er moet nog worden opgemerkt, dat de getijbewegingen zoo sterk zijn, dat elke partieele beweging op zich zelf niet altijd voldoende met lineaire bewegingsvergelijkingen kan worden weergegeven; het kan b.v. zijn, dat de niveauveranderingen niet meer klein zijn in vergelijking met de diepte. Verder zal het beginsel der superpositie niet altijd zonder correctie mogen worden toegepast. Kent men twee getijden, zooals die ieder op zich zelf zouden kunnen bestaan, dan kunnen de daarbij voorkomende waterhoogten niet in elk geval eenvoudig bij elkander worden opgeteld. Men zou in dergelijke gevallen, bij genoegzame kennis van alle gegevens, op de in § 38 aangegeven wijze een correctie kunnen aanbrengen. De residueele krachten die daarbij worden ingevoerd, geven aanleiding tot nieuwe getijden, die men bijkomstige kan noemen en waarvan de frequentie b.v. het dubbel van de frequentie van een gegeven beweging of het verschil der frequenties van twee gegeven bewegingen kan zijn (verg. §§ 97, 158 en bijlage 3).

Dergelijke bijkomstige getijden komen vooral bij ondiep water, zooals het in de kom der Zuiderzee wordt gevonden, tot ontwikkeling. Termen met hun perioden komen bij de harmonische analyse voor en worden evenals de andere uit de waarnemingen afgeleid. In zooverre kan men zeggen dat de harmonische analyse de theorie bevestigt en met het niet volkomen doorgaan van het superpositiebeginsel rekening houdt.

De voornaamste dezer „ondiepwatergetijden“ zijn  $M_4$  en  $M_6$ , resp. met het dubbel en het driedubbel van de frequentie van  $M_2$ , waaruit zij ontstaan, en  $MS$ , ontstaande uit de combinatie van het zons- en het maansgetij.

<sup>1)</sup> Literaturopgave nos. 39, 42, 46, 47 en 50.

§ 42. *Doel der getijberekeningen.* De hoogteveranderingen (verticale getijden) gaan uit den aard der zaak gepaard met horizontaal gerichte waterverplaatsingen, waarbij de componenten der snelheid of de stroomsterkten in de geulen door uitdrukkingen van den vorm (11) kunnen worden voorgesteld. Deze bewegingen worden door de weerstanden verzwakt en zoo zullen de amplituden der stroomen, en als gevolg daarvan ook die der rijzingen en dalingen, bij de voortplanting der golven van de zeegaten naar de zuidwaarts en oostwaarts gelegen kusten gestadig afnemen, terwijl de fasen, wegens den voor de voortplanting noodigen tijd, vertraagd worden.

De vraag is nu, met inachtneming der weerstanden, van dit alles reenschap te geven, m.a.w. uit de uit de waarnemingen bekende rijzingen en dalingen buiten de zeegaten de niveauperanderingen en de stroomen in de Waddenzee en de Zuiderzee af te leiden. Wat in de eerstvolgende §§ over dit vraagstuk gezegd wordt, beperkt zich tot het getij  $M_2$ , dat alle andere in amplitude overtreft; daarbij worden met „waargenomen” waterhoogten de rijzingen en dalingen bedoeld, die de harmonische analyse voor  $M_2$  heeft opgeleverd <sup>1)</sup>.

§ 43. *De bij de getijberekening gevolgde methode.* Daar wegens de mathematische moeilijkheden van een oplossing van het vraagstuk bij invoering van een quadratische weerstandswet geen sprake kon zijn (verg. echter § 97), was het noodig met een weerstand evenredig met de snelheid te rekenen. Vooreerst werd het gebied door een stel geulen vervangen, met de einden deels in een zeegat, deels aan de kust, deels ook aan de vertakkingspunten waar verschillende wegen bijeenkomen. Sommige dezer geulen bestaan uit eenige in de richting der lengte op elkaar volgende deelen van ongelijke configuratie, en telkens wanneer het noodig bleek werd een geul in twee of meer naast elkander liggende „elementaire” geulen verdeeld, waaraan over de volle lengte een bepaalde breedte en een bepaalde diepte kon worden toegekend. Men kan gevoelig van samengestelde of van enkelvoudige geulen spreken, al naarmate zulk een verdeling in naast elkander liggende banen al of niet noodig was. Voor elke elementaire geul werd nu aangenomen dat, wanneer het water zich met de snelheid  $v$  beweegt, de massa-eenheid een weerstand  $kv$  ondervindt, in plaats van

$$\frac{g}{C^2 q} v^2, \quad (12)$$

zooals uit het in § 31 gezegde zou volgen. Nadat, op een wijze die in de volgende § zal worden uiteengezet, de getalwaarden der coëfficiënten  $k$  waren vastgesteld, leverde de oplossing geen moeilijkheden meer op.

Men kan zich er toe beperken, den stroom  $s$  en de hoogteverandering  $h$  aan de uiteinden van elke geul te bepalen en er is dus voor iedere geul sprake van acht grootheden, nl. voor elk einde de amplitude en de phase van  $h$  en  $s$ . Tusschen die acht blijken nu vier betrekkingen te bestaan, die men voor een enkelvoudige geul gemakkelijk uit de bewegingsvergelijkingen kan afleiden en die men vervolgens ook voor een samengestelde geul en voor een geul die uit eenige op elkaar volgende deelen bestaat kan opstellen; met behulp van die betrekkingen kan men b. v. uit amplitude en phase van  $h$  en  $s$  aan het eene uiteinde de overeenkomstige grootheden voor het andere uiteinde afleiden.

Zoo blijven voor elk der geulen die hun einden in een zeegat, aan de kust, of in een vertakkingspunt hebben, vier grootheden ter bepaling over en deze kunnen alle worden gevonden met behulp van de voorwaarden:

<sup>1)</sup> Men kan de vraag stellen, of in plaats van de getijberekeningen niet beter metingen in een model van de Zuiderzee kunnen worden uitgevoerd. Door het aanbrenge van den afsluitdijk in het model worden dan de veranderingen die de afsluiting in de getijbeweging teweegbrengt gevonden.

Het denkbeeld is ernstig overwogen, maar het bleek dat de kleine schaal, waarop men zou moeten werken, zóó groote bezwaren met zich bracht, dat er van moest worden afgezien.

dat in de zeegaten de verticale schommelingen een voorgeschreven amplitude en phase hebben, dat waar een geul tegen de kust loopt, de stroom nul is, dat aan een vertakkingpunt in alle daar samenkomende geulen dezelfde waterhoogte bestaat, en dat eindelijk evenveel water naar zulk een punt toestroomt als er van wegvloeit. Daar dit alles in lineaire vergelijkingen kan worden uitgedrukt, is de numerieke oplossing mogelijk, hoe ingewikkeld het gekozen geulennet ook moge zijn.

§ 44. *Bepaling der weerstandscoefficienten.* Het is mogelijk, de coëfficiënten  $k$  die in de vorige § werden ingevoerd, zoo te kiezen dat de uitkomsten, ondanks de onderstelling van een lineaire weerstandswet, vrijwel beantwoorden aan de grootte die de weerstanden in werkelijkheid hebben. Daartoe moet echter de waarde die men aan den coëfficiënt toekent voor elke geul geschikt worden gekozen.

Heeft men met een onveranderlijke snelheid  $v$  te doen, dan zal de ingevoerde weerstand  $k v$  gelijk zijn aan den weerstand, die door (12) is gegeven, als men

$$k = \frac{g v}{C^2 q} \quad (13)$$

stelt. Bij de getijbeweging is de zaak ingewikkelder, omdat de stroomsnelheid tusschen twee uiterste waarden  $v_m$  en  $-v_m$  heen en weer schommelt. Ter bepaling van  $k$  werd nu de voorwaarde gesteld, dat gedurende een volle periode de negatieve arbeid van den ingevoerden weerstand gelijk is aan dien van den werkelijk bestaanden, die evenredig met  $v^2$  is; inderdaad mag men verwachten dat, wanneer dit het geval is, de invloed der weerstandskrachten op bevredigende wijze zal zijn weergegeven<sup>1)</sup>. Een bevestiging van deze verwachting vindt men in § 97.

De voorwaarde leidt tot de betrekking (§ 144)

$$k = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{g v_m}{C^2 q} \quad (14)$$

De gedachte ligt voor de hand, dat men (13) zou kunnen toepassen als men daarin voor  $v$  een zekere gemiddelde waarde, kleiner dan  $v_m$  substitueert, en inderdaad valt (13) met (14) samen als men

$$v = \frac{8}{3\pi} v_m = 0,85 v_m$$

stelt.

Bij de bepaling van  $k$  met verg. (14) doet zich de moeilijkheid voor, dat men voor de geul die men beschouwt, althans een schatting van de maximale snelheid  $v_m$  moet hebben. Tot op zekere hoogte kan men die aan de stroommetingen ontleenen; voor een deel worden echter de waarden van  $v_m$  eerst in den loop der berekeningen gevonden en het kan zijn dat

<sup>1)</sup> De uitwerking van een weerstand evenredig met de tweede macht van de snelheid kan exact worden berekend, als men te doen heeft met een systeem, waarvan de deelen slechts op één wijze kunnen heen en weergaan. Voorbeelden hiervan heeft men in een slinger, en in twee met water gevulde open vaten, verbonden door een buis, waarin het water kan heen en weer schommelen.

Men kan nu vragen naar de breuk die aangeeft in welke verhouding bij de schommelingen de grootste uitwijking naar één zijde kleiner is dan de daaraan voorafgaande grootste uitwijking naar den anderen kant. Deze „dempingscoëfficiënt” kan bij de bovengenoemde weerstandswet streng worden berekend, en men kan er ook een benaderde waarde voor vinden door, overeenkomstig het in den tekst gezegde, met een weerstand te rekenen, die evenredig met de eerste macht van de snelheid is, daarbij den weerstandscoefficiënt zoo bepalende, dat de negatieve arbeid bij den overgang van den eenen uitersten stand tot den anderen even groot is voor den aangenomen fictieven weerstand als voor den werkelijken, die evenredig met  $v^2$  is. Ter rechtvaardiging van dezen kunstgreep kan dienen, dat hij voor den dempingscoëfficiënt de waarden

$$0,90; 0,80; 0,60; 0,50; 0,40$$

geeft, als de coëfficiënt volgens de exacte berekening

$$0,90; 0,80; 0,606; 0,51; 0,42$$

is (zie literaturopgave n<sup>o</sup>. 60).

men de eerst voor  $k$  aangenomen waarde later door een betere moet vervangen. Natuurlijk kan bij dit alles van groote nauwkeurigheid geen sprake zijn, ofschoon moet worden opgemerkt, dat een betrekkelijk groote verandering van  $v_m$  meestal weinig verschil in de uitkomst maakt. Strikt genomen zou niet eens over de volle lengte van een geul voor  $k$  dezelfde waarde mogen worden genomen, daar  $v_m$  niet overal dezelfde waarde heeft; maar de waarden der snelheid in de verschillende punten eener geul loopen gewoonlijk niet zooveel uiteen, dat een noemenswaardige fout is te vreezen als men op geschikte wijze met een gemiddelde waarde van  $v_m$  rekent.

In gevallen, waarin de ongelijkheid van  $v_m$  te veel invloed op de uitkomst zou hebben, wordt de geul in tweeën, elk met zijn eigen  $v_m$ , gesplitst.

§ 45. *Berekening der getijden bij open en bij gesloten Zuiderzee.* In de laatste vijf jaren zijn voor het hoofdgetij  $M_2$  een vrij groot aantal berekeningen uitgevoerd, zoowel voor den tegenwoordigen toestand als voor dien, welke na de afsluiting der Zuiderzee zal ontstaan.

De gevonden uitkomsten zijn nagenoeg volledig in bijlage 8 opgenomen. Het zal voldoende zijn hier die berekeningen te vermelden waaraan het meest waarde kan worden gehecht en aan te wijzen wat vooral de aandacht verdient. Daarbij zullen de berekeningen die op den tegenwoordigen toestand met open Zuiderzee betrekking hebben door het teeken  $Z$  worden aangeduid. Bij elke zoodanige berekening behoort een andere, door het teeken  $A$  aangewezen, voor den toestand die na de afsluiting zal ontstaan. Het daarbij aangenomen geulennet was eenvoudig wat er na de afsluiting van het bij  $Z$  gebruikte net zal overblijven.

*a.* De eerste berekeningen, die niet in bijlage 8 zijn opgenomen, werden in het begin van 1921 ondernomen; zij waren gebaseerd op een zeer eenvoudig geulennet, dat slechts op twee plaatsen met de Noordzee in verbinding stond, door het Heldersche zeegat en het Vlie. Het gebied werd oostwaarts begrensd gedacht langs een lijn, loopende van de Friesche kust naar de westelijke punt van Terschelling en van de verbinding met de Noordzee door het Eierlandsche zeegat werd afgezien. Dit laatste werd gemotiveerd door de overweging, dat tusschen het gebied binnen dat zeegat en het verdere gedeelte van de Waddenzee bij rustig weer nooit stroom van eenige beteekenis loopt; als het door dijken was afgescheiden zou het getij in de Waddenzee ongewijzigd blijven.

Toen deze berekeningen werden uitgevoerd was de kennis der benodigde gegevens nog zeer onvolledig. O.a. was het noodig het eindpunt bij het Vlie niet, zooals dat bij het Heldersche zeegat, even buiten het zeegat, maar aan de binnenzijde daarvan te nemen.

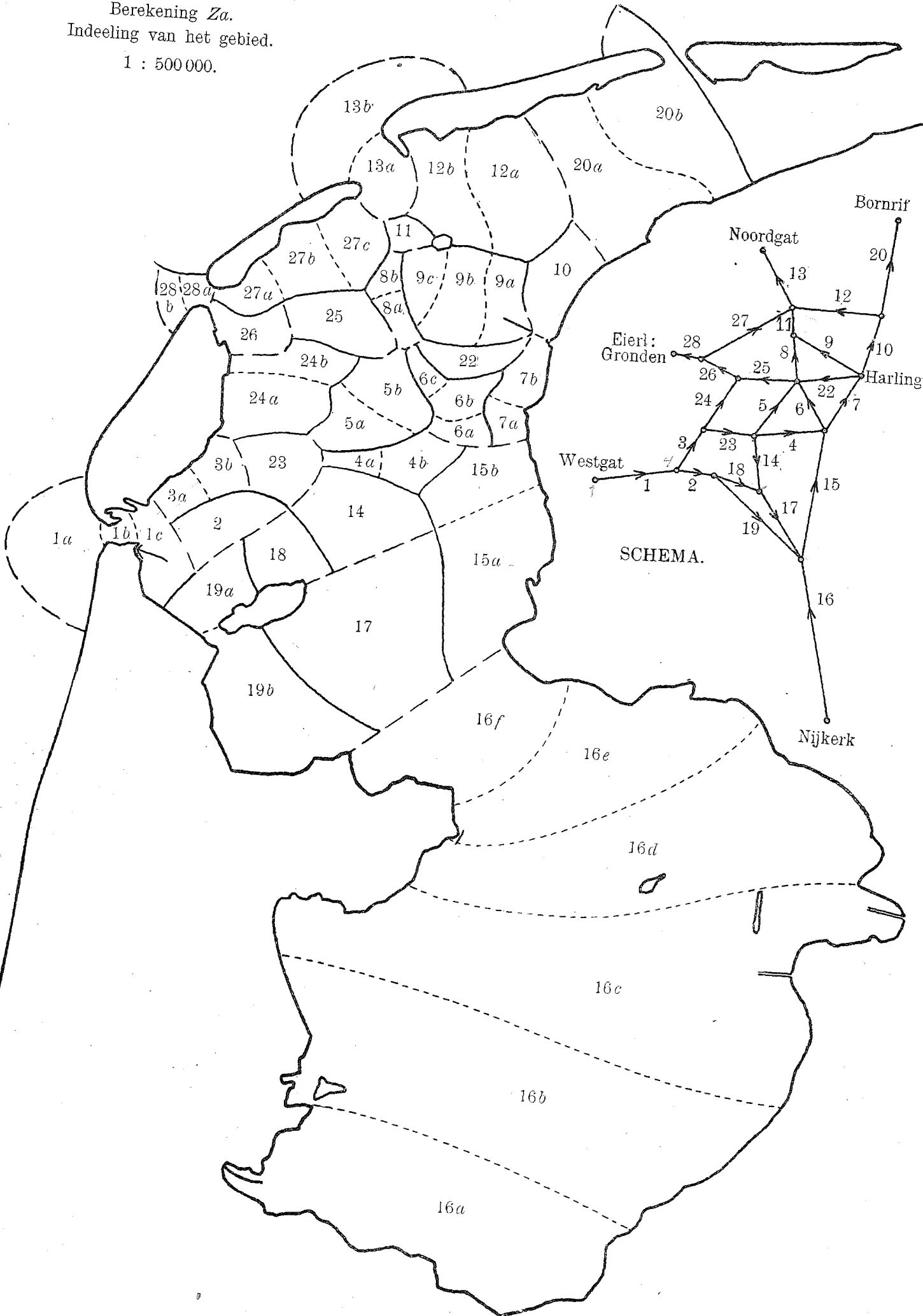
Dit laatste kon verbeterd worden bij meer uitvoerige berekeningen, waartoe eenige maanden later werd overgegaan ( $Z$ ,  $A$  en  $A'$  van bijlage 8).

*b.* Meer in bijzonderheden mogen nu eenige berekeningen van het jaar 1922 vermeld worden,  $Za$  voor open Zuiderzee en  $Aa$  en  $A'a$  voor den toekomstigen toestand; de beide laatste onderscheiden zich van elkander hierdoor, dat bij  $Aa$  de afsluitdijk ondersteld is naar Piaam te loopen, en bij  $A'a$  naar Zurig.

Het geulennet voor de berekening  $Za$  vindt men in figuur 29, en dat voor de twee andere in figuur 30, terwijl de afmetingen der geulen in de opgenomen tabellen 6 zijn aangegeven.

Behalve dat een ingewikkelder geulennet is aangenomen en voor een deel andere waarden van de constante van EYTELWEIN zijn gebruikt (verg. § 32), onderscheiden zich deze berekeningen van de boven vermelde hierdoor, dat ook de verbindingen met de Noordzee door het Eierlandsche en het Amelandsche zeegat (Borndiep) in rekening werden gebracht. Men kwam hiertoe door de overweging dat deze zeegaten, die, zooals zoeven van het eerste reeds gezegd werd; bij den toestand met open Zuiderzee geen invloed op het getij in het beschouwde deel van de Waddenzee hebben, wellicht na

Berekening *Za.*  
Indeeling van het gebied.  
1 : 500 000.



Figuur 29.

de afsluiting wel van invloed zullen zijn. Dan zou misschien een merkbare waterbeweging over de twee genoemde wantijen kunnen ontstaan, wat van invloed zou kunnen zijn op het getij bij Piaam.

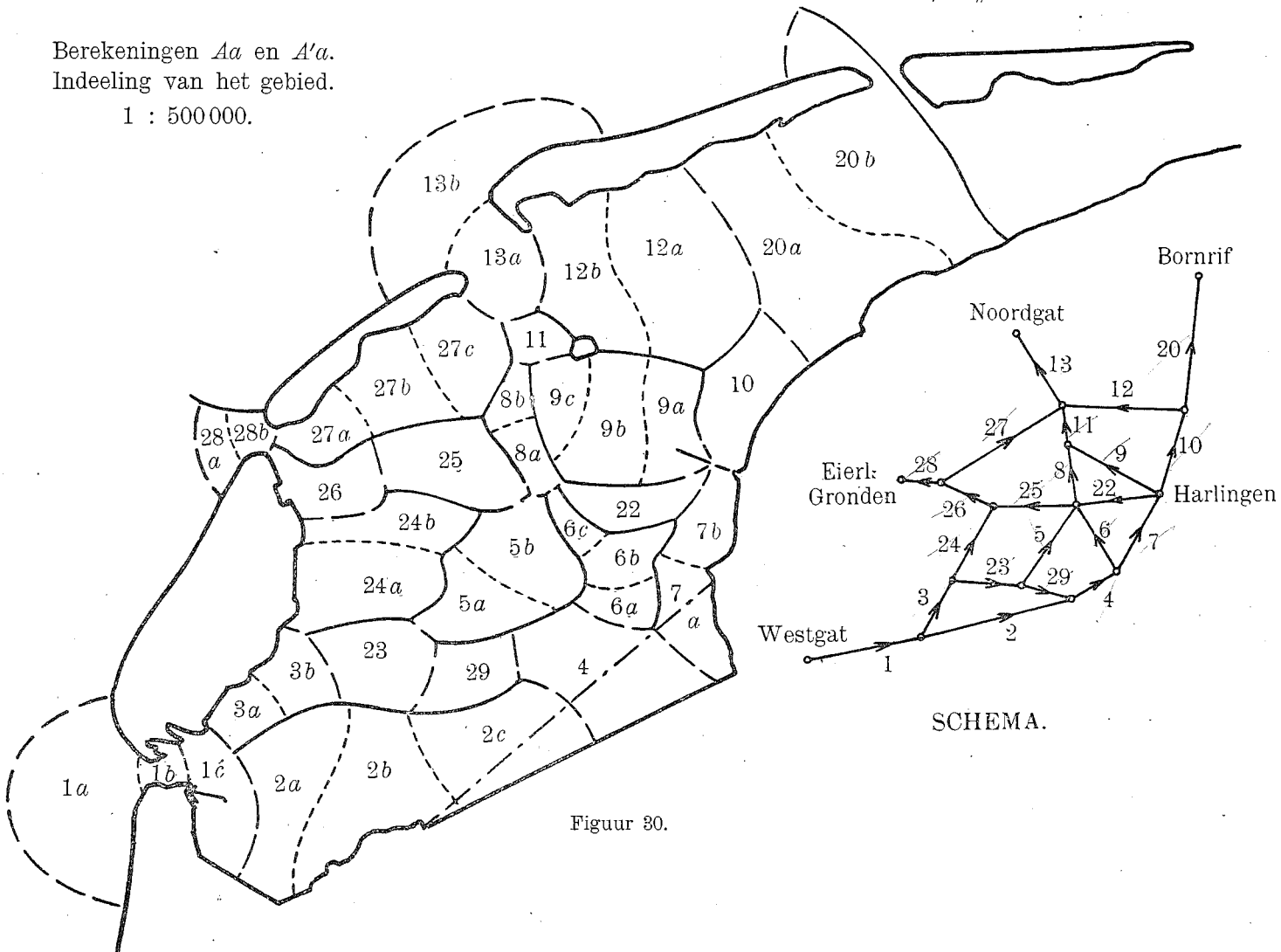
De oostelijke begrenzing van het beschouwde deel der Waddenzee werd naar de westelijke punt van Ameland verlegd.

Er werd nu uitgegaan van de volgende waarden van de amplitude en het kappagetal voor het verticale getij in de vier eindpunten:

|                                | Verticaal getij |            |
|--------------------------------|-----------------|------------|
|                                | Amplitude       | Kappagetal |
| Westgat.. . . . .              | 67,0 cm         | 158°       |
| Eierlandsche Gronden . . . . . | 76,1 „          | 184°       |
| Noordgat. . . . .              | 79,1 „          | 201°       |
| Bornrif . . . . .              | 82,7 „          | 225°.      |

Berekeningen *Aa* en *A'a*.  
Indeeling van het gebied.

1 : 500 000.



Figuur 30.

De hieruit voor een aantal andere plaatsen afgeleide amplituden en kappagetallen zijn, wat de waterhoogten betreft, in tabel 7 opgenomen. De plaatsen zijn aangewezen zoowel door de benamingen, alsook door de cijfers en letters, die de geulen of vakken aangeven, die elkaar op de beschouwde plek ontmoeten. Zoo ligt b.v. Helder op de grens van de geulen *1b* en *1c*.

In tabel 8 vindt men een deel der uitkomsten die voor de stroomen werden gevonden. Voor elke geul is als positieve stroomrichting die gekozen, welke in de schema's naast de figuren door een pijl is aangewezen en de amplitude is uitgedrukt in duizendtallen kubieke meters per seconde.

Bij de berekeningen bleek dat over de wantijen die thans om het Eierlandsche Gat heen en achter Terschelling bestaan, ook na de afsluiting geen stroom zal loopen. Op grond hiervan werden bij latere berekeningen het Eierlandsche en het Amelandsche zeegat weer evenals bij de aller-eerste berekening van het gebied uitgesloten.

TABEL 6.

## Geulennet van berekening Za.

| Geul.            |                         | O   | l    | Dwarsprofiel.                                |                                 |                                 |                                 | v <sub>m</sub>   | S     | C <sup>2</sup> |
|------------------|-------------------------|-----|------|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|-------|----------------|
| N <sup>o</sup> . | Ligging.                |     |      | b <sub>1</sub> × q <sub>1</sub>              | b <sub>2</sub> × q <sub>2</sub> | b <sub>3</sub> × q <sub>3</sub> | b <sub>4</sub> × q <sub>4</sub> |                  |       |                |
| 1a               | Haaks . . . . .         | 113 | 10,0 | 2500 × 16                                    | 8800 × 4                        | —                               | —                               | 80 <sup>1)</sup> | 54,88 | 280000         |
| 1b               | Helsdeur . . . . .      | 4   | 2,2  | 1200 × 35                                    | 600 × 15                        | —                               | —                               | 125              | 61,16 | BAZIN          |
| 1c               | Marsdiep . . . . .      | 29  | 4,2  | 2600 × 20                                    | 1200 × 10                       | 3100 × 0                        | —                               | 110              | 67,17 | id.            |
| 2                | Malzwin . . . . .       | 48  | 9,5  | 1100 × 12                                    | 1200 × 2                        | 2700 × 0                        | —                               | 100              | 14,07 | id.            |
| 3a               | Texelstroom West . .    | 18  | 5,2  | 1700 × 25                                    | 700 × 9                         | 1050 × 0                        | —                               | 105              | 49,16 | id.            |
| 3b               | Texelstroom Midden.     | 35  | 5,0  | 1900 × 18                                    | 1000 × 10                       | 4100 × 0                        | —                               | 100              | 42,09 | id.            |
| 4a               | Doove Balg West . .     | 15  | 6,3  | 550 × 15                                     | 1900 × 2,5                      | —                               | —                               | 75               | 7,85  | 280000         |
| 4b               | Doove Balg Oost . .     | 30  | 9,0  | 300 × 11                                     | 1600 × 2,5                      | 1400 × 0                        | —                               | 90               | 4,57  | BAZIN          |
| 5a               | Scheurak . . . . .      | 49  | 9,2  | 400 × 11                                     | 4900 × 0                        | —                               | —                               | 90               | 3,96  | 280000         |
| 5b               | Oude Vlie . . . . .     | 31  | 7,5  | 250 × 9                                      | 3900 × 0                        | —                               | —                               | 75               | 1,69  | BAZIN          |
| 6a               | Middelgronden Noord     | 17  | 3,2  | 1000 × 11                                    | 2500 × 4                        | 1800 × 0                        | —                               | 90               | 5,58  | 280000         |
| 6b               | Zuidoostrak Zuid . .    | 33  | 5,2  | 700 × 11                                     | 500 × 3                         | 5200 × 0                        | —                               | 75               | 6,41  | id.            |
| 6c               | Zuidoostrak Noord . .   | 14  | 5,1  | 900 × 10                                     | 1900 × 0                        | —                               | —                               | 85               | 7,65  | id.            |
| 7a               | Boontjes Zuid . . . .   | 15  | 4,8  | 700 × 7                                      | 1500 × 1                        | 1000 × 0                        | —                               | 85               | 4,66  | id.            |
| 7b               | Boontjes Noord . . .    | 22  | 6,8  | 3200 × 2,5                                   | —                               | —                               | —                               | 40               | 3,20  | id.            |
| 8a               | Inschot Zuid . . . .    | 14  | 5,0  | 900 × 11                                     | 1900 × 0                        | —                               | —                               | 85               | 8,42  | id.            |
| 8b               | Inschot Noord . . . .   | 13  | 5,0  | 700 × 13                                     | 1900 × 0                        | —                               | —                               | 95               | 8,64  | id.            |
| 9a               | Pollen . . . . .        | 32  | 4,0  | 3000 × 3                                     | 5000 × 0                        | —                               | —                               | 40               | 3,60  | id.            |
| 9b               | Zuidrak . . . . .       | 47  | 6,5  | 700 × 6                                      | 2600 × 3                        | 4000 × 0                        | —                               | 80               | 7,84  | id.            |
| 9c               | Blauwe Slenk . . . .    | 40  | 5,8  | 900 × 11                                     | 6000 × 0                        | —                               | —                               | 110              | 10,89 | BAZIN          |
| 10               | Vlakte v. Oosterbierum  | 53  | 11,5 | 3000 × 2,5                                   | 1600 × 0                        | —                               | —                               | 40               | 3,00  | 280000         |
| 11               | Vlietstroom . . . . .   | 13  | 3,8  | 1200 × 17                                    | 2100 × 0                        | —                               | —                               | 115              | 23,46 | id.            |
| 12a              | Oostmeep . . . . .      | 112 | 12,0 | 800 × 13                                     | 1800 × 7                        | 6700 × 0                        | —                               | 90               | 18,06 | id.            |
| 12b              | Meep . . . . .          | 52  | 6,4  | 1000 × 16                                    | 700 × 10                        | 6500 × 0                        | —                               | 115              | 24,98 | id.            |
| 13a              | Boomkensdiep . . . .    | 33  | 6,0  | 1800 × 20                                    | 3700 × 6,5                      | —                               | —                               | 110              | 55,70 | BAZIN          |
| 13b              | TerschellingerGronden   | 97  | 6,0  | 1400 × 13                                    | 6000 × 6                        | 8800 × 3                        | —                               | 110              | 62,50 | 280000         |
| 14               | Vlieter . . . . .       | 85  | 9,0  | 2300 × 7                                     | 3000 × 4,5                      | 2100 × 2,5                      | 2000 × 0                        | 65               | 19,31 | BAZIN          |
| 15a              | Friesche Vlaak . . . .  | 174 | 20,5 | 8500 × 4                                     | —                               | —                               | —                               | 30               | 10,20 | 280000         |
| 15b              | Middelgronden Zuid .    | 54  | 6,0  | 500 × 8                                      | 3000 × 5                        | 4300 × 2                        | 1200 × 0                        | 70               | 13,75 | BAZIN          |
| 16a              | Knar . . . . .          | 365 | 10,0 | 36500 × 2,5                                  | —                               | —                               | —                               | 5,5              | 5,02  | id.            |
| 16b              | Marken-Elburg . . . .   | 738 | 12,0 | 61500 × 3,5                                  | —                               | —                               | —                               | 7                | 15,07 | id.            |
| 16c              | Elburg-Urk . . . . .    | 935 | 22,0 | 42500 × 4                                    | —                               | —                               | —                               | 13               | 22,10 | id.            |
| 16d              | Val van Urk . . . . .   | 455 | 10,0 | 45500 × 4,5                                  | —                               | —                               | —                               | 18               | 36,80 | id.            |
| 16e              | Enkhuizerzand . . . .   | 238 | 9,0  | 26500 × 5                                    | —                               | —                               | —                               | 24,5             | 32,46 | id.            |
| 16f              | Nauw van Stavoren       | 297 | 16,5 | 8000 × 7                                     | 10000 × 3                       | —                               | —                               | 43               | 32,46 | id.            |
| 17               | Wieringer Vlaak . . .   | 261 | 16,5 | 2500 × 6                                     | 13300 × 3,6                     | —                               | —                               | 45               | 23,25 | id.            |
| 18               | Wierbalg . . . . .      | 49  | 9,7  | 700 × 6,5                                    | 900 × 3,5                       | 3500 × 0                        | —                               | 75               | 5,18  | 280000         |
| 19a              | Amsteldiep . . . . .    | 45  | 11,3 | 500 × 8                                      | 700 × 5                         | 2800 × 0                        | —                               | 80               | 5,38  | BAZIN          |
| 19b              | Wieringer Meer . . . .  | 138 | 19,5 | 5100 × 3                                     | 2000 × 2                        | —                               | —                               | 25               | 4,66  | 280000         |
| 20a              | Abt . . . . .           | 105 | 8,0  | 1000 × 5                                     | 4000 × 2                        | 8200 × 0                        | —                               | 75               | 7,59  | id.            |
| 20b              | Kromme Balg . . . . .   | 134 | 22,0 | Dwarsprofiel ongeveer 13000 m <sup>2</sup> . |                                 |                                 |                                 | —                | 12    | id.            |
| 22               | Molenrak . . . . .      | 30  | 12,5 | 2400 × 2,5                                   | —                               | —                               | —                               | 30               | 1,80  | id.            |
| 23               | Texelstroom Oost . . .  | 57  | 9,2  | 2000 × 18                                    | 1000 × 3,5                      | 3200 × 0                        | —                               | 90               | 33,98 | id.            |
| 24a              | Binnenbreesem . . . .   | 60  | 8,5  | 1600 × 2,5                                   | 1500 × 1                        | 4000 × 0                        | —                               | 50               | 2,48  | id.            |
| 24b              | Foksdiep . . . . .      | 32  | 5,5  | 400 × 5                                      | 1000 × 1                        | 4500 × 0                        | —                               | 70               | 1,72  | id.            |
| 25               | Driesprongplaat . . . . | 36  | 12,0 | 200 × 4                                      | 1000 × 1                        | 1800 × 0                        | —                               | 80               | 1,04  | id.            |
| 26               | Vogelzwin . . . . .     | 23  | 10,3 | 600 × 8                                      | 600 × 1,5                       | 1000 × 0                        | —                               | 100              | 5,20  | id.            |
| 27a              | Kolk . . . . .          | 14  | 6,8  | 700 × 4,5                                    | 1400 × 0                        | —                               | —                               | 80               | 2,52  | id.            |
| 27b              | Vianensveldje . . . . . | 23  | 5,8  | 500 × 4                                      | 3400 × 0                        | —                               | —                               | 75               | 1,50  | id.            |
| 27c              | Vliesloot . . . . .     | 44  | 9,5  | 1200 × 4                                     | 3400 × 0                        | —                               | —                               | 75               | 3,60  | id.            |
| 28a              | Eierlandsche Gat . . .  | 8   | 3,7  | 300 × 14                                     | 400 × 6                         | 1500 × 3                        | —                               | 110              | 8,54  | id.            |
| 28b              | Stanley . . . . .       | 6   | 1,3  | 1600 × 4,5                                   | 3100 × 2                        | —                               | —                               | 85               | 9,65  | id.            |

<sup>1)</sup> Voor den weerstand in het 4 meter diepe gedeelte van geul 1a is in afwijking van de normale formule (§ 44 formule 14) gerekend op een amplitude van de stroomsnelheid van 65 centimeter per seconde, daar een hiermede overeenkomende weerstand moet optreden tengevolge van de dwars over het gebied trekkende stroomen van het getij in de volle Noordzee.

## Geulennet van berekening Aa.

| Geul. |                             | O          | l    | Dwarsprofiel.    |                  |                  |                  | $v_m$ | S     | $C^2$  |
|-------|-----------------------------|------------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|--------|
| Nº.   | Ligging.                    |            |      | $b_1 \times q_1$ | $b_2 \times q_2$ | $b_3 \times q_3$ | $b_4 \times q_4$ |       |       |        |
| 2a    | Malzwin . . . . .           | 67         | 9,5  | 1100 × 12        | 1200 × 2         | 4800 × 0         | —                | 100   | 14,24 | 280000 |
| 2b    | Wierbalg . . . . .          | 82         | 9,7  | 700 × 6,5        | 900 × 3,5        | 6900 × 0         | —                | 85    | 5,86  | id.    |
| 2c    | Javaruggen . . . . .        | 77         | 10,5 | 7300 × 10        | —                | —                | —                | 20    | 14,60 | id.    |
| 4     | Doove Balg Oost . . . . .   | 95         | 10,3 | 500 × 11         | 600 × 5          | 4100 × 3         | 4000 × 0         | 95    | 13,61 | id.    |
| 5a    | Scheurak . . . . .          | ← als Za → |      |                  |                  |                  |                  | 110   | 4,84  | id.    |
| 6a    | Middelgronden Noord         | 17         | 3,2  | 600 × 11         | 1500 × 3         | 3200 × 0         | —                | 85    | 7,73  | id.    |
| 6b    | Zuidoostrak Zuid . . . . .  | 33         | 5,2  | 1200 × 3         | 5200 × 0         | —                | —                | 45    | 1,62  | id.    |
| 6c    | Zuidoostrak Noord . . . . . | ← als Za → |      |                  |                  |                  |                  | 65    | 4,10  | id.    |
| 8a    | Inschot Zuid . . . . .      | ← als Za → |      |                  |                  |                  |                  | 90    | 8,91  | id.    |
| 8b    | Inschot Noord . . . . .     | ← als Za → |      |                  |                  |                  |                  | 105   | 9,56  | id.    |
| 23    | Texelstroom Oost . . . . .  | ← als Za → |      |                  |                  |                  |                  | 80    | 30,24 | id.    |
| 29    | Doove Balg West . . . . .   | 33         | 6,3  | 900 × 15         | 2500 × 5         | 1900 × 2,5       | —                | 80    | 18,90 | id.    |

1a, 1b, 1c, 3a, 3b, 5b, 7a, 7b, 9a, 9b, 9c, 10, 11, 12a, 12b, }  
 13a, 13b, 20a, 20b, 22, 24a, 24b, 25, 26, 27a, 27b, 27c, 28a, 28b. } als Za.

## Geulennet van berekening A'a.

| Geul. |                           | O  | l    | Dwarsprofiel.    |                  |                  |                  | $v_m$ | S     | $C^2$  |
|-------|---------------------------|----|------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|--------|
| Nº.   | Ligging.                  |    |      | $b_1 \times q_1$ | $b_2 \times q_2$ | $b_3 \times q_3$ | $b_4 \times q_4$ |       |       |        |
| 2c    | Javaruggen . . . . .      | 55 | 10,0 | 5500 × 10        | —                | —                | —                | 25    | 13,75 | 280000 |
| 4     | Doove Balg Oost . . . . . | 30 | 9,0  | 400 × 11         | 2200 × 4         | 700 × 0          | —                | 105   | 10,39 | id.    |

1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 3a, 3b, 5a, 5b, 6a, 6b, 6c, 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b, 9c, 10, 11, }  
 12a, 12b, 13a, 13b, 20a, 20b, 22, 23, 24a, 24b, 25, 26, 27a, 27b, 27c, 28a, 28b, 29. } als Aa.

In deze tabellen beteekent:

O oppervlak van het gebied in vierkante kilometers.

l lengte van het gebied in kilometers.

b breedte van elk onderdeel van de geul in meters.

q diepte " " " " " " " " " " " "

$v_m$  aangenomen amplitude van de stroomsnelheid in het onderdeel van de geul met diepte  $q_1$  in centimeters per seconde.

S uit de aanname van  $v_m$  volgende amplitude van de doorstroomende waterhoeveelheid in duizenden kubieke meters per seconde.

$C^2$  constante van EYTELWEIN. Bij de geulen waar „BAZIN” is aangegeven is  $C^2$  bepaald door formule (8)

$$C^2 = 100\,000 : 0,28 \left( 1 + \frac{1,25}{q} \right) \text{ centimeters per seconde}^2.$$

Vergelijkt men verder, vooreerst wat de verticale getijden betreft, de in tabel 7 opgegeven berekende getallen  $Za$  met de waargenomene, dan valt onmiskenbaar de overeenstemming in het oog, die in groote trekken bestaat. Het verdient vooral de aandacht, dat de fasevertraging die het getij bij de voortplanting van de zeegaten naar de kom der Zuiderzee (Lemmer, Urk, Elburg, Nijkerk) ondergaat, zoo goed als volkomen wordt weergegeven en dat wat de vermindering der amplitude betreft, bevredigende overeenstemming bestaat. De gebezigde bewegingsvergelijkingen met de daarin aan den weerstandscoëfficiënt toegekende waarde blijken rekenschap te kunnen geven van het feit, dat b.v. te Elburg het verticale getij, in vergelijking met dat in het Westgat, een 7 maal kleinere amplitude heeft en ongeveer  $225^\circ$ , beantwoordende aan  $5/8$  periode, achter is.

Intusschen zijn er ook niet onbelangrijke afwijkingen, vooral in de amplitude aan de Friesche kust (Zurig, Harlingen, Nieuw Bildt). Het is naderhand gebleken, dat sommige van die afwijkingen grootendeels hieraan te wijten zijn, dat bij de berekening niet gelet was op de kracht van CORIOLIS (§ 33). Neemt men deze in aanmerking, dan worden voor de amplituden om Wieringen en aan de Friesche kust (Nieuw Bildt een oogenblik daar gelaten) betere waarden gevonden. Zoo wordt na correctie voor de aswenteling van de aarde voor het  $M_2$ -getij te Harlingen een amplitude van 61,3 cm gevonden bij een kappagetal van  $269^\circ$ . Voor Zurig worden deze gecorrigeerde cijfers 47,3 cm en  $266^\circ$ , te Piaam 31,5 cm en  $271^\circ$ , den Oever 31,9 cm en  $229^\circ$ , Westerland 31,8 cm en  $231^\circ$  en Oude Schild 47,9 cm en  $193^\circ$ , alle waarden, die veel beter met de in tabel 7 gegeven waarnemingen

### Verticale getijbeweging.

TABEL 7. *Amplituden in centimeters en kappagetallen in graden van het hoofdgetij  $M_2$ .*

| P L A A T S.                                    | Plaats in het geulennet. |            | Waarneming. |         | Uitkomst van berekening: |     |       |     |       |     |
|---|--------------------------|------------|-------------|---------|--------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|
|   |                          |            |             |         | Za                       |     | Aa    |     | A'a   |     |
|   | Za                       | Aa en A'a  | Ampl.       | z       | Ampl.                    | z   | Ampl. | z   | Ampl. | z   |
| Helder. . . . .                                 | 1 b/c                    | 1 b/c      | 53 ± 3      | 168 ± 4 | 53,5                     | 173 | 56,5  | 182 | 60,3  | 182 |
| Oude Schild . . . . .                           | 3 a/b                    | 3 a/b      | 43 ± 3      | 190 ± 4 | 48,5                     | 187 | 57,3  | 200 | 62,5  | 197 |
| Doove Balg bij westelijk<br>einde . . . . .     | 4 a/b                    | 29/2/4     | 37 ± 3      | 221 ± 6 | 40,5                     | 226 | 66,7  | 238 | 70,7  | 227 |
| Middelgronden bij mond<br>Dooven Balg . . . . . | 4/6/7/15                 | 4/6/7      | 42 ± 4      | 250 ± 6 | 44,2                     | 260 | 72,9  | 260 | 74,0  | 253 |
| Inschot bij lichtboei<br>„Oude Vlie”. . . . .   | 6/8/22/25                | 6/8/22/25  | 56 ± 6      | 252 ± 8 | 56,0                     | 253 | 76,8  | 260 | 79,0  | 257 |
| Zurig . . . . .                                 | 7 a/b                    | 7 a/b      | 49 ± 3      | 253 ± 5 | 54,9                     | 267 | 77,2  | 268 | 78,6  | 264 |
| Harlingen . . . . .                             | 7/10/12/22               | 7/10/12/22 | 57 ± 2      | 260 ± 2 | 66,1                     | 267 | 80,8  | 272 | 82,6  | 269 |
| Nieuw Bildt . . . . .                           | 20 a/b                   | 20 a/b     | 66 ± 3      | 280 ± 5 | 79,0                     | 267 | 81,8  | 270 | 82,3  | 270 |
| Zwinbeoosten den Oever                          | 14/17/18                 | 2 b/c      | 35 ± 3      | 225 ± 5 | 28,5                     | 229 | 67,6  | 239 | 71,4  | 228 |
| Westerland . . . . .                            | 19 a/b                   | —          | 33 ± 2      | 227 ± 3 | 25,0                     | 236 | —     | —   | —     | —   |
| Piaam . . . . .                                 | 15 a/b                   | —          | 32 ± 4      | 248 ± 5 | 35,4                     | 265 | —     | —   | —     | —   |
| Vrouwenzand <sup>1)</sup> . . . . .             | 15/16/17/19              | —          | 22 ± 2      | 250 ± 8 | 18,1                     | 255 | —     | —   | —     | —   |
| Enkhuizerzand <sup>2)</sup> . . . . .           | 16 e/f                   | —          | 11,8 ± 0,3  | 292 ± 3 | 6,3                      | 291 | —     | —   | —     | —   |
| Lemmer . . . . .                                | 16 d/e                   | —          | 4,7 ± 0,5   | 337 ± 7 | 5,1                      | 329 | —     | —   | —     | —   |
| Urk . . . . .                                   | 16 c/d                   | —          | 7,0 ± 0,4   | 350 ± 4 | 5,8                      | 353 | —     | —   | —     | —   |
| Elburg . . . . .                                | 16 b/c                   | —          | 9,6 ± 0,6   | 24 ± 5  | 8,8                      | 20  | —     | —   | —     | —   |
| Nijkerk . . . . .                               | begin van 16             | —          | 13,5 ± 0,8  | 22 ± 4  | 10,0                     | 23  | —     | —   | —     | —   |

In de kolom „Waarneming” is voor amplitude en kappagetal telkens gegeven de uit de peilschaalwaarnemingen afgeleide meest waarschijnlijke waarde en de onzekerheid die daarin bestaat.

overeenstemmen dan de oorspronkelijke uitkomsten van de berekening, die eveneens in tabel 7, onder *Za*, zijn vermeld.

Wat Nieuw Bildt betreft, dat daar een veel kleinere amplitude is waargenomen dan de berekening aangeeft, is zeer zeker te wijten aan de onvolledige ontwikkeling van het laagwater bij de peilschaal door de geheel of nagenoeg droogvallende banken in de omgeving daarvan.

Fouten die zich bij alle berekeningen in dezelfde richting voordoen zijn er in het gebied rondom het Breezand. Aan de noordzijde (Doove Balg)

<sup>1)</sup> Waarnemingen te Stavoren en Medemblik.

<sup>2)</sup> Waarnemingen te Enkhuizen.

wordt het getij te groot gevonden, aan den oostkant (Piaam) te laat en aan de zuidzijde (Vrouwenzand) te klein.

Al deze getijden verschillen te veel van het getij dat op het Breezand tusschen de aangenomen geulen voorkomt en dat een amplitude van ongeveer 30 cm en een kappagetal van omstreeks  $240^\circ$  heeft.

Ongetwijfeld is de oorzaak dezer verschillen te zoeken in het feit, dat de geulen over de vlakke van het Breezand gemeenschap met elkaar hebben, waardoor de in § 13 genoemde ronddraaiende stroomen ontstaan; de vereffenende invloed hiervan kwam bij de gevolgde rekenwijze niet tot zijn recht.

### Stroom.

TABEL 8. *Amplituden in 1000 m<sup>3</sup> per seconde en kappagetallen in graden van den hoofdstroom M<sub>2</sub>.*

| Geul.                | Plaats in de geul.      | Plaats in het geulennet. |              | Waarneming. |     | Uitkomst van berekening: |     |       |     |       |     |
|----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-------------|-----|--------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|
|                      |                         |                          |              |             |     | Za                       |     | Aa    |     | A'a   |     |
|                      |                         | Za                       | Aa en A'a    | Ampl.       | α   | Ampl.                    | α   | Ampl. | α   | Ampl. | α   |
| Heldersche<br>zeegat | Westgat . . . . .       | begin van 1              | begin van 1  | —           | —   | 47,4                     | 147 | 65,0  | 136 | 63,4  | 128 |
|                      | Kaaphoofd. . . . .      | 1 a/b                    | 1 a/b        | 45–50       | 160 | 45,6                     | 158 | 60,6  | 143 | 57,7  | 136 |
|                      | Helder . . . . .        | 1 b/c                    | 1 b/c        | 45–50       | 160 | 45,5                     | 159 | 60,4  | 144 | 57,5  | 136 |
|                      | Horntje. . . . .        | eind van 1               | eind van 1   | —           | —   | 44,8                     | 161 | 58,9  | 145 | 56,5  | 138 |
| Texel-<br>stroom     | Horntje. . . . .        | begin van 3              | begin van 3  | —           | —   | 33,6                     | 163 | 45,9  | 150 | 42,7  | 143 |
|                      | Oude Schild . . . . .   | 3 a/b                    | 3 a/b        | 35–40       | 170 | 33,2                     | 165 | 44,9  | 152 | 41,5  | 145 |
|                      | Burgzand . . . . .      | eind van 3               | eind van 3   | 30–35       | 175 | 32,5                     | 167 | 42,6  | 154 | 39,0  | 147 |
|                      | Burgzand . . . . .      | begin van 23             | begin van 23 | 30–35       | 175 | 29,4                     | 174 | 37,3  | 155 | 33,1  | 148 |
|                      | Robbenzand . . . . .    | eind van 23              | eind van 23  | 30–35       | 180 | 28,1                     | 181 | 33,0  | 160 | 28,3  | 153 |
| Doove Balg           | Westeinde. . . . .      | 4 a/b                    | eind van 29  | 8           | 165 | 6,3                      | 162 | 23,0  | 162 | 17,8  | 156 |
|                      | OostdrempeL . . . . .   | eind van 4               | eind van 4   | 5           | 170 | 4,7                      | 171 | 8,0   | 169 | 9,6   | 166 |
| Inschot              | lichtboei „OudeVlie”    | begin van 8              | begin van 8  | 8–12        | 30  | 8,3                      | 38  | 8,7   | 4   | 8,2   | 359 |
| Vliestroom           | lichtboei „Caranan”     | eind van 11              | eind van 11  | 20–25       | 0   | 21,6                     | 4   | 26,4  | 352 | 25,8  | 349 |
| Driesprong           | bij Jack IJst. . . . .  | eind van 25              | eind van 25  | 1–2         | 350 | 1,9                      | 342 | 2,0   | 342 | 2,1   | 343 |
| Malzwijn             | OostdrempeL . . . . .   | eind van 2               | 2 a/b        | 12          | 170 | 10,0                     | 172 | 8,6   | 136 | 8,0   | 130 |
| Nauw van<br>Stavoren | Vrouwenzand . . . . .   | eind van 16              | eind van 16  | 30–35       | 90  | 27,0                     | 89  | —     | —   | —     | —   |
| Zuidoostrak          | Middelgronden . . . . . | begin van 6              | begin van 6  | —           | —   | 4,5                      | 116 | 4,0   | 164 | 4,6   | 162 |
|                      | „Zwemmer” . . . . .     | 6 a/b                    | 6 a/b        | —           | —   | 4,0                      | 104 | 2,2   | 159 | 2,8   | 162 |
|                      | „Klaasoom” . . . . .    | 6 b/c                    | 6 b/c        | —           | —   | 3,7                      | 70  | 1,6   | 18  | 1,0   | 11  |
|                      | lichtboei „OudeVlie”    | eind van 6               | eind van 6   | —           | —   | 4,0                      | 51  | 3,0   | 2   | 2,4   | 358 |

Ook wat de stroomen betreft bestaat voldoende overeenstemming tusschen de waarnemingen en de berekende getallen *Za*. Hierbij moet worden opgemerkt dat de stroommetingen slechts een gebrekkig beeld van de werkelijkheid geven. Zij zijn, op één enkele uitzondering (slot van § 12) na, onvoldoende om tot een nauwkeurige kennis van alle componenten die zich bij de harmonische analyse voordoen, te geraken en men heeft er zich toe moeten bepalen in de grafische voorstelling der stroomen zoo goed mogelijk de sinusoïde met de periode van  $M_2$  te trekken. Zoo werden de opgegeven getallen gevonden.

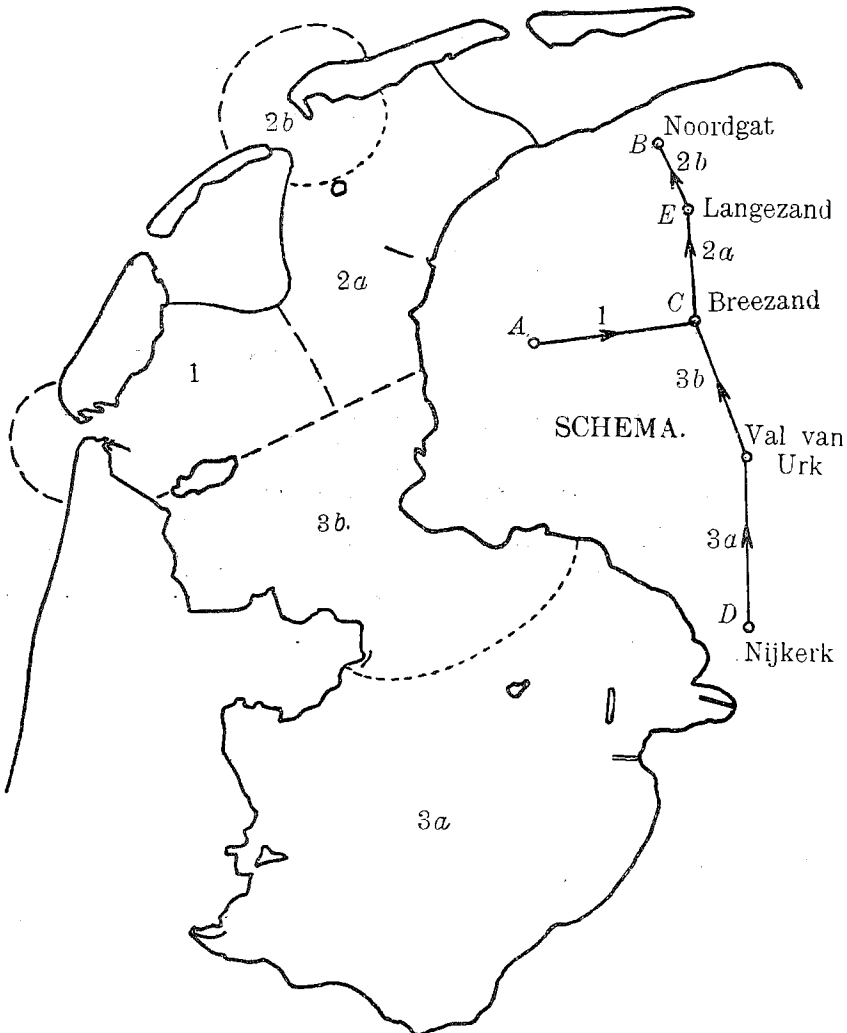
Later (§ 47) zal besproken worden wat uit de uitkomsten aangaande den invloed van de afsluiting der Zuiderzee kan worden afgeleid.

§ 46. *Verkorte berekeningen. Andere partieele getijden.* Een aantal nieuwere berekeningen, waarvan hieronder eenige uitkomsten worden medegedeeld, zijn opgezet met een uiterst eenvoudig schema. De bedoeling hiervan was na te gaan of op deze wijze het getij in hoofdtrekken goed kon worden weergegeven en of voor den toestand na de afsluiting ongeveer hetzelfde zou worden gevonden als bij de meer ingewikkelde berekeningen. Daar dit het geval bleek te zijn, werd het mogelijk met betrekkelijk weinig arbeid ook andere getijden dan het dubbeldaagsche hoofdgetij, zooals  $K_1$ ,  $O$ ,  $M_4$  en  $M_6$ , te berekenen, en zodoende een beter inzicht in de na de afsluiting

Schematische berekeningen.

Indeeling van het gebied.

1 : 1 000 000.



Figuur 31.

in de Waddenzee bestaande getijbeweging te verkrijgen dan met de beschouwing van  $M_2$  alleen bereikt kan worden.

Ook konden met geringe moeite enkele speciale vraagstukken worden onderzocht (bijlage 9), zooals de invloed van een andere waarde van  $C$  (§ 32), van een anderen exponent van  $v$  in de weerstandswet (§ 114,  $i$ ), van een abnormalen middenstand (§§ 17, 26, 27 en 47) en van het voorkomen van vastzittend ijs in de Zuiderzee (§ 53).

Ten slotte was het nu mogelijk een volledige getijberekening onder de bijlagen op te nemen (bijlage 7).

Bij de berekeningen die den tegenwoordigen toestand moeten weergeven is het gebied verdeeld in vijf deelen, (zie figuur 31) waarvan twee ( $3a$  en  $3b$ ) ten zuiden van den toekomstigen afsluitdijk liggen, terwijl de drie overige ( $1$ ,  $2a$  en  $2b$ ) te zamen de Waddenzee vormen. De Eierlandsche

en Amelandsche zeegaten zijn weer verwaarloosd en voor  $C$  is de waarde 530 (§ 32) genomen, behalve voor die berekeningen, waarin de invloed van een andere waarde van die constante is nagegaan.

De uitkomsten van al deze berekeningen zijn opgenomen in bijlage 9.

De afsluiting brengt in het geulennet alleen de verandering dat  $3a$  en  $3b$  wegvallen.

Omtrent de berekeningen van de dagelijksche getijbeweging, die met  $Zb$  — bij afgesloten Zuiderzee met  $Ab$  — zijn aangeduid, kan het volgende worden medegedeeld.

De berekening van  $M_2$ , die men in hoofdzaak in bijlage 7 vindt, verliep als vroeger. Daarbij werden de waarden die voor de maximale snelheid  $v_m$  in de verschillende geulen worden aangenomen, ten einde de weerstandscoefficienten  $k$  te bepalen, stapsgewijze verbeterd, totdat voldoende overeenstemming bestond tusschen de aangenomen waarden en de sterkte van de stroomen, die uit de berekening volgden.

Ten slotte is de berekening uitgevoerd met de afmetingen en stroomen van tabel 9. De in die tabel voorkomende symbolen hebben dezelfde beteekenis als in tabel 6 (blz. 102 en 103).

TABEL 9.

Geulennet van berekening  $Zb$ .

| N <sup>o</sup> . | Geul.<br>Ligging.                       | $O$    | $l$  | Dwarsprofiel.    |                  |                  |                  | $v_m$ | $S$   | $C^2$  |
|------------------|---|--------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|--------|
|                  |   |        |      | $b_1 \times q_1$ | $b_2 \times q_2$ | $b_3 \times q_3$ | $b_4 \times q_4$ |       |       |        |
| 1                | Heldersche zeegat-<br>Texelstroom . . . | 634,5  | 47,0 | 2000 × 20        | 1500 × 8         | 3000 × 4         | 7000 × 0         | 80    | 40,00 | 280000 |
| 2a               | Oostdeel Waddenzee .                    | 686,0  | 28,0 | 1500 × 10        | 3500 × 5         | 19500 × 0        | —                | 75    | 20,93 | id.    |
| 2b               | Vlie . . . . .                          | 201,4  | 19,0 | 3600 × 16        | 7000 × 0         | —                | —                | 80    | 46,10 | id.    |
| 3a               | Kom Zuiderzee . . .                     | 2633,4 | 63,0 | 41800 × 3,8      | —                | —                | —                | 14    | 22,20 | id.    |
| 3b               | Overgangsgebied . .                     | 822,5  | 35,0 | 7500 × 6,5       | 16000 × 3        | —                | —                | 40    | 33,40 | id.    |

Vervolgens werd overgegaan tot de berekening van eenige andere partieele getijden. Daarbij behoefden de dubbeldaagsche getijden  $S_2$ ,  $N_2$  en  $K_2$  niet afzonderlijk beschouwd te worden, daar hun perioden zoo weinig van die van het hoofdgetij  $M_2$  verschillen, dat men ze onder dit laatste kan begrijpen. Zij brengen alleen een versterking, verzwakking, vervroeging of verlaten van het hoofdgetij teweeg.

De berekening werd daarom beperkt tot de beide voornaamste enkeldaagsche getijden  $K_1$  en  $O$  en tot de viermaal- en zesmaaldaagsche maansgetijden  $M_4$  en  $M_6$ .

De eerstgenoemde,  $K_1$  en  $O$ , hebben ten gevolge, dat de twee in een etmaal voorkomende maximum hoogten, die, als  $M_2$  alleen bestond, aan elkaar gelijk zouden zijn, min of meer van elkaar verschillen; op de oogenblikken waarop die maxima zich voordoen heeft nl. een enkeldaagsch getij tegengestelde fasen. Evenzoo brengen  $K_1$  en  $O$  een ongelijkheid in de twee minima teweeg.

De getijden  $M_4$  en  $M_6$  dragen er verder toe bij de gedaante der getijkromme, de afwijking nl. van een sinusoïde, te bepalen.

De frequentie van  $K_1$  is  $0,729 \cdot 10^{-4}$ , die van  $O$   $0,677 \cdot 10^{-4}$  (§ 41). Daar zij betrekkelijk weinig van elkaar verschillen, is voor de frequentie van beide het gemiddelde van deze waarden genomen. Dit is  $0,703 \cdot 10^{-4}$ , juist de helft der frequentie van  $M_2$ .

De frequentie van  $M_4$  is viermaal en die van  $M_6$  zesmaal zoo groot.

Wat de weerstandscoefficienten  $k$  betreft, die, zooals reeds gezegd werd (§ 44), van de bestaande stroomsnelheid afhangen, deze zouden overeenkomstig het reeds in § 44 genoemde beginsel zóó bepaald kunnen worden, dat voor een volle periode, alle componenten der getijbeweging te zamen genomen, de negatieve arbeid van den met den coëfficiënt  $k$  berekenden lineairen weerstand even groot is als die van den met de constante van

TABEL 10.

## Uitkomsten van de schematische berekening Zb—Ab.

| Getij.<br>Frequentie n.      |                             | $M_2$<br>$1,405 \times 10^{-4}$ rad: per sec. |      |       |     |       |     | $K_1$<br>$0,703 \times 10^{-4}$ rad: per sec. |     |       |     |       |     | $O$<br>$0,703 \times 10^{-4}$ rad: per sec. |     |       |     |       |     | $M_4$<br>$2,810 \times 10^{-4}$ rad: per sec. |     |       |     |       |     | $M_6$<br>$4,214 \times 10^{-4}$ rad: per sec. |     |       |     |       |     |
|------------------------------|-----------------------------|---|------|-------|-----|-------|-----|---|-----|-------|-----|-------|-----|---|-----|-------|-----|-------|-----|---|-----|-------|-----|-------|-----|---|-----|-------|-----|-------|-----|
|                              |                             | Waarn.  |      | Zb    |     | Ab    |     | Waarn.  |     | Zb    |     | Ab    |     | Waarn.                                      |     | Zb    |     | Ab    |     | Waarn.  |     | Zb    |     | Ab    |     | Waarn.  |     | Zb    |     | Ab    |     |
|                              |                             | Ampl.   | ∞    | Ampl. | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl.   | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl.                                       | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl.   | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl.   | ∞   | Ampl. | ∞   | Ampl. | ∞   |
| Verticaal getij.             | Westgat . . . . .           | 67  | 158  | 67,0  | 158 | 67,0  | 158 | 7   | 359 | 7,0   | 359 | 7,0   | 359 | 9   | 195 | 9,0   | 195 | 9,0   | 195 | 12  | 195 | 12,0  | 195 | 12,0  | 195 | 7,5   | 270 | 7,5   | 270 | 7,5   | 270 |
|                              | Breezand . . . . .          | 38  | 240  | 40,4  | 246 | 63,3  | 250 | 3,5   | 40  | 3,8   | 40  | 7,6   | 30  | —   | —   | 4,7   | 238 | 9,5   | 228 | 3   | 330 | 2,7   | 344 | 5,2   | 342 | 2,5   | 75  | 2,5   | 97  | 3,7   | 116 |
|                              | Langezand. . . . .          | 70  | 225  | 78,0  | 227 | 80,0  | 234 | 5   | 20  | 6,4   | 14  | 7,0   | 17  | 7   | 215 | 7,5   | 217 | 8,3   | 220 | 7   | 300 | 7,8   | 314 | 6,7   | 317 | 3   | 10  | 3,2   | 24  | 6,0   | 53  |
|                              | Noordgat . . . . .          | 79  | 201  | 79,1  | 201 | 79,1  | 201 | 7   | 1   | 6,8   | 1   | 6,8   | 1   | 8   | 205 | 7,9   | 205 | 7,9   | 205 | 9   | 250 | 9,0   | 250 | 9,0   | 250 | 6   | 330 | 6,0   | 330 | 6,0   | 330 |
|                              | Val van Urk. . . . .        | 8   | 300  | 8,9   | 303 | —     | —   | 2   | 100 | 1,8   | 109 | —     | —   | —   | —   | 2,3   | 308 | —     | —   | 1   | 80  | 1,6   | 63  | —     | —   | 0,7   | 230 | 0,6   | 239 | —     | —   |
|                              | Nijkerk. . . . .            | 13  | 22   | 13,2  | 34  | —     | —   | 2,5   | 130 | 2,3   | 135 | —     | —   | 3,2   | 331 | 2,7   | 332 | —     | —   | 0,5   | 230 | 1,3   | 238 | —     | —   | 0,5   | 100 | 1,0   | 114 | —     | —   |
| Stroom.                      | geul 1 Westgat . . . . .    | 51  | 156  | 55,7  | 147 | 71,4  | 138 | 3,3   | 321 | 4,2   | 338 | 4,4   | 294 | 3,5   | 173 | 5,6   | 176 | 5,6   | 133 | 6   | 185 | 6,7   | 165 | 7,6   | 180 | 7   | 270 | 9,4   | 250 | 5,3   | 262 |
|                              | geul 1 Breezand . . . . .   | 25  | 185  | 38,4  | 191 | 31,1  | 163 | —   | —   | 3,4   | 10  | 1,2   | 312 | —   | —   | 4,6   | 206 | 1,8   | 153 | —   | —   | 8,2   | 282 | 6,2   | 280 | —   | —   | 7,3   | 63  | 3,0   | 113 |
|                              | geul 2a Breezand . . . . .  | 20  | 140  | 28,6  | 128 | 31,1  | 163 | —   | —   | 1,1   | 225 | 1,2   | 312 | —   | —   | 1,4   | 82  | 1,8   | 153 | —   | —   | 5,7   | 260 | 6,2   | 280 | —   | —   | 4,0   | 64  | 3,0   | 113 |
|                              | geul 2b Langezand . . . . . | 44  | 358  | 38,1  | 357 | 43,8  | 350 | —   | —   | 2,3   | 149 | 2,4   | 118 | —   | —   | 2,5   | 349 | 2,6   | 316 | —   | —   | 7,5   | 95  | 7,1   | 96  | —   | —   | 3,6   | 224 | 2,4   | 215 |
|                              | geul 2b Noordgat . . . . .  | 55  | 350  | 54,4  | 338 | 61,8  | 337 | —   | —   | 3,0   | 135 | 3,2   | 110 | —   | —   | 3,4   | 336 | 3,8   | 311 | —   | —   | 8,9   | 67  | 8,2   | 68  | —   | —   | 2,5   | 135 | 4,6   | 140 |
|                              | geul 3b Breezand . . . . .  | 28  | 45   | 35,6  | 56  | —     | —   | —   | —   | 4,5   | 200 | —     | —   | —   | —   | 5,4   | 39  | —     | —   | —   | —   | —     | 3,6 | 137   | —   | —   | —   | —     | 3,3 | 243   | —   |
| geul 3b Val van Urk. . . . . | 30                          | 102   | 34,6 | 102   | —   | —     | —   | —   | 3,7 | 215   | —   | —     | —   | —   | 4,6 | 54    | —   | —     | —   | —   | —   | 2,0   | 250 | —     | —   | —   | —   | 2,7   | 18  | —     | —   |

De amplituden van het verticale getij zijn uitgedrukt in centimeters; die van den stroom in 1000 m<sup>3</sup> per seconde, de kappagetallen ∞ alle in graden.

De onder „Waarn.” genoemde cijfers voor het verticale getij zijn afgeleid uit peilschaalgegevens van in de nabijheid gelegen plaatsen; die voor den stroom zijn verkregen door de waarden van de naast elkander liggende geulen bij elkander op te tellen. Voor „waargenomen stroom Westgat” is gegeven de in de Helsdeur gemeten stroom (§ 12).

EYTELWEIN berekenden werkelijken weerstand. Het is intusschen gebleken, dat waarden van  $k$  aldus bepaald niet noemenswaard verschillen van die, welke men vindt door denzelfden regel alleen op het hoofdgetij toe te passen, zooals vroeger gedaan is. Op dezen grond zijn de berekeningen voor de andere getijden met de reeds vroeger gebezigde waarden van  $k$  uitgevoerd. Dit had nog het voordeel, dat bij alle secundaire getijden met dezelfde weerstandscoëfficiënten kon worden gerekend.

In tabel 10 zijn de uitkomsten, waartoe de verkorte berekeningen met het geulennet van figuur 31 geleid hebben, vereenigd.

De onder  $Z$  opgegeven berekende waarden vertoonen een bevredigende overeenstemming met de waarnemingen; wat  $M_2$  betreft wijken zij dan ook niet veel af van de berekende waarden in de tabellen 7 en 8.

§ 47. *Verandering der getijden in de Waddenzee tengevolge van de afsluiting der Zuiderzee.* Uit de medegedeelde uitkomsten blijkt dat de amplitude van het verticale getij aan de Friesche kust nabij den afsluitdijk aanmerkelijk zal vergroot worden. Wat  $M_2$  betreft, is de vergrooting volgens tabel 7 aan den afsluitdijk nabij het midden (Doove Balg West) ongeveer 26 cm, te Zurig 22 cm en te Harlingen 15 cm, terwijl men voor Piaam na de afsluiting zal mogen rekenen op het getij, hetwelk voor dat geval bij de Middelgronden werd gevonden. Dit beteekent voor Piaam een vergrooting van bijna 40 cm, of, als men rekening houdt met den gewijzigden invloed van de aswenteling der aarde, ruim 30 cm. Volgens tabel 10 mag men langs de Friesche kust in de nabijheid van den dijk een verhooging van 28 cm (Breezand) en verder noordwaarts een toeneming van eenige centimeters (Langezand) verwachten. Men vindt al deze getallen door de uitkomst van de berekening  $Z$  van die der overeenkomstige berekening  $A$  af te trekken.

Bij de versterking van het getij  $M_2$  moet nog, voor zoover de verschillende getijden op hetzelfde oogenblik de maximum hoogte kunnen geven, de versterking van de in de vorige § beschouwde secundaire getijden worden opgeteld. De vergrooting der amplitude aan de kust nabij Piaam zou volgens tabel 10 voor  $K_1$ ,  $O$ ,  $M_4$  en  $M_6$  resp. op 4, 5, 2 en 1 cm gesteld kunnen worden.

Voor het geval, dat de dijk naar Zurig wordt gelegd, gelden de getallen  $A'a$  van tabel 7. Voor punten nabij de Friesche kust verschillen zij niet noemenswaardig van de getallen  $Aa$ ; voor Zurig zelf komt men tot ruim een centimeter grootere hoogte, een verschil dat in elk geval, het moge vaststaan of niet, kan worden verwaarloosd.

De volgende tabel 11 bevat als einduitkomst der getijberekeningen de getijconstanten die voor eenige plaatsen langs de Waddenzee na de afsluiting mogen worden aangenomen.

### Getijconstanten na de afsluiting der Zuiderzee.

TABEL 11.

(Afsluitdijk den Oever—Piaam).

| GETIJ.          | Harlingen. |        | Zurig. |        | Piaam. |       | den Oever. |       |      |
|-----------------|------------|--------|--------|--------|--------|-------|------------|-------|------|
|                 | Ampl.      | α      | Ampl.  | α      | Ampl.  | α     | Ampl.      | α     |      |
| Enkeldaagsch    | $K_1$ . .  | 6,5 cm | 40°    | 7,5 cm | 45°    | 8 cm  | 50°        | 7 cm  | 25°  |
|                 | $O$ . .    | 8 "    | 235°   | 10 "   | 240°   | 10 "  | 245°       | 9 "   | 220° |
| Dubbeldaagsch   | $M_2$ . .  | 77 "   | 265°   | 76 "   | 260°   | 73 "  | 245°       | 69 "  | 230° |
| Viermaaldaagsch | $M_4$ . .  | 5 "    | 60°    | 6 "    | 45°    | 5,5 " | 20°        | 7,5 " | 275° |
| Zesmaaldaagsch  | $M_6$ . .  | 2,5 "  | 200°   | 2 "    | 220°   | 2 "   | 160°       | 3 "   | 35°  |

Volledigheidshalve is in deze getallen rekening gehouden met de krachten van CORIOLIS, ofschoon in tegenstelling met den nu bestaanden toestand (§ 45) de invloed dier krachten na de afsluiting slechts gering zal zijn. Hij zal, wat de amplituden der getijden betreft, hoogstens een enkelen centimeter en, wat hun fasen aangaat, niet meer dan een vijftal graden bedragen.

Om tot de kennis van het peil der hoogwaters, vooral bij springtij, te komen, moeten nog meer getijden in aanmerking worden genomen. Het getij  $M_3$  bijvoorbeeld, dat slechts amplituden heeft van 1 tot 3 centimeter, werkt bij springtij samen met een aantal andere achtmaaldaagsche getijdjes en heeft met deze te zamen een niet te verwaarloozen invloed.

Het gaat niet aan te berekenen hoe dit getij na de afsluiting der Zuiderzee in de Waddenzee zal zijn: de onzekerheden worden te groot. Op grond van wat bij  $M_4$  en  $M_6$  is gevonden schijnt het niet te gewaagd aan te nemen dat, evenals bij  $M_6$ , de amplitude weinig zal verschillen van de tegenwoordige en dat het tijdstip van hoogwater, tenminste aan de Friesche kust, een weinig later zal vallen dan thans (20 tot 45 graden).

Verder is het duidelijk dat de wijziging van de dubbeldaagsche getijden door de afsluiting der Zuiderzee eenzelfde zal zijn als die van  $M_2$ , d.w.z. dat de amplituden in dezelfde verhouding zullen vergrooten, terwijl de kappagetallen ongeveer evenveel als dat van  $M_2$  zullen veranderen.

Evenzoo kan men de verandering der viermaaldaagsche getijden afleiden uit die van  $M_4$ , van de zesmaaldaagsche uit  $M_6$  en van de achtmaaldaagsche uit  $M_8$ .

De middenstand van den zeespiegel kan bij open Zuiderzee in de omgeving van den afsluitdijk op 3 tot 8 centimeter onder N.A.P. worden gesteld. Na de afsluiting zal men op een iets lager niveau, b.v. op 8 tot 10 centimeter onder N.A.P. kunnen rekenen, waarbij o.a. te denken is aan het wegvallen van den invloed van water van kleiner soortelijk gewicht. Treedt plaatselijk een hogere middenstand op, dan zal dat te wijten zijn aan onvolledige ontwikkeling van laagwater door bankvorming (blz. 104), waarmee een verkleining van de amplitude van het getij gepaard gaat, zoodat het hoogwater niet hooger wordt.

Wat de centrifugaalkracht betreft, die als evenredig met de tweede macht der snelheid zijnde bij deze vraag van den middenstand in aanmerking kan komen, haar invloed blijft tot een enkelen centimeter beperkt.

Om dezelfde reden als de centrifugaalkracht heeft ook de kracht van BERNOULLI invloed. Intusschen is deze alleen merkbaar op plaatsen waar, zooals in de zeegaten, zeer groote stroomsnelheden voorkomen. Zoo verlaagt zij bij den tegenwoordigen toestand den middenstand bij de peilschaal te Helder met enkele centimeters.

Men kan aannemen dat de langzame veranderingen in den middenstand (getijden van lange periode, § 41) geen wijziging door de afsluiting der Zuiderzee zullen ondergaan.

Op grond van het gezegde en met de partieele getijden van tabel 11 komt men voor de hoogwaters tot de volgende waarden:

|  | Harlingen. | Zurig. | Piaam. | den Oever. |                  |
|--|------------|--------|--------|------------|------------------|
| Gemiddeld hoogwater.                   | 77         | 73     | 69     | 60         | } cm<br>+ N.A.P. |
| Zeer hoog hoogwater springtij. . . . . | 111        | 108    | 102    | 92         |                  |

Ten opzichte van den toestand bij open Zuiderzee beteekent dit een verhooging van:

|  | Harlingen. | Zurig. | Piaam. | den Oever. |      |
|--|------------|--------|--------|------------|------|
| Gemiddeld hoogwater.                   | 21         | 25     | 37     | 33         | } cm |
| Zeer hoog hoogwater springtij. . . . . | 25         | 35     | 50     | 44         |      |

De afleiding van deze cijfers vindt men in bijlage 3.

In deze uitkomsten is uit den aard der zaak een vrij groote onzekerheid. In de eerste plaats is de getijberekening zelf nog steeds eenigszins gebrekkig; de uitkomsten daarvan kunnen zeker enkele centimeters van de werkelijkheid afwijken.

Voor al bij de getijden  $K_1$ ,  $O$ ,  $M_4$  en  $M_6$ , die alleen met het eenvoudige schema werden berekend, en  $M_8$ , dat in het geheel niet berekend maar geschat is, zullen relatief vrij groote fouten zijn gemaakt. Daarbij komen de onzekerheid van den middenstand en de omstandigheid dat bijvoorbeeld de invloed der kracht van CORIOLIS eenigszins schattenderwijze moest worden berekend.

Voor het getij bij stormvloed en wijken de cijfers weer wat van de hierboven vermelde af. Door de grootere diepten plant de getijgolf zich dan anders voort en ook de invloed van de afsluiting der Zuiderzee is dan niet dezelfde als bij normale waterstanden, maar grooter. Een opzettelijke berekening, waarbij een twee meter hogere waterstand werd aangenomen (bijlage 9) heeft dit doen zien.

Alles bij elkander genomen mag men wel besluiten dat de werkelijk optredende verhoogingen belangrijk, bijvoorbeeld 10 à 20 procent, van de hier vermelde waarden kunnen afwijken.

Daarentegen geeft de goede overeenstemming, die bij het afsluiten van het Amsteldiep tusschen berekening en werkelijkheid bestond (§ 52), vertrouwen in de juistheid van de gebezigde rekenwijze.

§ 48. *De veranderingen in het geulennet.* De nadruk moet nog worden gelegd op een andere bron van afwijkingen van de berekende getijverhooging.

Zooals later (§ 51) zal worden besproken, zullen op den duur de in de Waddenzee aanwezige geulen zich gaan aanpassen aan de nieuwe getijbeweging. Daardoor zal dan omgekeerd de voortplanting van de getijgolven weer worden gewijzigd.

Wanneer men tracht zich door berekening van de te verwachten verschijnselen rekenschap te geven, stuit men op zooveel onzekerheden, dat een bruikbaar resultaat niet is te bereiken.

Er is echter een poging gedaan om tenminste voor het getij  $M_2$  een inzicht te verkrijgen in de richting waarin de veranderingen zullen gaan (de berekening  $E$  van bijlage 8).

Daarbij bleek onder anderen dat, wanneer in de Waddenzee een nieuwe evenwichtstoestand is ingetreden, het getij er nog iets sterker zal zijn dan in § 47 is aangegeven.

Uit dien hoofde zullen dus ook de daar genoemde verhoogingen van hoogwater nog wat grooter worden. Volgens de berekening bedraagt deze extra verhooging overal wel belangrijk minder dan een tweetal decimeters.

§ 49. *Berekening der getijden in het kanaal van Bristol.* Toen de methode voor de getijberekening was uitgewerkt, scheen het wenschelijk haar op de proef te stellen door vergelijking ook met een geval waarin bij de landwaartsche voortplanting de rijzingen en dalingen toenemen. Dit doet zich in het bijzonder voor bij zeearmen die zich trechtervormig vernauwen en een merkwaardig voorbeeld heeft men in het kanaal van Bristol. Het

bleek nu inderdaad mogelijk van de daarin bestaande getijbeweging met de waarden van den coëfficiënt  $C$ , die uit de stroommetingen in de Waddenzee waren afgeleid, rekenschap te geven. O.a. werd voor de zeer groote springgetijrijzing van 11,75 m bij Chepstow (aan den mond van de Severn) 11,80 m gevonden. Het behoeft nauwelijks gezegd te worden dat deze volkomen overeenstemming toeval is en dat men ook voldaan had kunnen zijn als er een afwijking van 5 % was gevonden.

§ 50. *Invloed van de afsluiting op den getijstroom door het Heldersche zeegat.* Een belangrijke uitkomst der berekeningen is dat de amplitude van den stroom in het Heldersche zeegat na de afsluiting grooter zal worden dan thans. Voor het geval dat de dijk naar Piaam wordt gelegd kan men de getallen  $Za$  en  $Aa$  in tabel 8 met elkaar vergelijken. Men komt dan voor Westgat, Kaaphoofd, Helder en Horntje tot vergrootingen van resp. 39, 33, 33 en 31 %. Volgens tabel 10 is in het Westgat een versterking van den stroom met 28 % te verwachten.

Ofschoon nu uit den aard der zaak in al deze getallen een vrij groote fout kan zijn, kan aan een aanmerkelijke versterking van den stroom in het Heldersche zeegat niet worden getwijfeld.

Dit is het wat den heer DE BLOCC VAN KUFFELER in October 1921 gebracht heeft tot de vraag of het wellicht in dit opzicht de voorkeur zou verdienen den afsluitdijk niet naar Piaam maar naar een meer noordelijk gelegen punt, b.v. Zurig, te richten.

De berekeningen zijn voor deze dijkrichting herhaald ( $A'$  en  $A'a$  van bijlage 8) en het bleek dat de stroom in dat geval inderdaad minder wordt versterkt dan bij den dijk naar Piaam het geval zou zijn. De getallen  $A'a$  in tabel 8 geven in vergelijking met de getallen  $Za$  voor Westgat, Kaaphoofd, Helder en Horntje vergrootingen der amplitude van den getijstroom van resp. 34, 27, 26 en 26 %.

Ook voor het Vlie kan men een versterking van den stroom, zij het ook in mindere mate dan voor het Heldersche zeegat, voorspellen. Volgens de getallen in tabel 8 voor Vliestroom medegedeeld zal die versterking ongeveer 22 % bedragen bij de afsluiting Wieringen—Piaam en ongeveer 19 % bij de afsluiting Wieringen—Zurig.

Overigens vindt men ook voor de Eierlandsche en Amelandsche zeegaten eenige versterking van den getijstroom. Bijlage 8 geeft voor het eerste omstreeks 10 %, voor het andere (Bornrif) 6 %.

Het kan op het eerste gezicht vreemd schijnen dat bij verkleining van het gebied waarin de getijden van uit de Noordzee doordringen, de stroom in de toegangswegen sterker zal worden. Toch behoort deze gevolgtrekking uit de theorie tot de uitkomsten die het best vaststaan. Het verschijnsel is een noodzakelijk gevolg van de omstandigheid dat de afmetingen der Zuiderzee *niet* zeer klein zijn in vergelijking met de golflengte der getijbeweging (§ 40)<sup>1)</sup>.

Om de zaak op te helderen kan men zich een kanaal van overal dezelfde breedte en diepte voorstellen, dat aan het eene einde met de volle zee in gemeenschap staat en aan het andere is afgesloten. Ondergaat nu aan het eerste einde de hoogte  $h$  wegens de getijbeweging in de zee voorgeschreven periodieke wisselingen met de amplitude  $a_h$ , dan ontstaan staande golven, waarbij de stroom aan dat einde een zekere amplitude  $a_s$  heeft. Deze staande golven kunnen, evenals in andere gevallen van golfbeweging, geacht worden te ontstaan door de superpositie van twee stelsels van loopende golven, die zich in tegengestelde richting voortplanten, en de bijzonderheden die zich bij de staande golven voordoen kunnen worden afgeleid uit de grootheden, die zich bij loopende golven (bij onbepaalde lengte van het kanaal) zouden voordoen, te weten: de voortplanting-

<sup>1)</sup> Reeds in 1890 werd in een vergadering van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs door Ir. H. E. DE BRUIJN op de versterking van de getijstroom in het Heldersche zeegat gewezen (literatuuropgave n°. 24).

snelheid  $u$ , de golflengte  $\lambda$  en de constante  $r$  die de verzwakking door den weerstand bepaalt, in dier voege dat de amplitude bij voortplanting over een afstand  $x$  in reden van 1 tot  $e^{-rx}$  afneemt. Men vindt, als  $l$  de lengte en  $b$  de breedte van het kanaal is,

$$\frac{a_s^2}{a_h^2} = \frac{4 \pi^2 b^2 u^2}{4 \pi^2 + r^2 \lambda^2} \cdot \frac{e^{2rl} + e^{-2rl} - 2 \cos \frac{4 \pi l}{\lambda}}{e^{2rl} + e^{-2rl} + 2 \cos \frac{4 \pi l}{\lambda}}$$

De eerste factor in het tweede lid is onafhankelijk van de lengte  $l$ , de tweede is kleiner of grooter dan 1 naarmate  $\cos \frac{4 \pi l}{\lambda}$  positief of negatief is; hij passeert de waarde 1 als  $\cos \frac{4 \pi l}{\lambda} = 0$  is.

Daaruit volgt dat die factor grooter is voor  $l = \frac{1}{4} \lambda$  dan voor  $l = \frac{3}{8} \lambda$ , en voor deze laatste waarde weer grooter dan voor  $l = \frac{1}{2} \lambda$ . Binnen het interval van  $\frac{1}{4} \lambda$  tot  $\frac{1}{2} \lambda$  kan dus, bij vastgehouden waarde van  $a_h$ , de stroomamplitude  $a_s$  bij verkleining van de lengte  $l$  toenemen.

Wel is waar is bij deze redeneering ondersteld dat de bewegingsvergelijkingen lineair zijn, maar het is niet te denken dat bij invoering van een quadratische weerstandswet het verschijnsel zou verdwijnen. Trouwens, bij de berekening der getallen van tabel 8 is, zoo goed het kon, met de quadratische weerstandswet rekening gehouden (§ 44).

§ 51. *Vorming van een wantij achter Texel en Vlieland.* Na de afsluiting der Zuiderzee zullen de getijstroomen in de geulen van het overblijvende gebied in sterkte veranderen (verg. § 45, tabel 8) en dit kan op den duur tot een wijziging in de configuratie van den bodem leiden. Op de plaatsen van sterker geworden stroom zal een uitschuring, op die waar weinig stroom loopt, een aanslibbing plaats hebben. Men kan met behulp van zekere empirische regels zeggen hoe het hiermede gesteld is, en men zou dus, als de getijberekeningen met genoegzame zekerheid konden worden uitgevoerd, de toekomstige wijzigingen in het geulennet kunnen aangeven, waaruit dan weder de daaruit voortvloeiende veranderingen in stroomloop en waterhoogten zouden kunnen worden afgeleid.

Intusschen meent de Staatscommissie zich, wegens de onzekerheid die uit de complicaties van het vraagstuk voortvloeien, van voorspellingen van dezen aard bijna geheel te moeten onthouden.

Slechts op één gevolgtrekking van den bedoelden aard, waartoe de getijberekeningen aanleiding geven, moge hier de aandacht worden gevestigd.

Achter alle Waddeneilanden komt een zoogenaamd wantij voor, een lijn waarlangs men bij laagwater vrijwel droogvoets den vasten wal kan bereiken. De getijgolven die van weerskanten uit de zeegaten komen interfereeren met elkander en de daarbij behoorende stroomen, die tegengesteld gericht zijn, heffen elkander op. Door het ontbreken van stroom kunnen op deze plaats geen geulen ontstaan en toevallig aanwezige slenken slibben op den duur dicht.

Beschouwt men Texel en Vlieland samen als één eiland, dan vindt men thans ook hier de aanduiding van een wantij ongeveer in de lijn Vliehors—Makkum. Dit wantij wordt echter doorbroken door eenige diepe geulen, waarin krachtige stroomen loopen. Het ligt voor de hand deze afwijking aan de aanwezigheid van de Zuiderzee toe te schrijven.

Nu is er van alle Waddeneilanden tusschen Noordholland en Jutland behalve Texel en Vlieland nog slechts één enkel waar het wantij doorbroken is, nl. Borkum. Het geulennet achter dit eiland vertoont eenige overeenkomst met dat in de Waddenzee. Daar de Dollart bij Borkum dezelfde rol speelt die achter Texel en Vlieland door de Zuiderzee wordt vervuld, wordt het vermoeden versterkt dat het doorbreken van het wantij

in beide gevallen aan dezelfde oorzaak is toe te schrijven, nl. de aanwezigheid van een betrekkelijk groote vloedkom. Wordt die vloedkom weggenomen, m. a. w. de Zuiderzee afgesloten, dan is er geen reden meer voor de afwijking van het normale geval en kan dus ook hier de vorming van een volledig wantij worden verwacht.

Dit is nu inderdaad wat de getijberekeningen leeren. Het bleek reeds bij de eerste berekening die werd uitgevoerd, en men ziet het in tabel 8 hieraan, dat in het Zuidoostrak (geul 6 van tabel 6), als men van Oude Vlie tot Middelgronden gaat, het kappagetal van den stroom een verandering ondergaat, die weinig van  $180^\circ$  verschilt ( $162^\circ$  voor  $Aa$ ,  $164^\circ$  voor  $A'a$ ). Dat wil zeggen dat de stroom aan de uiteinden van de geul tegengesteld gericht is en dat er ergens tusschen die einden een punt is, waar het water nagenoeg stilstaat. Ook in het Oude Vlie (geul 5 *b*) komt iets dergelijks voor (bijlage 8).

Hetzelfde verschijnsel vertoont zich ook in tabel 10. Men vindt daar onder  $M_2$  als kappagetal voor den stroom aan de einden van geul 2 *a* (zie figuur 31), zooals die na de afsluiting zal zijn,  $163^\circ$  en  $350^\circ$ .

§ 52. *Veranderingen in de getijbeweging gedurende en na het afsluiten van het Amsteldiep. Bevestiging der berekeningen.* Een contrôle op al deze berekeningen geven de waarnemingen tijdens en na de sluiting van het Amsteldiep, die gedurende het onderzoek der Staatscommissie, in het jaar 1924, plaats vond.

Reeds in 1922 was voor het getij  $M_2$  een berekening ( $W_1$  bijlage 8) opgezet met een geulennet hetwelk zich van dat bij open Zuiderzee alleen hierdoor onderscheidt dat de geul ten westen van Wieringen (19 *a* en *b* uit tabel 6) verbroken is. De getijden die bij deze berekening zijn gevonden moeten dus overeenstemmen met den toestand die ontstaan is na de verbinding van Wieringen met den vasten wal van Noordholland.

Zooals wel vooruit te verwachten was, leverde de berekening in het grootste deel van het gebied getijden op, die zeer weinig verschillen van de uitkomsten der berekening bij open Zuiderzee.

De voornaamste verschillen komen voor in de omgeving van Wieringen. Reeds op het punt „Breehorn” vindt men een getijversterking van 15 %, die in Westerland tot bijna 100 % stijgt. Bovendien geeft de berekening voor dit laatste punt een vervroeging van ruim een uur aan.

Aan de oostpunt van Wieringen komt slechts een minimale versterking van het getij.

Aan de zuidzijde van de afsluitingslijn, in de Wieringermeer, blijkt de uitkomst zeer gevoelig te zijn voor de richting die men daar aan den stroom toekent. Bij de oorspronkelijke berekening ( $W_1$ ) was ondersteld dat het vloedwater, dat door het Gaatje de Meer inkomt, zich daarin verspreidt zonder dat het langs Medemblik in de richting van de kom der Zuiderzee trekt. Reeds gedurende de afsluiting van het Amsteldiep bleek dat deze onderstelling niet goed was. Daarop werd een tweede berekening ( $W_2$  van bijlage 8) uitgevoerd, waarbij de geheele waterbeweging in de Wieringermeer deel uitmaakt van een doorgaande strooming tusschen den Oever en Medemblik.

Voor de Meer loopen de uitkomsten van de beide berekeningen onderling ver uiteen. Daar het met deze methode niet mogelijk is de stroomrichting te voorspellen, bleef men in onzekerheid omtrent het ten zuiden van de afsluiting te verwachten getij.

Later werd evenwel een methode bedacht, waarbij de stroomrichting in de Wieringermeer exact kon worden bepaald. Deze methode geeft voor het getij onmiddellijk ten zuiden van den nieuwen dijk bij Westerland een 15 à 20 % kleinere amplitude dan vóór de afsluiting en een vertraging van bijna een uur.

Een kleine verzwakking van het getij (5 à 10 %) en een minimale verlating (5 graden = 10 minuten) vindt men, ook met de berekening in

haar oorspronkelijken vorm, voor „Vrouwenzand” en de geheele kom van de Zuiderzee.

De overeenstemming van de uitkomsten der hier genoemde berekeningen en voorspellingen met de na de afsluiting van het Amsteldiep opgetreden getijbeweging is alleszins bevredigend te achten.

Men kan vooreerst het oog vestigen op de getijbeweging, zooals die thans aan de noord- en de zuidzijde van den afsluitdijk is geworden en die beweging met de uitkomsten der berekening vergelijken. Te Westerland aan de noordzijde van den dijk zijn de constanten van  $M_2$  thans 51 cm en  $198^\circ$ , terwijl berekend was 55 cm en  $199^\circ$ . Daarentegen is onmiddellijk ten zuiden van den afsluitdijk bij Westerland de amplitude van  $M_2$  geworden 28 cm en het kappagetal  $248^\circ$ , terwijl de herziene berekening geeft 27 cm en  $253^\circ$ . Wat de getallen voor de noordzijde betreft, moet worden opgemerkt, dat eenig achterblijven van de amplitude bij de berekende waarde verwacht was. De oorzaak van dit achterblijven is het verschijnsel, dat de stroom in een groot gedeelte van het Amsteldiep een loodrecht op het vaarwater gerichten component is gaan vertoonen. Dit dwars over het vaarwater trekken van den stroom zal bij voortschrijdende verzanding van het Amsteldiep geleidelijk toenemen, waardoor op den duur het getij van Westerland weer iets zwakker zal worden dan kort na de verbinding van Wieringen met van Ewijksluis het geval was.

Men kan ook voor elk der genoemde plaatsen, Westerland Noord en Zuid, en eveneens voor ieder ander punt, de waargenomen *veranderingen* in amplitude en phase met de berekende veranderingen vergelijken, de veranderingen in amplitude b.v. in procenten van de oorspronkelijke waarde uitdrukken. Daarbij doet zich in het geval van Westerland het bezwaar voor, dat de registreerende peilschaal vóór de afsluiting door verschillende locale omstandigheden een te sterk getij aangaf. Het gemiddelde getij zal ongeveer zoo sterk zijn geweest als de berekening  $Z$  (bijlage 8) aangeeft. Men kan nu óf de thans waargenomen amplitude met de in 1920 werkelijk waargenomene (33 cm) vergelijken, óf deze laatste door de zoeven bedoelde van 27,5 cm vervangen en vindt dan verschillende waarden voor de „waargenomen veranderingen”.

Wat plaatsen op grooteren afstand van den dijk betreft, is het volgende gebleken:

Het getij op den punt van den Breehorn is merkbaar versterkt. Bij den Oever is de verandering van het getij klein; zij wordt overheerscht door de wijzigingen, die de werken ter plaatse hebben veroorzaakt.

Wat de kom van de Zuiderzee betreft, de tijd die verloopen is sinds de afsluiting van het Amsteldiep is nog niet voldoende om hier de veranderingen nauwkeurig na te gaan. De verzwakking van het getij is in het gebied ten zuiden van de afsluitingslijn met zekerheid geconstateerd. Zij bedraagt volgens de gegevens van 1925 te Medemblik, Stavoren, Enkhuizen, Urk en Nijkerk respectievelijk 8, 5, 5, 12 en 6 %. Omtrent de verandering in phase, die in ieder geval gering is, kan nog geen uitsluitsel worden gegeven.

Ook de verwachtingen over de stroomen zijn uitgekomen. Metingen, die na de afsluiting zijn verricht in het Amsteldiep, bij de oostpunt van Wieringen en voor de haven van Medemblik, hebben aangetoond dat de verandering der stroomen op die plaatsen, zoowel wat sterkte als wat phase betreft, inderdaad overeenkomt met de uitkomsten van de berekeningen.

Als een mooie bevestiging van deze berekeningen is te beschouwen de uitschuring die het zeegebied tusschen den noordoosthoek van het Breezand en de Friesche kust tusschen Kornwerd en Makkum na de afsluiting van het Amsteldiep heeft ondergaan. Eerst nadat zij was waargenomen (toen men met het oog op den daar voorgenomen sluisbouw nieuwe peilingen had gedaan) is men op het denkbeeld gekomen, dat zij door de afsluiting van het Amsteldiep moet zijn veroorzaakt. Inderdaad bleek in

de uitkomsten der drie jaar vroeger uitgevoerde getijberekening, die in het begin dezer § genoemd werd, een stroomversterking in het bedoelde gebied voor te komen. Ook quantitatief is de overeenstemming tusschen de berekende stroomversterking (8 % bij het eind van geul 15) en de waargenomen profielverruiming (9 %) zoo goed als men maar kan wenschen.

In de volgende tabel 12 zijn de hoofdzaken van het medegedeelde samengevat. Waar twee getallen naast elkander staan opgegeven, is het eerste gevonden door als amplitude bij Westerland vóór de afsluiting te nemen 33 cm en het tweede, tusschen haakjes geplaatste, door die op 27,5 cm te stellen.

**Berekende en waargenomen veranderingen in de getijbeweging na de afsluiting van het Amsteldiep.**

TABEL 12.

|              |                   | Verticaal getij. |               |            |               |                | Stroom.                |            |            |                        |
|--------------|-------------------|------------------|---------------|------------|---------------|----------------|------------------------|------------|------------|------------------------|
|              |                   | Breehorn.        | Westerland N. | den Oever. | Westerland Z. | Kom Zuiderzee. | Breehorn (Amsteldiep). | den Oever. | Medemblik. | Fr. kust bij Kornwerd. |
| Berekend . . | Versterking ampl. | 19 %             | 100 %         | 4 %        | 0 %           | — 7 %          | — 41 %                 | 45 %       | — 50 % ?   | 8 %                    |
|              | Verlating phase   | — 2°             | — 37°         | 3°         | 14°           | 3°             | — 65°                  | 0°         | 30°        | 5°                     |
| Waargenomen  | Versterking ampl. | 15—20 %          | 56 (85) %     | 3 % ?      | — 18(0) %     | — 3 à 12 %     | — 40 %                 | 40 %       | — 50 % ?   | 9 %                    |
|              | Verlating phase   | 0°               | — 29°         | ?          | 18°           | ?              | — 60° ?                | ?          | 40—50°     | ?                      |

In het voorgaande werd steeds gesproken van het hoofdgetij  $M_2$ , welks phase en amplitude door harmonische analyse uit de waarnemingen werden afgeleid. Wat de rechtstreeks waargenomen grootheden betreft kan er nog worden bijgevoegd dat na de afsluiting het gemiddeld hoogwater te Westerland Noord 42 cm + N.A.P. lag, wat ten opzichte van den vroegeren toestand (bijlage 2, n°. 20) een verhooging van 18 cm beteekent. Het gemiddeld laagwater is tengevolge van de afsluiting 24 cm gedaald.

Ten slotte is met behulp van een dergelijke berekening nog een voorspelling gedaan omtrent de toestanden die *tijdens* de afsluitingswerken in het Amsteldiep zouden optreden. Van de gegevens die voor het verval en de stroomsnelheid op den in aanbouw zijnden dijk waren verkregen, is door de Directie der Zuiderzeewerken gebruik gemaakt bij het opstellen van het werkplan voor de afsluiting, o. a. wat betreft de uitgestrektheid van de bodembezinking.

De uitkomst heeft geleerd dat de berekende gegevens een goeden grondslag vormden voor het in de praktijk te volgen werkplan.

§ 53. *Afwijkingen van de normale getijbeweging in de Waddenzee.* Door wijlen Ir. H. E. DE BRUIN is de aandacht gevestigd op de versterking van het getij te Stavoren, Hindeloopen en Harlingen, toen in den winter van 1890 op 1891 de Zuiderzee was dichtgevroren <sup>1)</sup>.

Door het ijsdek werd de weerstand tegen de waterbeweging veel grooter, waardoor het getij in de kom van de Zuiderzee aanmerkelijk verzwakte. De uitwisseling van water tusschen Waddenzee en Zuiderzee hield wel niet geheel op, maar was toch belangrijk minder dan gewoonlijk, zoodat er in de Waddenzee een toestand ontstond, die het midden houdt tusschen dien bij open en dien bij afgesloten Zuiderzee. Dat daarbij langs de Friesche kust een niet onbeteekenende getijversterking optrad (niettegenstaande de waterbeweging ook daar wel door ijs belemmerd zal zijn geweest) is een

<sup>1)</sup> Literaturopgave n°. 25.

bevestiging te meer van de in het voorgaande omtrent de te verwachten getijverhooging verkregen uitkomsten.

Er is getracht in getijberekeningen den door het vastzittende ijs veroorzaakten grooteren weerstand tot uitdrukking te brengen. Daarbij bleek dat de toestand in hooge mate afhankelijk is van de wijze waarop het zwaarste ijs over de oppervlakte van de Zuiderzee is verdeeld.

Ook zullen locale omstandigheden een rol spelen. De zeer groote getijversterking die in Januari/Februari 1891 in Stavoren en Hindeloopen is waargenomen moet ten deele wel daaraan worden toegeschreven.

In elk geval geven de berekeningen, die in bijlage 9 zijn opgenomen, een vergrooting van de amplituden van het getij, die zeker niet meer is dan de geconstateerde.

Het verdient opmerking dat er behalve ijsbezetting nog andere oorzaken kunnen zijn, die de amplitude der getijbeweging in de Zuiderzee veranderen. Een dergelijke oorzaak vormen de schommelingen in den middenstand. Wanneer de middenstand in de Zuiderzee daalt neemt de weerstand tegen de voortplanting van de getijgolf toe, waardoor de amplitude — o.a. te Urk — vermindert. Inderdaad is in maanden waarin de middenstanden laag zijn geweest de amplitude te Urk meestal kleiner dan het gemiddelde van een lange periode, b.v. 10 jaar.

Vergelijkt men nu de afwijkingen van de maandgemiddelden te Urk ten opzichte van de normale amplitude met de overeenkomstige grootheden voor plaatsen om de Waddenzee, dan blijkt het dat zij over het algemeen tegengesteld verlopen. In de maanden, dat de amplitude te Urk — doorgaans tengevolge van de lage zeestanden — kleiner is dan het gemiddelde over langen tijd, komt het meer voor dat zij op de plaatsen langs de Waddenzee grooter dan de normale is, dan dat het omgekeerde het geval is.

Inderdaad bestaat er een — wel is waar zwakke — negatieve correlatie tusschen de amplitude van het getij te Urk eenerzijds en die te den Oever, Makkum en Harlingen anderzijds. Ook dit verschijnsel wijst er op, dat het getij in de Waddenzee sterker wordt naarmate er minder water naar de Zuiderzee stroomt.

Wanneer de waterstanden *ver beneden* de normale dalen wordt ook in de Waddenzee de voortplanting van het getij belemmerd. Hierdoor neemt het tijverschil daar niet meer toe, ofschoon de stroom naar en van de Zuiderzee zeer gering is. De voor dit geval geldende berekening (bijlage 9, middenstand een meter onder den normalen) geeft dan ook geen getijversterking in de Waddenzee te zien en van die versterking is in perioden waarin die zeer lage standen voorkwamen (b.v. midden Januari 1912) ook niets gebleken.

## B. INVLOED VAN DEN WIND.

§ 54. *Waterverplaatsing onder invloed van den wind. Driftstroom en opwaaiing.* Als over het water in een kanaal in de richting der lengte een standvastige wind strijkt, wordt daardoor op het vloeistofoppervlak een kracht in horizontale richting uitgeoefend, waarvan de grootte per vlakte-eenheid door  $F$  moge worden voorgesteld. Deze zal, naar gelang van omstandigheden, verschillende uitwerking hebben.

Stel vooreerst dat het kanaal twee uitgestrekte zeeën of bekkens verbindt, in welke de waterspiegel even hoog staat. Daar het water dan vrij kan toestroomen en wegvloeien blijft ook in het kanaal de spiegel horizontaal; er ontstaat alleen een stroom dien men „driftstroom” kan noemen.

Hoe die stroom zich bij het eerste optreden van den wind ontwikkelt, ligt voor de hand. Eerst brengt de kracht  $F$  de oppervlakkige lagen in beweging en deze sleepen vervolgens de dieper gelegen vloeistof mede,

zoodat, als de wind aanhoudt, ten slotte een stationaire toestand, met op elke diepte een bepaalde stroomsnelheid, ontstaat.

Het is interessant, zoowel in dit als in andere gevallen, de werking van een op het oppervlak aangrijpende kracht  $F$  te vergelijken met die van een kracht in dezelfde richting die gelijkmatig over de geheele diepte van de vloeistof verdeeld is. Ook in dit geval kan men van de kracht per eenheid van oppervlak spreken, waarmede nu bedoeld wordt de kracht werkende op de watermassa, die beneden die eenheid is gelegen. Is deze kracht  $F'$ , en  $q$  de diepte van het water, dan is de kracht per volume-eenheid  $\frac{F'}{q}$ . In het vervolg wordt steeds met  $F$  een oppervlaktekracht bedoeld en met  $F'$  een kracht die op het binnenste der vloeistof werkt.

Het is duidelijk dat in de twee beschouwde gevallen, ook wanneer de hoeveelheid water die door de volle doorsnede gaat dezelfde is, de wet volgens welke de snelheid van de diepte afhangt verschillend zal zijn.

Iets anders dan den zuiveren driftstroom krijgt men als het kanaal aan den kant waarheen de wind gericht is, stel aan den rechterkant, is afgesloten of met een bekken van beperkten omvang in gemeenschap staat. Dan ontstaat aan dat einde een grootere waterhoogte, tengevolge waarvan op de vloeistof in het kanaal een kracht naar links werkt, die den stroom naar rechts minder doet worden en ten slotte een stationaire toestand doet ontstaan, hierdoor gekenmerkt, dat door een doorsnede van het kanaal in het geheel genomen geen stroom, noch naar rechts noch naar links, gaat.

In het geval van een op het binnenste werkende kracht is dit een toestand van werkelijk evenwicht; het water zal overal in rust zijn zoodra het verhang  $i$  zoover is gestegen dat de daaruit voortvloeiende kracht per volume-eenheid  $g q i$  evenwicht maakt met de kracht  $\frac{F'}{q}$ , d.w.z. wanneer

$$i = \frac{F'}{g q} \quad (15)$$

is.

Daarentegen is het water, als het door een oppervlaktekracht wordt opgestuwd, ook wanneer de stationaire toestand bereikt is, niet in rust. De oppervlakkige lagen, rechtstreeks aan de kracht  $F$  blootgesteld, gaan nog altijd naar rechts, en de vloeistof nabij den bodem, bij welken de kracht  $F$  zich minder doet gevoelen en dus de kracht die uit het verhang voortvloeit de overhand kan hebben, stroomt naar links. De toestand zal stationair zijn als door het bovenste deel van een doorsnede evenveel water naar rechts gaat als door het benedenste deel naar links.

Is eenmaal aan die voorwaarde voldaan, dan kan men ergens in het kanaal een schot aanbrengen, hetzij in verticalen of in scheeven stand, zonder dat links daarvan de toestand noemenswaard verandert, althans indien de lengte van het overblijvende deel nog altijd zeer groot is in vergelijking met de diepte. De hoeveelheid water die door het bovenste deel van een doorsnede naar rechts gaat zal zich dan langs of nabij het schot naar beneden bewegen om vervolgens in het onderste deel van het kanaal terug te vloeien. Zoo ontstaat dicht bij het schot een nieuwe en vrij ingewikkelde bewegingstoestand, maar deze blijft beperkt tot een afstand die van de orde van grootte van de diepte is, zoodat in verreweg het grootste deel van de watermassa niets is veranderd.

In verband met deze beschouwing kan worden vastgesteld dat bij een zee waarvan de horizontale afmetingen zeer groot zijn in vergelijking met de diepte, de voorwaarde aan een kust of een dijk altijd deze is, dat in de nabijheid daarvan de totale stroom (over de volle diepte gerekend) loodrecht op de kust of den dijk nul is. Over de naar beneden of, in het geval van een afwaaiing, naar boven gerichte beweging nabij de kust behoeft men zich niet te bekommeren.

Dat inderdaad in een aan den wind blootgestelde watermassa de stroom beneden een geheel andere richting kan hebben dan boven is ook

bij de stroommetingen in de Zuiderzee gebleken (§ 19)<sup>1)</sup>, en zoo bestaat er aan het boven beschouwde terugvloeien in de onderste lagen geen twijfel. Houdt men daarmede rekening, dan kan men door een eenvoudige redeneering aantoonen dat een oppervlaktekracht  $F$  een grootere opwaaiing teweegbrengt dan een op het binnenste werkende kracht  $F'$  van dezelfde grootte.

Te dien einde vatte men de ruimte in het oog tusschen twee verticale doorsneden van het kanaal, die op een kleinen afstand  $l$  van elkaar liggen, en lette op de hoeveelheid van beweging van het tusschen die doorsneden liggende water. Doet men dit voor twee oogenblikken (nl. telkens voor het water dat dan tusschen de vlakken ligt), dan moet de verandering per tijdseenheid van die hoeveelheid van beweging gelijk zijn aan de resultante van alle op het beschouwde deel werkende krachten, mits men daarbij ook de kracht van BERNOULLI (§§ 123 en 124) mederekent. In den stationairen toestand moeten dus, daar de hoeveelheid van beweging constant blijft, de krachten elkander opheffen.

Nu werken per eenheid van breedte in de richting der lengte 1°. de kracht  $Fl$  op het oppervlak naar rechts, 2°. de uit de drukkingen aan weerskanten voortvloeiende kracht  $g \varrho q l i$ , die naar links gericht is ( $i$  is het verhang en  $q l$  het watervolume) en 3°. de wrijving aan den bodem, die naar rechts is gericht, omdat het water langs den bodem naar links gaat. Ziet men van de kracht van BERNOULLI af, dan volgt uit het evenwicht tusschen de drie krachten

$$g \varrho q l i > Fl,$$

of

$$i > \frac{F}{g \varrho q},$$

waaruit, in verband met (15), het gezegde volgt.

Deze ongelijkheid wordt nog versterkt als men de kracht van BERNOULLI in aanmerking neemt. Juist wegens de opstuwing is nl., als de bodem horizontaal is, de doorsnede van de watermassa aan den rechterkant iets grooter dan de andere, en men mag daarom wel aannemen dat zoowel in het bovenste als in het onderste deel der massa de snelheden naar rechts toe in grootte afnemen. Daaruit volgt (§ 34) dat de krachten van BERNOULLI naar rechts zijn gekeerd.

§ 55. *Stationaire bewegingen onder den invloed van een verhang en van den wind, elk afzonderlijk of te zamen werkende.* Men kan zich, behalve de reeds genoemde, nog andere stationaire bewegingstoestanden in het kanaal voorstellen; terwijl er een wind over het water strijkt kan de waterspiegel aan de uiteinden op willekeurige constante hoogten worden gehouden. Voor al deze gevallen kan de berekening worden uitgevoerd als men van de in § 35 genoemde onderstellingen uitgaat.

a. *Verhangstroom.* Is er geen wind, dan vindt men voor de snelheid  $v$  op de hoogte  $x$  boven den bodem

$$v = \sqrt{g \varrho i} \left[ \sqrt{\frac{q}{\nu}} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{q^3}{\mu}} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(q-x)^3}{\mu}} \right].$$

Zij neemt, zooals te verwachten was, van het oppervlak, waar zij de waarde

$$v_0 = \sqrt{g \varrho i} \left[ \sqrt{\frac{q}{\nu}} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{q^3}{\mu}} \right]$$

heeft, naar den bodem toe af. De gemiddelde snelheid is

$$\bar{v} = \sqrt{g \varrho i} \left[ \sqrt{\frac{q}{\nu}} + \frac{2}{5} \sqrt{\frac{q^3}{\mu}} \right].$$

<sup>1)</sup> Ook bij de stroommetingen die in Augustus 1921 in de Noordzee ten westen van Sylt zijn verricht is de tegen den wind in gerichte bodemstroom geconstateerd (literatuuropgave n°. 21, Tafel 3).

Ter vereenvoudiging kan men nog een coëfficiënt  $\alpha$  invoeren, zoodat

$$\mu = \nu \frac{q^2}{\alpha^2} \quad (16)$$

is. Daardoor wordt

$$v_0 = \sqrt{\frac{g q \varrho i}{\nu}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha\right)$$

en

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{g q \varrho i}{\nu}} \left(1 + \frac{2}{5} \alpha\right). \quad (17)$$

Vergelijkt men dit laatste met de formule

$$\bar{v} = C \sqrt{q i},$$

dan blijkt het dat de constante van EYTELWEIN met de nu ingevoerde coëfficiënten verbonden is door de betrekking

$$C = \left(1 + \frac{2}{5} \alpha\right) \sqrt{\frac{g \varrho}{\nu}}. \quad (18)$$

Met behulp hiervan en van (16) kunnen  $\mu$  en  $\nu$  worden uitgedrukt in  $C$  en  $\alpha$ . Wat deze laatste grootheid betreft, men zou die kunnen afleiden uit waarnemingen over de stroomsnelheid op verschillende diepten. Heeft men daaruit de verhouding van de oppervlaktesnelheid  $v_0$  en de gemiddelde snelheid  $\bar{v}$  gevonden, dan heeft men ter bepaling van  $\alpha$  de vergelijking

$$\frac{v_0}{\bar{v}} = \frac{1 + \frac{2}{3} \alpha}{1 + \frac{2}{5} \alpha}. \quad (19)$$

Het ligt voor de hand de wrijving aan den bodem en dus  $\nu$  als onafhankelijk van de diepte te beschouwen. Mocht hetzelfde van de constante van EYTELWEIN worden aangenomen, dan zou het blijkens (18) ook van  $\alpha$ , en dus blijkens (19) van de verhouding  $\frac{v_0}{\bar{v}}$  gelden. De coëfficiënt  $\mu$  die de wrijving tusschen de verschillende waterlagen bepaalt, zou evenredig met de tweede macht der diepte zijn, een afhankelijkheid die men eenigszins kan begrijpen als men bedenkt dat naarmate het water dieper is groter wervels kunnen ontstaan en dus de verschillen in stroomsnelheid in meerdere mate kunnen worden vereffend.

Volgens de formule van BAZIN (§ 32) neemt  $C$  bij toenemende diepte toe. Dit brengt mede dat ook  $\alpha$ , en daarmee de verhouding  $\frac{v_0}{\bar{v}}$ , grooter wordt, en dat  $\mu$  wat minder snel toeneemt dan  $q^2$ .

Onder de uitgevoerde stroommetingen zijn er vele die tot een, zij het dan ook ruwe bepaling van de verhouding van oppervlaktesnelheid en volume-snelheid kunnen leiden. Een toeneming van die verhouding met de diepte is misschien uit de uitkomsten af te leiden, maar niet met groote zekerheid. Daar de getallen sterk uiteenloopen kan er niet veel anders uit besloten worden dan dat  $\frac{v_0}{\bar{v}}$  tusschen zekere grenzen ligt, waaruit dan hetzelfde voor  $\alpha$  volgt.

Als grenzen voor  $\frac{v_0}{\bar{v}}$  mag men wel nemen 1,08 en 1,16 en als uiterste waarden van  $\alpha$  zullen daarom genomen worden  $\alpha = 0,35$  en  $\alpha = 0,80$ , bij welke de verhouding der snelheden resp. 1,082 en 1,161 wordt.

Als in het vervolg de invloed van  $\alpha$  moet worden geschat, zal de berekening veelal met de beide uiterste waarden worden uitgevoerd.

*b.* Stel nu, dat terwijl naar rechts de windkracht  $F$  werkt, er een naar links gerichte uit een verhang voortvloeiende kracht is, die per volume-eenheid  $f$  bedraagt. Met het oog op de richtingen wordt  $F$  als een positief,

en  $f$  als een negatief getal beschouwd; de absolute grootte van dit laatste wordt door  $|f|$  voorgesteld. Zoolang nu

$$|f| < \frac{F}{q}$$

is, stroomt de vloeistof over de geheele diepte naar rechts. Overschrijdt  $|f|$  die grens, dan ontwikkelt zich een tegengesteld gerichte strooming aan den bodem en als

$$|f| = 1,009 \frac{F}{q} \text{ of } 1,040 \frac{F}{q}$$

is geworden (al naarmate men  $\alpha = 0,35$  of  $0,80$  stelt), dan stroomt beneden evenveel water naar links, als boven naar rechts gaat. Daar  $|f| = g \varrho i$  is, is dus

$$i = 1,009 \frac{F}{g \varrho q} \text{ of } 1,040 \frac{F}{g \varrho q} \quad (20)$$

de maat voor de door den wind teweeggebrachte opstuwing. Hierdoor wordt het in § 54 gezegde bevestigd.

Neemt nu de kracht  $f$  boven de zoeven aangegeven waarde voortdurend toe, dan wint de stroom naar links het meer en meer van dien naar rechts. Deze laatste trekt zich in de bovenste lagen samen en moet ten slotte zelfs daar voor een stroom naar links plaats maken.

c. Bij elke gegeven grootte en elk teeken van de kracht  $f$  kan men de vraag stellen hoe sterk een ruimtekraft  $F'$  (§ 54) moet zijn om, met  $f$  samenwerkende, dezelfde gemiddelde snelheid  $\bar{v}$  en dus dezelfde waterverplaatsing door het kanaal teweeg te brengen als de oppervlaktekracht  $F$  met  $f$  te zamen veroorzaakt. Men denke zich hierbij  $F$  en  $F'$  steeds positief. Het blijkt dat  $F' > F$  moet zijn, zoodat in het algemeen een oppervlaktekracht sterker werkt dan een even groote volumekraft. Stel nu

$$F' = \omega F,$$

dan hangt de coëfficiënt  $\omega$  van de verhouding tusschen  $F$  en  $f$  af. Hij blijkt geheel bepaald te worden door de verhouding

$$\gamma = \frac{F}{q f}.$$

Tabel 46 (§ 150) geeft voor de uiterste waarden van  $\alpha$  het verband tusschen  $\omega$  en  $\gamma$  aan.

Is  $F'$  bekend, dan kan men gemakkelijk de gemiddelde stroomsnelheid berekenen. Aan  $F'$  beantwoordt nl. de kracht  $\frac{F'}{q}$  per volume-eenheid en is nu

$$\frac{F'}{q} + f > 0,$$

dan heeft men een resulterende kracht van deze grootte naar rechts, zooals die ook door een verhang

$$\frac{1}{g \varrho} \left( \frac{F'}{q} + f \right)$$

zou kunnen worden teweeggebracht. De gezochte snelheid, die naar rechts is gericht, heeft dus de grootte

$$C \sqrt{\frac{q}{g \varrho} \left( \frac{F'}{q} + f \right)}.$$

Is  $\frac{F'}{q} + f < 0$ , dan is er een beweging naar links met de gemiddelde snelheid

$$C \sqrt{-\frac{q}{g \varrho} \left( \frac{F'}{q} + f \right)}.$$

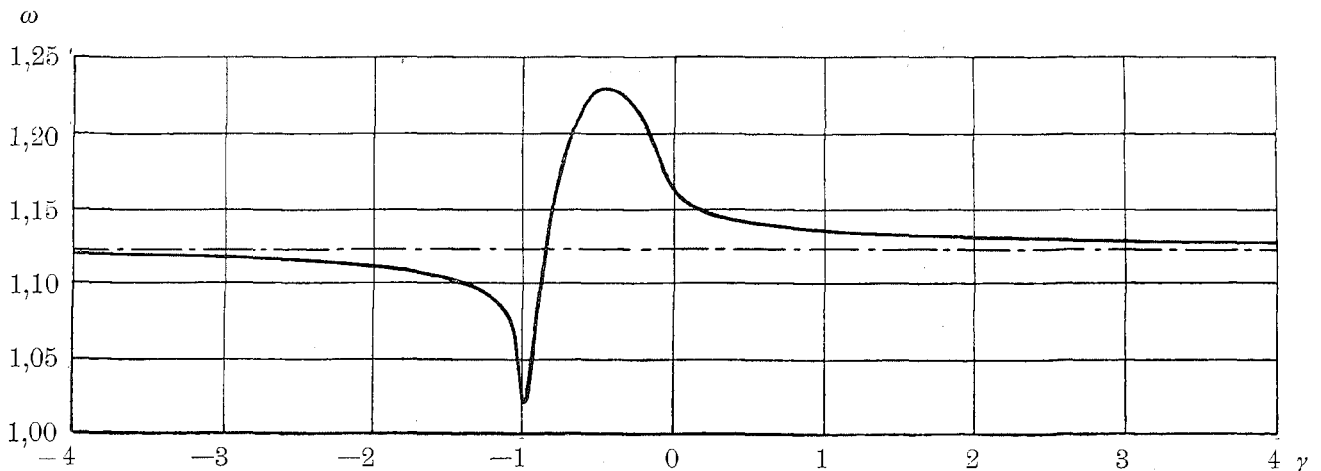
d. De in bovengenoemde tabel onder  $\gamma = \pm \infty$  opgegeven getallen beantwoorden aan een zuiveren driftstroom (§ 54). Bij dezen staat de kracht  $F$  gelijk met een kracht  $1,06 \frac{F}{q}$  of  $1,12 \frac{F}{q}$  per volume-eenheid, die uit een verhang

$$\frac{\omega F}{g q \varrho}$$

zou kunnen voortvloeien en is dus de gemiddelde stroomsnelheid

$$\bar{v} = C \sqrt{\frac{\omega F}{g \varrho}} \quad (\omega = 1,06 \text{ of } 1,12). \quad (21)$$

In figuur 32 is  $\omega$  als functie van  $\gamma$  voorgesteld, en wel voor  $\alpha = 0,80$ .



Figuur 32.

§ 56. *Tijd, noodig voor het in beweging brengen der onderste lagen.* Als de kracht  $F$  op zeker oogenblik begint te werken, zullen eerst alleen de oppervlakkige lagen in beweging komen; het zal eenigen tijd duren voor de beweging aan de geheele massa is meegedeeld. Om het tijdsverloop  $T$ , na verloop waarvan de driftstroom zoo goed als ontwikkeld is, te schatten, merke men op dat aan het einde daarvan de watermassa per eenheid van oppervlak de aan (21) beantwoordende hoeveelheid van beweging

$$C q \sqrt{\frac{\omega \varrho F}{g}}$$

heeft. Is nu  $K$  de gemiddelde waarde van de kracht, die, alles te zamen genomen, van buiten af in de bewegingsrichting op het water werkt, dan is

$$T = \frac{C q}{K} \sqrt{\frac{\omega \varrho F}{g}}.$$

De bedoelde kracht heeft eerst, daar dan het water aan den bodem nog in rust is en dus geen wrijving van dezen ondervindt, de waarde  $F$ . Ten slotte is zij nul, daar bij den stationairen driftstroom de wrijving aan den bodem de kracht  $F$  juist opheft. Men heeft dus, als  $s$  zeker getal tusschen 0 en 1 is,

$$K = s F$$

en daarmede wordt de gezochte tijd

$$T = \frac{C q}{s} \sqrt{\frac{\omega \varrho}{g F}},$$

of, wegens (21)

$$T = \frac{\omega C^2 q}{s g \bar{v}}.$$

Voor  $q = 500$  cm,  $\bar{v} = 100$  cm per sec wordt dit, als men  $C$  op 530 stelt,

$$T = \frac{1500}{s} \text{ of } \frac{1600}{s} \text{ seconden,}$$

dus, daar  $s$  zoo iets als  $\frac{1}{3}$  of  $\frac{1}{3}$  kan zijn, van de orde van grootte van een uur.

§ 57. *Tijd, noodig voor het tot stand komen van de opstuwing.* Men kan door een dergelijke redeneering als zoeven werd gebezigd, ook een ander vraagstuk oplossen. Stel dat het kanaal van de lengte  $l$  aan den linkerkant met de open zee in gemeenschap staat, zoodat hier de hoogte constant wordt gehouden, en aan het rechter einde is afgesloten. Op zeker oogenblik begint de kracht  $F$  te werken en de vraag is hoelang het duurt vóór de stationaire toestand van opwaaiing ontstaan is. Is  $i$  het verhang dat in dien toestand bestaat, dan is in het geheel door de eerste doorsnede aan den linkerkant een watervolume gestroomd dat, per eenheid van breedte,  $\frac{1}{2} l^2 i$  bedraagt. Is nu, over het geheele tijdsverloop  $T'$  gerekend, de gemiddelde waarde van  $\bar{v}$  in de genoemde doorsnede  $w$ , dan is

$$T' = \frac{l^2 i}{2 q w}.$$

Als men, ten einde dit en het vorige vraagstuk uit elkander te houden, nu onderstelt dat de oppervlaktekracht ook de dieper liggende lagen onmiddellijk in beweging brengt, is eerst  $\bar{v}$  door verg. (21) gegeven. Ten slotte is  $\bar{v} = 0$ , en men zal dus hebben

$$w = s' C \sqrt{\frac{\omega F'}{g q}},$$

waarin  $s'$  zeker getal tusschen 0 en 1 is.

Hierdoor wordt

$$T' = \frac{l^2 i}{2 q s' C} \sqrt{\frac{g q}{\omega F'}},$$

of, wanneer wij den in (20) voorkomenden coëfficiënt 1,009 of 1,040  $\omega'$  noemen, zoodat

$$i = \omega' \frac{F'}{g q q}, \quad \frac{g q}{F'} = \frac{\omega'}{q i}$$

wordt,

$$T' = \frac{l^2}{2 s' C} \sqrt{\frac{\omega' i}{\omega q^3}}.$$

Stelt men weer  $q = 500$  cm,  $C = 530$  en neemt men aan  $l = 27$  km,  $i = 4.10^{-5}$ , dan wordt

$$T' = \frac{1}{s'} \sqrt{\frac{\omega'}{\omega}} \cdot 3900 \text{ sec.}$$

De gezochte tijd is dus van de orde van een paar uur. Rekent men daar nog iets bij, met het oog op het in de vorige § besprokene, dan blijft men bij die orde van grootte.

§ 58. *Al of niet ontstaan van den evenwichtstoestand in Waddenzee en Zuiderzee.* Het zoeven aangevoerde getallenvoorbeeld was ontleend aan de Waddenzee, en aangezien bij een storm de wind gedurende vele uren (b.v. 5, 10 of 15) vrijwel in dezelfde richting en met dezelfde snelheid waait, mag men besluiten dat later in de Waddenzee de stationaire toestand met maximum opwaaiing zal bereikt worden. Evenzoo is er thans voor den opzet van het water van den eenen kant der Zuiderzee naar den anderen, d. w. z. voor de afwaaiing en de opstuwing welke binnen die zee zelf geschieden, en die ook zouden plaats hebben als de gemeenschap met de Noordzee was afgesneden, alle gelegenheid om zich te ontwikkelen. Maar anders is het met de instrooming in de Zuiderzee onder den invloed van een storm gesteld. Het groote oppervlak der Zuiderzee (met afmetingen die de 100 km naderen) in verband met den betrekkelijk nauwen toegang, heeft ten gevolge dat de vulling van het bekken langer tijd eischt dan boven berekend werd. Dientengevolge gaat dié vulling in den regel niet zoo ver als bij nog langer aanhoudenden wind het geval zou zijn. De stationaire toestand wordt slechts bij enkele zeer langdurige stormen, zooals die van 4 tot 8 December 1895 (§ 25), bereikt. Dat het in andere gevallen niet zoo ver komt blijkt ten duidelijkste uit de waarnemingen; als het water in de Waddenzee zijn hoogsten stand bereikt heeft, is er nog

een krachtige stroom van de Waddenzee naar de Zuiderzee, gepaard met een even sterken naar binnen gaanden stroom door de zeegaten.

Dit feit is voor de beantwoording der aan de Staatscommissie voorgelegde vraag van veel belang. Was bij een storm de evenwichtstoestand in het geheele gebied ontstaan (zooals denkbaar is als men van de getijbeweging afziet) en werd dan plotseling langs de lijn van den afsluitdijk een schot geplaatst, dan zou (verg. § 54) aan den toestand daarbuiten niets veranderen en ook wanneer de Zuiderzee van het begin af afgesloten was geweest zou het water benoorden den dijk niet hooger oploopen dan thans het geval is; het eenige gevolg van de afsluiting zou zijn dat de grootste hoogte in de Waddenzee *sneller* bereikt wordt.

Dat na de afsluiting in de Waddenzee hogere stormvloedden zullen voorkomen is alleen hieraan te wijten dat thans in het gebied Waddenzee en Zuiderzee de stationaire toestand in den regel niet ontstaat, terwijl hij later in de kleinere Waddenzee wel tot stand zal komen.

§ 59. *Dynamisch windeffect.* Bracht de kracht van den wind onmiddellijk de watermassa in een kanaal als één geheel in beweging, dan zou het geval van een aan beide einden gesloten kanaal veel overeenkomst hebben met een slinger dien men door een horizontale kracht doet afwijken. Aan een gegeven grootte  $F$  dezer laatste beantwoordt een bepaalde afwijking uit den evenwichtsstand, en deze, dus de opwaaiing in het kanaal, hangt er niet van af, of de kracht meer of minder snel tot de grootte  $F$  is gestegen.

Intusschen is dit wel van invloed op de beweging van het stelsel vóór het in den eindtoestand komt. Ontstaat de kracht  $F$  plotseling en is er geen weerstand, dan wordt de nieuwe evenwichtstoestand met zoo groote snelheid bereikt dat hij aanmerkelijk overschreden wordt; het stelsel gaat om den nieuwen evenwichtsstand heen- en weerschommelen, met zoodanige amplitude dat de oorspronkelijke stand telkens weer voor een oogenblik bereikt wordt.

Het overschrijden van den nieuwen evenwichtstoestand bedraagt minder als de kracht geleidelijk tot de grootte  $F$  klimt, en ook als er een weerstand is. Men kan het geheel verhinderen door een weerstand van voldoende grootte aan te brengen of wel door de kracht zeer langzaam in werking te laten komen.

Ofschoon bij het opwaaien door den wind de omstandigheden ingewikkelder zijn, omdat niet aanstonds de massa in haar geheel in beweging wordt gebracht, komt toch ook hier het overschrijden van den evenwichtsstand voor. In de peilschaaldiagrammen, b.v. van 6 November 1921 voor IJmuiden, Callantsoog en Nijkerk, ziet men duidelijk een plotseling tijdelijk stijgen waarop een aanmerkelijke inzinking, vooral voor IJmuiden in het oog vallend, volgt (figuur 21, § 21).

Voor het onderzoek der Staatscommissie is dit dynamische opwaaien van geen belang, daar de bedoelde schommelingen alleen in het begin van een storm voorkomen en op het oogenblik waarop deze zijn grootste uitwerking heeft, hebben opgehouden. (Zie verder § 107).

§ 60. *Regels voor de opwaaiing.* a. Daar een gegeven windkracht een bepaald verhang  $i$  teweegbrengt zal het bereikte hoogteverschil evenredig met de lengte van het kanaal zijn. Het is omgekeerd evenredig met de waterdiepte, voor zoover men den coëfficiënt in (20) als onafhankelijk van de diepte mag beschouwen. In het vervolg zal van den regel der omgekeerde evenredigheid met de diepte veelal gebruik worden gemaakt.

b. Evenals de wrijving tusschen stroomend water en den bodem evenredig kan worden gesteld met de tweede macht der stroomsnelheid, mag men verwachten dat de kracht  $F$ , die de wind op het water uitoefent, evenredig zal zijn met de tweede macht der relatieve snelheid, of, kan men zeggen, evenredig met de tweede macht der windsnelheid, daar de snelheid van den driftstroom veel kleiner dan de windsnelheid is.

Daar ook de winddruk  $K$  vrijwel evenredig met het vierkant der snelheid is, zou  $F$  evenredig met dien druk worden.

Uit het gezegde volgt dat de snelheid van den driftstroom (verg. form. 21) evenredig wordt met de windsnelheid, en de opwaaiing (verg. form. 20) met de tweede macht dier snelheid.

Intusschen zijn er afwijkingen van deze eenvoudige regels (§ 63).

Bij kleine windsnelheden is de waterspiegel nog vrij vlak en daarom de wrijving niet groot. De kracht  $F$  is dus klein in vergelijking met den winddruk  $K$ .

Gaan zich grootere golven vormen, dan neemt de wrijving  $F$  snel toe, in meerdere mate dan de winddruk.

Wanneer eindelijk het water sterk bewogen is, ontstaat een toestand waarbij de golftoppen de daarachter liggende golfdalen beschermen, een feit dat in scheepvaartkringen wel bekend is. Bij zeer hoogen zeegang is men in een golfdal uit den hevigen wind en meer of min in de luwte.

Zoo wordt het begrijpelijk dat bij hooge windsnelheden de kracht  $F$  minder sterk toeneemt dan de winddruk  $K$ .

c. Zoolang de diepte van het water overal dezelfde is, ziet men gemakkelijk in hoe het met de opwaaiing gesteld is in een op willekeurige wijze begrensd gebied  $A$ , indien de wind overal met gelijke kracht in dezelfde richting waait. Men denke zich eerst een grooter gebied  $B$ , dat de gedaante van een rechthoek met een der zijden in de windrichting heeft. Daarin zal na eenigen tijd de in het voorgaande beschouwde stationaire toestand met een bepaald verhang ontstaan en een redeneering, overeenkomende met de in § 54 gebezigde, leert, dat binnen het gebied  $A$  niets verandert, als dit door vaste wanden, verticaal of hellend, uit het gebied  $B$  wordt afgezonderd.

Geeft men aan  $A$  den vorm van een langen rechthoek van willekeurige richting, dan komt men tot het geval van een kanaal waarover een wind strijkt, die een zekeren hoek  $\delta$  met de lengte maakt. Er ontstaat nu ook een dwarshelling. Wat de helling in de richting der lengte van het kanaal betreft, vindt men dat het hoogteverschil tusschen twee punten berekend kan worden door het hoogteverschil dat bij longitudinale windrichting ontstaan zou met  $\cos \delta$  te vermenigvuldigen.

§ 61. *Opwaaiing als de diepte niet overal even groot is.* a. Liggen een aantal kanalen in de richting van den wind achter elkander, dan wordt de geheele opwaaiing in den stationairen toestand eenvoudig de som der opwaaiingen in de verschillende kanalen. Men zou, als het de moeite loonde, ook in dit geval kunnen berekenen hoe de stationaire toestand ontstaat, of wel den stroom kunnen bepalen, dien men krijgt als het water aan het begin van het eerste en aan het einde van het laatste kanaal op dezelfde hoogte wordt gehouden. Dit is een uitbreiding van het vraagstuk van den driftstroom.

b. Heeft men met naast elkander geplaatste en met elkaar in gemeenschap staande kanalen van willekeurige breedte en ongelijke diepte te doen, dan zal, daar het water vrij, met zoo goed als geen weerstand, uit het eene in het andere kan overgaan, steeds aan de voorwaarde voldaan zijn dat in een loodrechte doorsnede het water in ieder kanaal even hoog staat; het longitudinale verhang zal in het eene kanaal even groot zijn als in het andere.

Waait nu een wind in de lengterichting, dan is de driftstroom in het systeem eenvoudig de som der driftstroomen die in elk kanaal op zich zelf worden opgewekt (als men bij „stroom” aan de per tijdseenheid door de *geheele* doorsnede vloeiende hoeveelheid water denkt).

Voor *twee* naast elkander liggende kanalen moge hier ook de stationaire toestand van opwaaiing beschouwd worden. Stel dat als elk daarvan op zich zelf bestond, de wind in het eerste een verhang  $i_1$  en in het

tweede een verhang  $i_2$  zou teweegbrengen. Zij  $i_1 > i_2$ . In werkelijkheid ontstaat dan zeker verhang  $i$ , zoodanig dat  $i_1 > i > i_2$ . Onder den invloed van den wind en het verhang  $i$  zal in het eerste kanaal een stroom met den wind mee bestaan; daarentegen is er in het tweede onder den invloed van den wind en  $i$  een stroom tegen den wind in. De stationaire toestand is bereikt als deze stroomen even sterk zijn, een voorwaarde die het mogelijk maakt de opwaaiing  $i$  te bepalen.

Werkt men het vraagstuk verder uit, onder eenigszins vereenvoudigende onderstellingen, dan vindt men, als de kanalen de breedte  $b_1$  en  $b_2$  en de diepte  $q_1$  en  $q_2$  hebben, dat de opwaaiing even groot is als zij zou zijn in een enkel kanaal van de breedte  $b_1 + b_2$  en de diepte

$$q = \frac{b_1^2 q_1^3 + b_2^2 q_2^3}{b_1^2 q_1^2 + b_2^2 q_2^2}. \quad (22)$$

Het nu besproken geval maakt het begrijpelijk dat onder den invloed van den wind een rondloopen van het water in een horizontaal vlak kan plaats hebben.

§ 62. *Waarnemingen omtrent de opwaaiing.* De opwaaiing bij verschillende windsterkten zou het best uit waarnemingen bij stilstaande wateren kunnen worden afgeleid als deze een voldoende grootte hadden. De uitgestrektheid onzer meren en plassen is echter te klein om een voor nauwkeurige meting voldoende opwaaiing te vertoonen. Daarom moest men zijn toevlucht nemen tot metingen op zee zelf (§ 19). Leidt men uit de getijconstanten voor twee plaatsen  $A$  en  $B$  de waterhoogten af, die bij windstilte op zeker tijdstip zouden bestaan, en trekt men die hoogten af van de waargenomen hoogten, dan zal het verschil der uitkomsten aan de werking van den wind kunnen worden toegeschreven, en de opwaaiing tusschen  $A$  en  $B$  doen kennen.

De met registreerende peilschalen verkregen waterstanden zijn over het algemeen voor de toepassing dezer methode voldoende nauwkeurig, al is het ook hier slechts in sommige gevallen mogelijk, fouten van eenige centimeters met zekerheid te ontgaan. Aflezingen van gewone peilschalen daarentegen zijn voor het nu beoogde doel zoo goed als onbruikbaar. Zelfs wanneer zij zeer goed beschut staan, b.v. in een haven, is het bij storm niet goed doenlijk ze nauwkeuriger dan op 5 centimeter af te lezen. Staat de peilschaal aan een dijk of op een strand, dan is een eenigszins betrouwbare aflezing ten eenenmale onmogelijk. Vooral waar de wind recht op den dijk staat veroorzaken de meestal meters hooge golven veelal aflezingen die decimeters te hoog of te laag zijn ten opzichte van den stand dien het zee-oppervlak bij afwezigheid der golfbeweging zou aannemen <sup>1)</sup>.

Van de verschillende in aanmerking komende gebieden heeft alleen de kom der Zuiderzee voor werkelijk betrouwbare waarnemingen kunnen dienen. In de Waddenzee kan slechts zelden een bepaling van de opwaaiing geschieden omdat daar, wegens het nog niet gevuld zijn van de Zuiderzee, meestal de evenwichtsstand niet bereikt wordt. Aan de waarnemingen in de Lauwerszee en den Dollart, evenals aan die in de Zeeuwsche stroomen, kan minder gewicht worden toegekend, omdat de correcties voor de getij-

<sup>1)</sup> Het is misleidend dat in de stormvloedverslagen zooveel schijnbaar nauwkeurige aflezingen voorkomen. Deze op een centimeter nauwkeurig opgegeven getallen danken hun ontstaan meestal aan correcties voor achteraf gebleken onjuiste ligging van de nulpunten der peilschalen. De oorspronkelijke waarnemingen zijn meestal in decimeters of veelvoud van 5 centimeter gegeven. Dit is bij de oudere stormen, toen er nog geen registreerende peilschalen waren, bij veel stations het geval. Zoo ontstaan, om maar enkele voorbeelden te noemen, de in het stormvloedverslag van 1916 vermelde op 4 of 9 eindigende getallen van Nieuw Statenzijl door een correctie van V.Z. tot N.A.P. van 129 cm; die te Harlingen (eindigende met 3 of 8) door de correctie van —27 cm van A.P. tot N.A.P. Het sterkste voorbeeld is Schiermonnikoog, waar van 1894 tot 1914 de waarnemer de standen opgaf in halve meters boven volzee. Door de correctie van 106 cm tot N.A.P. werden de standen 406, 356, 406, 456, 306 en 256.

beweging en voor de ongelijkmatige diepten hier vrij groot zijn in vergelijking met de opwaaiing. De voor deze zeeboezems verkregen uitkomsten hebben slechts in zooverre beteekenis dat zij met de in de kom der Zuiderzee gedane waarnemingen in redelijke overeenstemming zijn.

Van deze laatste komen nu, daar in het geval van zwakken wind de fouten te groot zijn, hoofdzakelijk die in aanmerking, bij welke de windsnelheid  $V$  tusschen 12 en 20 meter per sec ligt. Drukt men  $V$  in deze eenheden uit, en de diepte  $q$  in meters, dan kan men als uitkomst van de waarnemingen nemen

$$i = 0,035 \text{ à } 0,045 \frac{V^2}{q} \text{ cm per km.}$$

Als voorbeeld diene dat bij den stormvloed van 6/7 November 1921 in het zuidoostelijk deel van de kom der Zuiderzee opwaaiingen voorkwamen van 2,5 cm per km. De windsnelheid was toen 16 à 17 meter per sec, de diepte ongeveer 4,5 à 5 meter. Stelt men  $V = 16,5$  en  $q = 4,75$ , dan geeft de formule 1,9 à 2,6 cm per km.

De winddruk  $K$  wordt in kg per m<sup>2</sup> gegeven door de betrekking

$$K = 0,072 V^2$$

en men kan dus ook schrijven

$$i = 0,5 \text{ à } 0,6 \frac{K}{q} \text{ cm per km.} \quad (23)$$

Hierbij moet worden opgemerkt dat de waarnemingen niet zoo nauwkeurig zijn dat men er de evenredigheid met  $\frac{V^2}{q}$  met aanmerkelijke zekerheid uit zou kunnen afleiden. De diepte varieerde tusschen 3,5 en 7,5 m.

Er moge nog worden opgemerkt dat uit de medegedeelde uitkomsten ook de verhouding tusschen de snelheid  $V$  van den wind en de snelheid  $v$  van een driftstroom, dien hij teweegbrengt, kan worden afgeleid. Uit formule (21), waardoor deze laatste snelheid bepaald wordt, in verband met (20), die de opwaaiing  $i$  leert kennen, waartoe dezelfde wind kan leiden, volgt nl. de verhouding van  $v^2$  en  $i$ . Voert men dan verder voor  $i$  de waarde in, die men in de eerste formule dezer § vindt, dan leert men  $v^2:V^2$  en dus  $v:V$  kennen.

De uitkomst is dat de snelheid van den driftstroom ongeveer 3 % van de windsnelheid moet zijn. Dit is in goede overeenstemming met zekere theoretische beschouwingen, die hier achterwege kunnen blijven en volgens welke de snelheden  $v$  en  $V$  voor het water en de lucht omgekeerd evenredig met de vierkantswortels uit de dichtheden zouden zijn.

§ 63. *Proeven op kleine schaal.* Om nog iets meer van het verschijnsel der opwaaiing te weten te komen, heeft de heer THUSSE met medewerking van den Rijks Studiedienst voor de Luchtvaart de metingen in een proefbak verricht, die in § 20 zijn beschreven. De snelheid van den luchtstroom kon daarbij tot ongeveer 23 m per sec worden opgevoerd. Terwijl nu de opwaaiing bij kleine windsnelheden zeer gering is, neemt zij bij ongeveer 11 à 12 m per sec plotseling sterk toe. Van daar af tot 18 à 20 m per sec is de opwaaiing vrijwel evenredig met de tweede macht der snelheid, maar bij nog grootere windsnelheid neemt zij minder toe dan aan die wet zou beantwoorden. Dit is het verschijnsel waarover reeds in § 60 werd gesproken. Het zal zich waarschijnlijk ook op zee bij de hoogste daar voorkomende snelheden, die tot meer dan 30 m per sec klimmen, voordoen, maar, zooals in § 20 is gezegd, kon een afwijking van de quadratische wet in de Waddenzee niet met zekerheid worden geconstateerd.

De diepten in den proefbak waren 8 tot 30 cm en bij onderlinge vergelijking van de daarbij gevonden uitkomsten werd de regel, dat de opwaaiing omgekeerd evenredig met de diepte is, vrijwel bevestigd gevonden. Die regel komt echter niet uit als men de waarnemingen vergelijkt met die in de Zuiderzee, waar de waterdiepte zoo iets als 50 maal grooter is.

Het blijkt dat, als men de betrekking (23) op de opstuwung in den proefbak toepast, aan den coëfficiënt ongeveer de dubbele waarde moet worden toegekend; men moet er 1,0 à 1,3 voor nemen. Men zou hieruit kunnen besluiten dat de grootte van de opwaaiing niet omgekeerd evenredig is met de eerste macht van de diepte, maar met een iets hogere macht daarvan, met  $q^{1,1}$  of  $q^{1,2}$ . Intusschen zal van een dergelijke wet bij de berekening van opwaaiingen in de Waddenzee geen gebruik worden gemaakt. Dat de wijziging aan de werkelijkheid zou beantwoorden is volstrekt niet zeker. Het is zeer goed mogelijk dat de proeven in het klein te groote waarden hebben gegeven door storingen aan de einden van den bak, terwijl bovendien extrapolatie van de proeven in een kleinen en ondiepen bak naar de Zuiderzee reeds daarom geen juiste resultaten kan geven omdat de golfvorming afhangt van de uitgestrektheid van het oppervlak. Trouwens veel invloed op de later af te leiden uitkomsten zou de verandering niet hebben.

Voor zoover de proeven zijn genomen met naast elkander liggende strooken van ongelijke diepte geven zij geen absolute bevestiging of tegenspraak van formule (22). Wel kan men er met vrij groote zekerheid uit besluiten, dat met een grootere dan de gemiddelde diepte moet worden gerekend.

Er moet nog op worden gewezen dat de in §§ 54 en 55 medegedeelde beschouwingen niet, bij toenemende diepte, een snellere, maar veeleer een langzamer afneming der opstuwung, dan aan de evenredigheid met  $\frac{1}{q}$  beantwoordt, zouden doen verwachten. Bij toeneming der diepte wordt nl.  $C$  grooter (§ 32) en derhalve volgens formule (18) ook  $\alpha$ , wat tot een grooteren coëfficiënt in formule (20) aanleiding geeft.

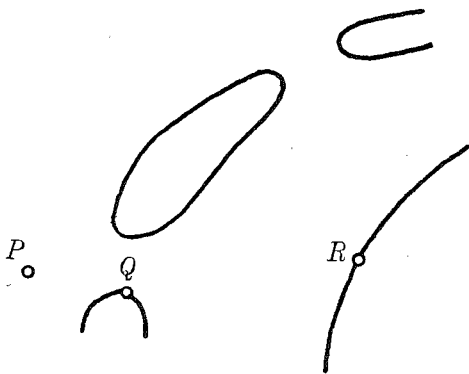
Alles samengenomen blijkt aan onze kennis van het opwaaiingsverschijnsel nog veel te ontbreken en moeten dus de voor de opstuwungen berekende waarden met zeker voorbehoud worden aanvaard.

### C. EERSTE WIJZE VAN BEREKENEN.

§ 64. *Nadere beschouwing der eerste berekeningsmethode.* Thans kan worden overgegaan tot de berekening der stormvloedhoogten volgens de eerste der in § 28 genoemde methoden. De toepassing daarvan sluit zich nauw aan bij het reeds aangehaalde onderzoek van den heer GALLÉ en

een deel der door hem berekende getalwaarden kan onveranderd worden overgenomen, terwijl, wat andere betreft, gebruik kan worden gemaakt van nieuwe in de laatste jaren verkregen gegevens of theoretische uitkomsten.

Zij (figuur 33)  $P$  een punt buiten een der zeegaten,  $Q$  een punt aan de binnenzijde daarvan,  $R$  een punt van de Friesche kust ten noorden van de afsluitingslijn. Laat verder  $h_P$ ,  $h_Q$  en  $h_R$  de waterhoogten in die punten (ge-



Figuur 33.

rekend van N. A. P.) bij windstilte zijn, en  $h'_P$ ,  $h'_Q$ ,  $h'_R$  de hoogten bij storm, zoodat de verschillen

$$\Delta h_P = h'_P - h_P, \quad \Delta h_Q = h'_Q - h_Q \text{ en } \Delta h_R = h'_R - h_R$$

de „windeffecten” of „stuwungen” zijn. Men kan al deze grootheden zoowel voor den tegenwoordigen toestand als bij den toestand na de afsluiting in het oog vatten. De overeenkomstige grootheden in de beide gevallen zullen door de indices  $Z$  (open Zuiderzee) en  $A$  (afgesloten Zuiderzee) onderscheiden worden. Het is er om te doen de grootste waarde

die  $h'_{RA}$  kan krijgen met de grootste waarde van  $h'_{RZ}$  te vergelijken. Die grootste waarden behoeven niet op hetzelfde oogenblik voor te komen; het bleek reeds dat de afsluiting een verandering kan brengen in den tijd van het getijmaximum. Daarentegen is het de bedoeling dat, als men den toestand bij storm met dien bij windstilte vergelijkt (steeds zal een accent dienen om den eersten van den tweeden te onderscheiden) de waarden der verschillende grootheden voor hetzelfde oogenblik worden genomen.

a. In de eerste plaats moet worden nagegaan hoe hoog thans op plaatsen der Friesche kust (Harlingen, Zurig, Piaam) het water door de getijbeweging kan oploopen: bepaling van  $h_{RZ}$ . Deze grootheden zijn in bijlage 3 uit de getijconstanten der harmonische analyse en uit den middenstand afgeleid.

b. In de tweede plaats wordt onderzocht hoeveel bij den tegenwoordigen toestand het windeffect op de beschouwde plaatsen kan bedragen: bepaling van  $\Delta h_{RZ}$ .

De heer GALLÉ heeft in zijn verhandeling het windeffect, of de stuwung, voor een groot aantal plaatsen rondom de Zuiderzee en Waddenzee voor verschillende stormen van uur tot uur afgeleid, en wel door van de waterhoogten die af te trekken, welke door het getij alleen zouden worden veroorzaakt. Deze laatste werden (met inachtneming van de getijden  $S_2, K_2, M_2, N, K_1, P, O, M_4, MS, 2MS$  en  $Sa$ ) uit de getijconstanten afgeleid. Deze berekening van het windeffect is later herhaald volgens de methode van bijlage 3.

Telt men het hoogste bereikbare windeffect  $\Delta h_{RZ}$  bij het hoogste getij  $h_{RZ}$  op, dan vindt men de grootste waarde van  $h'_{RZ}$ , d. w. z. de grootste hoogte tot welke het water bij den tegenwoordigen toestand zou kunnen stijgen.

c. Men herhaalt, in de derde plaats, de onder *a* genoemde berekening met de nieuwe na de afsluiting geldende getijconstanten (§ 47 en bijlage 3). Bij deze bepaling van  $h_{RA}$  moet, evenals bij die van  $h_{RZ}$ , in acht worden genomen dat de middenstand van plaats tot plaats verandert en door de afsluiting kan worden gewijzigd.

d. Om het doel, de kennis van  $h'_{RA}$ , te bereiken, zou men nu nog  $\Delta h_{RA}$  (evenals zoeven  $\Delta h_{RZ}$ ) moeten kennen. Om daartoe te geraken kan men de toestanden in de punten *R* en *Q* met elkander vergelijken. Men kan schrijven

$$\Delta h_{RA} = (\Delta h_{RA} - \Delta h_{QA}) + \Delta h_{QA}. \quad (24)$$

Het punt *Q* (Helder, Vlieland-haven) wordt ingevoerd omdat daar een registreerende peilschaal staat, uit de aanwijzigingen waarvan men de grootste stuwung die is voorgekomen, nl.  $\Delta h_{QZ}$ , kan afleiden. Uit deze moet dan nog  $\Delta h_{QA}$  worden afgeleid (zie hieronder, onder *e*).

De eerste term in het tweede lid van (24)

$$\Delta h_{RA} - \Delta h_{QA} \quad (25)$$

is de opwaaiing van *Q* naar de Friesche kust. Er wordt nl. gebruik gemaakt van het superpositiebeginsel (§ 37) en dus aangenomen dat het hoogteverschil (25), dat nog boven en behalve het door de getijden teweeggebrachte  $h_{RA} - h_{QA}$  bestaat, gelijk is aan het hoogteverschil dat bij afwezigheid der getijden door den wind zou worden veroorzaakt. Verder berust de geheele rede-neering op het feit dat na de afsluiting de evenwichtstoestand zal ontstaan (§ 58). Voor (25) wordt dus de stationaire opwaaiing genomen, die met formule (23) van § 62 kan worden berekend.

e. Nu blijft nog over de bepaling van  $\Delta h_{QA}$ . Lag het punt *Q* even *buiten* het zeegat, dan zou voor die grootheid de stuwung  $\Delta h_{QZ}$  bij open Zuiderzee kunnen worden genomen, daar (zooewel bij wind als bij windstilte) mag worden aangenomen dat de afsluiting geen verandering brengt in de waterhoogten buitengaats. Thans, nu *Q* binnen het zeegat ligt, zal echter  $\Delta h_{QA}$  van  $\Delta h_{QZ}$  verschillen.

De zooveen gemaakte opmerking leidt er toe, den toestand in  $Q$  met dien in  $P$  te vergelijken. Uit de beteekenis van  $\Delta h$  volgt onmiddellijk

$$(\Delta h_{QA} - \Delta h_{QZ}) - (\Delta h_{PA} - \Delta h_{PZ}) = \\ = (h'_{PZ} - h'_{QZ}) - (h_{PZ} - h_{QZ}) - (h'_{PA} - h'_{QA}) + (h_{PA} - h_{QA}),$$

of wel, daar

$$\Delta h_{PA} = \Delta h_{PZ}$$

is,

$$\Delta h_{QA} - \Delta h_{QZ} = \\ = (h'_{PZ} - h'_{QZ}) - (h_{PZ} - h_{QZ}) - (h'_{PA} - h'_{QA}) + (h_{PA} - h_{QA}). \quad (26)$$

Vergelijkt men nu de waarden die de stuwing in  $Q$  bij open en bij afgesloten Zuiderzee op hetzelfde oogenblik heeft, dan moeten ook in het tweede lid dezer vergelijking alle hoogten voor dat oogenblik worden genomen en dan stelt elke term het hoogteverschil voor, dat op dat oogenblik, onder bepaalde omstandigheden, tusschen de punten  $P$  en  $Q$  bestaat. Dit hoogteverschil hangt samen met den stroom  $S$  door het zeegat, waarbij echter ook met den invloed van den wind rekening moet worden gehouden.

Het zal blijken dat de in (26) voorkomende grootheden betrekkelijk klein zijn in vergelijking met de einduitkomst. Daarom komt het nu op groote nauwkeurigheid niet aan en mag men, daar de getallen  $\omega$  in tabel 46 van § 150 niet veel van 1 verschillen, wel rekenen alsof de kracht  $F$  van den wind over de geheele diepte verdeeld was en dus in elk opzicht met een hoogteverschil

$$\frac{Fl}{g q \varrho}$$

( $l = PQ$ ) gelijkstond. Als een kracht naar binnen positief wordt gerekend, wordt de sterkte van den stroom door de algebraïsche som van deze uitdrukking en  $h_P - h_Q$  bepaald. Met het oog op de quadratische weerstandswet kan men dus stellen (verg. 49, § 90)

$$h_P - h_Q + \frac{Fl}{g q \varrho} = m|s|s, \quad (27)$$

waarin  $m$  een van de afmetingen en van de constante van EYTELWEIN afhankelijke coëfficiënt is. Ook voor den stroom is de richting naar binnen als de positieve gekozen, zoodat de tweede factor  $s$  positief of negatief kan zijn. De eerste factor  $|s|$  is de absolute waarde van den stroom en de schrijfwijze  $|s|s$  is gekozen om er zeker van te zijn dat het tweede lid hetzelfde teeken als  $s$  heeft.

Men kan (27) op de vier in (26) voorkomende gevallen toepassen en er telkens het hoogteverschil tusschen  $P$  en  $Q$  uit oplossen; de uitkomsten worden dan in (26) gesubstitueerd. Daar nu in de termen zonder accenten  $F=0$  is en in de twee termen met accenten  $F$  dezelfde waarde heeft, valt de kracht van den wind weg en komt er

$$\Delta h_{QA} = \Delta h_{QZ} + m \{ s'_Z |s'_Z| - s_Z |s_Z| - s'_A |s'_A| + s_A |s_A| \}. \quad (28)$$

Werkelijk bestaan bij open Zuiderzee de stroomen die door  $s_Z$  en  $s'_Z$  zijn voorgesteld. In den regel wordt nl. de evenwichtstoestand niet bereikt: op het oogenblik van hoogwater in de Waddenzee is de Zuiderzee nog niet gevuld; er stroomt water door de afsluitingslijn naar het Zuiden en evenveel door de zeegaten naar binnen. Dit geldt zoowel bij windstilte als bij storm. Daar  $s_Z$  en  $s'_Z$  positief zijn komt in het tweede lid der vergelijking  $m (s'^2_Z - s^2_Z)$ .

Daarentegen zal, als de Zuiderzee is afgesloten, op het oogenblik van het maximum in de Waddenzee door de zeegaten te zamen water noch naar binnen noch naar buiten gaan. Mocht men dit op elk zeegat afzonderlijk toepassen dan zou  $s_A = 0$  en  $s'_A = 0$  zijn, zoodat de formule wordt

$$\Delta h_{QA} = \Delta h_{QZ} + m (s'^2_Z - s^2_Z). \quad (29)$$

Intusschen is het in den regel anders. Gewoonlijk stroomt bij hoogwater in de Waddenzee door het eene zeegat water naar binnen en door

het andere naar buiten, waardoor ook de zoeven weggelaten termen een van nul verschillende waarde krijgen. Men mag daar echter wel van afzien. Vooreerst zijn, zooals later zal blijken (§ 102), de stroomen waarvan hier sprake is aanmerkelijk zwakker dan  $s'_Z$  en  $s_Z$ , zoodat de weggelaten termen vrij wat kleiner zijn dan de in (29) opgenomene. En ten tweede hebben de verwaarloosde termen voor het eene zeegat het tegengestelde teeken als voor het andere. In de berekening is sprake van het Heldersche zeegat en het Vlie en er wordt gewerkt met gemiddelden van de grootheden, die op het eene en het andere betrekking hebben. Gaat dan op de eene plaats water naar buiten en op de andere naar binnen, dan zal de invloed daarvan uit het gemiddelde min of meer wegvallen.

Men zou zich dus wel tot (29) kunnen bepalen, ofschoon het natuurlijk beter is met (28) te werken. In elk geval is (29), waarin de hoofdtermen voorkomen, geschikt om te doen zien dat  $\Delta h_{QA} > \Delta h_{QZ}$  is. Men merke nog op dat bij de afleiding dier formule alle grootheden voor hetzelfde oogenblik zijn genomen, maar dit neemt niet weg dat men door de grootste waarde van  $\Delta h_{QZ}$  en de grootste waarde van den laatsten term in (28) bij elkaar op te tellen, al komen die waarden niet gelijktijdig voor, een bovenste grens voor  $\Delta h_{QA}$  zal vinden.

Voegt men ten slotte daarbij de opwaaiing (25) en de getijhoogte  $h_{RA}$ , dan vindt men  $h'_{RA}$ .

Er moet nog op worden gewezen dat bij de berekening gebruik wordt gemaakt van de waarde van  $\Delta h_Z$  uit de peilschaalwaarnemingen te Helder afgeleid. Nu ligt Helder nog niet binnen het zeegat, maar daarin, en men zou strikt genomen voor  $\Delta h_{QZ}$  de waarde moeten nemen in een punt eenige kilometers meer naar het Oosten, b.v. op de hoogte van de Harssens. Intusschen kan worden aangetoond dat hiervan geen noemenswaardige fout te vreezen is <sup>1)</sup>.

§ 65. *Uitvoering der berekening.* a. Een zeer hoog astronomisch hoogwater is berekend in bijlage 3. Een dergelijk samenwerken van de voornaamste partieele getijden bij een hoogen middenstand kan in het stormseizoen voorkomen en wel in October. Bij een stormvloed zal men dus kans hebben op de in bijlage 3 afgeleide hoogwaters, namelijk:

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| Harlingen . . . | 86 cm + N. A. P. |
| Zurig. . . . .  | 73 " " "         |
| Piaam . . . . . | 52 " " "         |

Wat de vraag betreft of dit werkelijk de hoogste standen zijn, kan worden opgemerkt dat nu en dan bij stil weer te Harlingen hoogwaters zijn voorgekomen die iets hooger zijn dan 86 cm + N.A.P., b.v. op 12 October 1919 + 90 en op 20 October 1923 + 91. De verschillen met 86 zijn intusschen zoo gering en deze hoogere standen komen zoo zelden voor dat men wel met bovenstaande uitkomst der harmonische analyse verder kan

<sup>1)</sup> Stel dat het punt  $Q$  werkelijk binnen het zeegat ligt en laat de index  $H$  op Helder betrekking hebben. De stuwingen  $\Delta h_{QZ}$  en  $\Delta h_{HZ}$  met elkander vergelijkend, vindt men

$$\begin{aligned} \Delta h_{HZ} - \Delta h_{QZ} &= (h'_{HZ} - h'_{QZ}) - (h_{HZ} - h_{QZ}) = \\ &= -\frac{F}{gq_Q} l_{HQ} + m_{HQ}(s'Z^2 - s_Z^2), \end{aligned}$$

waarin  $l_{HQ}$  den afstand van Helder tot  $Q$  voorstelt en  $m_{HQ}$  voor het deel  $l_{HQ}$  van het zeegat dezelfde beteekenis heeft als  $m$  voor de volle lengte daarvan.

In plaats van (29) kan men nu schrijven

$$\Delta h_{QA} = \Delta h_{HZ} + m(s'Z^2 - s_Z^2) - m_{HQ}(s'Z^2 - s_Z^2) + \frac{F}{gq_Q} l_{HQ}.$$

Maakt men dus, zooals in de volgende § zal worden gedaan, van (29) gebruik, daarbij voor  $h_{QZ}$  de waarde nemende die voor Helder geldt, en voor  $m(s'Z^2 - s_Z^2)$  de waarde, die voor de volle lengte van het zeegat is berekend, dan moet men van de uitkomst aftrekken  $m_{HQ}(s'Z^2 - s_Z^2)$  d. w. z. zeker gedeelte van den laatsten term in (29) en er bij optellen de opwaaiing van  $H$  tot  $Q$ . Misschien zal de uitkomst daardoor met een enkelen centimeter veranderen.

werken <sup>1)</sup>. Zonder bezwaar zal men dat dan, ook wat Zurig en Piaam betreft, kunnen doen.

b. Voor zoover is na te gaan, is te Harlingen sedert 1825 tweemaal een windeffect van + 255 cm bereikt, nl. op 4 Februari 1825 en 13 Januari 1916 (verg. slot van § 27). Men kan dit wel als de grootste stuwung beschouwen die bij den tegenwoordigen toestand te Harlingen mogelijk is.

Wat Zurig en Piaam betreft, de *grootste* windstuwung is daar niet gemeten; alleen bij den stormvloed van 6/7 November 1921 waren daar registreerende instrumenten in werking. Door de stuwungen, die toen op verschillende plaatsen langs de kust werden waargenomen, te vergelijken met de hoogste stuwung, die behalve voor Harlingen ook voor Hindeloopen bekend is, kan men tot een redelijke schatting van het grootste windeffect, ook voor Zurig en Piaam, komen.

Van het Noorden naar het Zuiden heeft men nl.:

|                   | Grootste stuwung.     | Stuwung op 6/7 Nov. 1921. |
|-------------------|-----------------------|---------------------------|
| Harlingen . . . . | 255                   | 163                       |
| Zurig . . . . .   |                       | 172                       |
| Makkum . . . . .  |                       | 149                       |
| Piaam . . . . .   |                       | 160                       |
| Hindeloopen . . . | 240 (4 Februari 1825) | 155                       |

Er zal met het oog op deze cijfers geen groote fout worden gemaakt als men voor het hoogst mogelijke windeffect rekest voor Zurig 255 cm en voor Piaam 245 cm. Men komt dus tot de volgende waarden:

|                  | $h_Z$ | $\Delta h_Z$ | $h'_Z$ |
|------------------|-------|--------------|--------|
| Harlingen. . . . | 86    | 255          | 341    |
| Zurig . . . . .  | 73    | 255          | 328    |
| Piaam . . . . .  | 52    | 245          | 297    |

c. De hoogste astronomische hoogwaters, die na afsluiting van de Zuiderzee kunnen optreden, zijn evenals die bij open Zuiderzee in bijlage 3 afgeleid. Zij werden reeds in § 47 vermeld. Ook deze combinatie van partieele getijden kan in het stormseizoen (October) voorkomen. De middenstand is, zooals op blz. 110 is gezegd, wat lager aangenomen dan bij open Zuiderzee. Voor de waarden van  $h_{RA}$  kan men zoodoende aanhouden:

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| Harlingen . . . . | 111 cm + N. A. P. |
| Zurig . . . . .   | 108 " "           |
| Piaam . . . . .   | 102 " "           |

d. De opwaaiing (25) zal het grootst zijn bij een windrichting die ongeveer loodrecht op de verbindingslijn van de Harssens en Vlielandhaven staat (ongeveer NWtW). Wijkt de wind aanmerkelijk van die richting af, dan wordt de opwaaiing kleiner omdat dan hetzij door het Vlie, hetzij door het Heldersche zeegat, water naar buiten stroomt. Daarom zal als lengte van den weg waarover de wind werkt de afstand van het beschouwde punt tot die verbindingslijn worden genomen, ongeveer 25 km voor Harlingen, 27 km voor Zurig en 32 km voor Piaam.

Met tamelijke juistheid kan de windsnelheid worden aangegeven op de drie tijden toen in Harlingen de grootste stuwung (hierboven onder b) bestond. Op 13 Januari 1916 was de gemiddelde windsnelheid op onze kust, afgeleid uit Vlissingen, Helder en de Bilt, de laatste plaats met het halve gewicht, 18 meter per seconde; afgeleid uit Helder, de Bilt en (met het halve gewicht) Groningen bedroeg zij slechts weinig meer. In December 1894 was de wind niet sterker en, voor zoover men er over kan oordeelen, in Februari 1825 evenmin.

Toch schijnt het geraden met iets sterkeren wind rekening te houden. De zoeven genoemde snelheden zijn gemiddelden over een groot deel

<sup>1)</sup> In de door het Departement van Waterstaat uitgegeven getijtafels (§ 41) worden voor sommige dagen nog hoogere astronomische standen opgegeven, b.v. voor 12 October 1919, 12 October 1923 en 1 October 1924, + 96, + 95 en + 95. Voor 25 en 26 Augustus 1922 vindt men zelfs + 101 vermeld. Het is intusschen de vraag of deze hoogten in werkelijkheid zonder windeffect bereikbaar zijn.

van Nederland, maar over een betrekkelijk klein gebied als de Waddenzee zal wel eens een grootere snelheid kunnen bestaan.

Men meent voor de berekening met een windsnelheid van 21 m per sec (windkracht 10 BEAUFORT) te kunnen volstaan. Wel zijn bij eenige stormen tusschen 1863 en 1883 windkrachten 12 voorgekomen (tabel 4), maar deze gelden uitsluitend voor Helder, terwijl voor den gemiddelden wind over de Waddenzee gedurende den tijd, noodig om de opwaaiing tot stand te brengen, zeker minder moet worden gerekend. Op den buitengewonen storm van 30/31 Januari 1877, toen geruimen tijd de windkracht de waarde 12 hield (figuur 24), zal in § 117 worden teruggekomen.

Wat de diepte aangaat moet er rekening mee worden gehouden dat de zeespiegel bij de zwaarste stormvloedden zeer hoog staat. De getijstand wordt (zie hierboven onder *c*) ongeveer een meter + N.A.P., de stuwing aan de Noordzeekust kan meer dan 2 meter bedragen (zie hieronder, onder *e*) en daarbij komt dan nog de opwaaiing in de Waddenzee. Men mag dus wel op  $3\frac{1}{2}$  meter boven N.A.P. rekenen.

In den bodem zullen, evenals nu, ondiepe gedeelten (banken) en diepere geulen te onderscheiden zijn; zelfs zal door de vorming van het vroeger genoemde wantij wat meer relief ontstaan. De banken zullen gemiddeld niet hooger komen te liggen dan  $\frac{1}{2}$  meter onder N.A.P., zoodat men hier op een diepte van 4 meter zal kunnen rekenen. Zij worden vooral bij het wantij gevonden, terwijl dicht bij de zeegaten de diepe geulen een groot deel van het oppervlak innemen.

Bij de ingangen van Dooven Balg en Blauwe Slenk kan men een diepte van 14 à 15 meter onder N. A. P., dus 18 meter onder stormvloedpeil aannemen en een verhouding van bankbreedte tot geulbreedte van 4 tot 1. Men vindt dan volgens formule (22) van § 61 een gemiddelde diepte van 12 meter en met een windsnelheid van 21 meter per seconde ( $32 \text{ kg per m}^2$ ) een opwaaiing van bijna  $1\frac{1}{2}$  centimeter per kilometer, als men formule (23) van § 62 toepast met den coëfficiënt 0,55.

Dicht bij het wantij zijn de geulen niet dieper dan 8 à 9 meter onder N. A. P., en zijn dus bij storm 12 meter diep. Men kan verwachten dat de banken er ongeveer zesmaal zoo breed als de geulen zullen worden en dan wordt de gemiddelde diepte ruim  $5\frac{1}{2}$  meter en de opwaaiing per kilometer iets meer dan 3 centimeter.

In het Vlie en in den Texelstroom is de opwaaiing niet meer dan 1 centimeter per kilometer.

Om de totale opwaaiing in de Waddenzee te berekenen kan men aannemen, dat langs de 25 kilometer van den werkweg tot Harlingen de opwaaiing ongeveer zal bedragen:

|        |             |    |                |   |       |
|--------|-------------|----|----------------|---|-------|
| over   | 4 kilometer | 1  | cm per km      | = | 4 cm  |
| "      | 6           | "  | $1\frac{1}{2}$ | " | "     |
| "      | 6           | "  | 2              | " | "     |
| "      | 4           | "  | $2\frac{1}{2}$ | " | "     |
| "      | 5           | "  | 3              | " | "     |
| Totaal | "           | 25 | "              | " | 50 cm |

dus gemiddeld 2 cm per kilometer.

Voor Zurig vindt men:

$6 \times 1 + 5 \times 1\frac{1}{2} + 4 \times 2 + 5 \times 2\frac{1}{2} + 7 \times 3 = 55$  centimeter,  
dus ook 2 centimeter per kilometer.

Voor Piaam:

$6 \times 1 + 5 \times 1\frac{1}{2} + 4 \times 2 + 5 \times 2\frac{1}{2} + 5 \times 3 + 4 \times 3\frac{1}{2} + 3 \times 4 = 75$  centimeter,  
dus 2,35 centimeter per kilometer. Deze grootere waarde wordt veroorzaakt door de ligging van Piaam in een zak, waar geringe diepte en dus sterkere opwaaiing is te verwachten.

De waarde der opwaaiing  $h'_{RA} - h'_{QA}$  kan dus worden gesteld op

|                     |       |
|---------------------|-------|
| Harlingen . . . . . | 50 cm |
| Zurig . . . . .     | 55 "  |
| Piaam . . . . .     | 75 "  |

e. De grootste waarden die de stuwung te Helder en Vlieland (haven) bij open Zuiderzee bereikt, d.i. de in het voorgaande met  $\Delta h_{QZ}$  aangegeven grootheid, kan worden opgegeven als 200 cm voor Helder en 225 cm voor Vlieland (December 1894 en Januari 1916) (§ 27). Hierbij is voor Helder rekening gehouden met het feit dat de rijzing van laagwater tot den eersten vloedkop in werkelijkheid sneller plaats heeft dan uit de met de harmonische analyse berekende kromme zou volgen. In 1916, toen de registreerende peilschaal te Helder defect was en de waarnemingen aan een in den vollen golfslag staande gewone peilschaal werden gedaan, dus zeer onzeker waren, zijn ook de enkele waarnemingen van Nieuwediep (Koopvaarderssluis), in vrij stil water, in aanmerking gebracht.

De grootste waarde van den laatsten term in (28) kan, zooals later (slot van § 92) zal blijken, voor Helder worden geschat op 30 cm en voor Vlieland op 15 cm en men vindt dus als waarde van  $\Delta h_{QA}$  voor Helder 230 cm en voor Vlieland 240 cm. Het gemiddelde daarvan nemende komt men tot

$$\Delta h_{QA} = 235 \text{ cm.}$$

Door de in *a-e* afgeleide getallen samen te vatten vindt men voor de hoogst bereikbare stormvloedstanden:

Bij den tegenwoordigen toestand met open Zuiderzee

|                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| Harlingen . . . . . | 86 + 255 cm = 341 cm + N.A.P. |
| Zurig . . . . .     | 73 + 255 " = 328 " + "        |
| Piaam. . . . .      | 52 + 245 " = 297 " + "        |

Na afsluiting der Zuiderzee komt men tot:

|                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| Harlingen . . . . . | 111 + (50 + 235) = 396 cm + N.A.P. |
| Zurig . . . . .     | 108 + (55 + 235) = 398 " + "       |
| Piaam. . . . .      | 102 + (75 + 235) = 412 " + "       |

De verhooging die door de afsluiting der Zuiderzee wordt veroorzaakt bedraagt dus te:

|                     |                                 |
|---------------------|---------------------------------|
| Harlingen . . . . . | 396 - 341 = 55 cm               |
| Zurig . . . . .     | 398 - 328 = 70 "                |
| Piaam. . . . .      | 412 - 297 = 115 " <sup>1)</sup> |

Wordt de afsluitdijk naar Zurig in plaats van naar Piaam gelegd, dan zal aan de beide eerste getallen zoo goed als niets veranderen. Alleen de onder *c* genoemde astronomische hoogwaters zullen in dit geval misschien één tot drie centimeter hooger oploopen, wat een overeenkomstige vermeerdering van de stormvloedverhooging ten gevolge heeft.

§ 66. *Opmerkingen over de vorige berekening.* Ondanks de onvolkomenheid van vele der gegevens waarvan gebruik moest worden gemaakt,

<sup>1)</sup> Eenzelfde berekening kan men uitvoeren voor punten *R*, die niet aan de Friesche kust, maar elders in de Waddenzee liggen.

Zoo vindt men b.v. voor den Oever:

bij open Zuiderzee:

a. Astronomisch hoogwater (bijlage 3) . . . . .  $h_{RZ} = 48 \text{ cm} + \text{N.A.P.}$

b. grootste stuwung (enkele centimeters meer dan te

Helder) . . . . .  $\Delta h_{RZ} = 205 \text{ cm,}$

dus hoogste bereikbare stand  $h'_{RZ} = 48 + 205 = 253 \text{ cm} + \text{N.A.P.}$

en bij afgesloten Zuiderzee:

c. Astronomisch hoogwater (§ 47 en bijlage 3). . . . .  $h_{RA} = 92 \text{ cm} + \text{N.A.P.}$

d. opwaaiing Helder—den Oever . . . . .  $\Delta h_{RA} - \Delta h_{QA} = 32 \text{ cm,}$

e. grootste stuwung Helder . . . . .  $\Delta h_{QA} = 230 \text{ cm,}$

dus hoogste bereikbare stand  $h'_{RA} = 92 + (32 + 230) = 354 \text{ cm} + \text{N.A.P.}$

De verhooging te den Oever is dus  $h'_{RA} - h'_{RZ} = 354 - 253 = 101 \text{ cm.}$

schijnt de verkregen uitkomst vrij betrouwbaar te zijn. Het is waar dat de numerische coëfficiënt in de formule (23) voor de opwaaiing slechts in ruwe schatting bekend is, maar zelfs wanneer men met den hoogsten coëfficiënt rekent worden de uitkomsten voor Harlingen, Zurig en Piaam niet meer dan 6, 7 en 9 cm hooger.

Een andere oorzaak van onnauwkeurigheid ligt in de voor de waterdiepte aangenomen waarden. Intusschen heeft men wel kans dat, indien men de diepte in verschillende deelen van het gebied zoo goed mogelijk schat, de gemaakte fouten elkaar in de uitkomst vrijwel compenseeren. Daarvan geven b.v. de getijberekeningen blijk, waarbij ondanks menige onzekerheid aangaande de diepte vrij bevredigende uitkomsten werden gevonden.

Ernstiger is het dat voortdurend met het superpositiebeginsel moest worden gewerkt. De voortplanting van het getij in de Waddenzee zal immers bij een storm eenigszins beïnvloed worden door de dan heerschende abnormale omstandigheden. De voornaamste daarvan is de grootere diepte, die, zooals reeds in § 47 terloops is gezegd, een vergrooting van de amplituden ten gevolge heeft. Deze vergrooting, die nergens meer dan 11 cm bedraagt, wordt voor een deel weer te niet gedaan door de vermeerdering van den weerstand door de heviger golfbeweging en de grootere stroomsnelheden.

De vraag kan ook rijzen of geen fout is begaan door in het geheel niet van de CORIOLIS-kracht te spreken. In § 33 werd reeds opgemerkt dat de werking daarvan het verschil tusschen de waterstanden vóór en na de afsluiting zal vergrooten, en in § 108 zal blijken, dat hier sprake van bijna een twintigtal centimeters kan zijn. Toch kan men bij nadere overweging inzien dat men op grond hiervan geen fout in de medegedeelde uitkomsten behoeft te vreezen.

Een kracht van CORIOLIS van een grootte zooals nu bedoeld werd, is nl. verbonden aan een stroom uit de Waddenzee naar de Zuiderzee. Daar nu na de afsluiting zulk een stroom niet bestaat, behoefde er bij de berekening van de dan te verwachten waterstanden van geen CORIOLIS-kracht van eenige beteekenis sprake te zijn. De hoogste waterstanden echter die bij den tegenwoordigen toestand kunnen voorkomen zijn in het voorgaande niet berekend, maar zoo goed als rechtstreeks uit de waarneming afgeleid. Men heeft nl. nagegaan hoe groot het verschil tusschen den werkelijken stand en den getijstand, die bij windstilte zou bestaan hebben, in den loop der jaren bij verschillende stormen geweest is en wat de grootste waarde er van is, die zich heeft voorgedaan. Dat dit verschil als rechtstreeksch gevolg van den wind is opgevat doet daarbij niet ter zake; in werkelijkheid is in hetgeen stuwing of windeffect genoemd werd, de uitwerking der CORIOLIS-kracht begrepen, maar dit verandert niets aan de gebezigde redeneering.

§ 67. *Waarschijnlijkheid van zeer hooge waterstanden.* Indien men onderstelt dat het voorkomen van sterke of zwakke astronomische getijden aan den eenen kant, en aan den anderen kant het bestaan van sterke of zwakke stuwingen geheel onafhankelijke verschijnselen zijn, zoodat een groote intensiteit van het eene verschijnsel even goed met een groote als met een kleine sterkte van het andere kan samengaan, kan men naar de regels der kansrekening bepalen, wat de waarschijnlijkheid van het samenval van hooge getijden met hooge windeffecten zal zijn. Onder zekere vereenvoudigende onderstellingen komt men daarbij tot een paar eenvoudige regels.

Stel dat in een zeer langen tijd  $T$  (een eeuw b.v.) zich een groot aantal „stuwingsverheffingen”  $P$  en „getijverheffingen”  $Q$  voordoen, in elk waarvan een maximum der hoogte boven N. A. P. ligt, welk maximum voor een verheffing  $P$  door  $h_1$  en voor een verheffing  $Q$  door  $h_2$  moge worden voorgesteld. Laat verder, eveneens voor een verheffing  $P$  of een verheffing  $Q$ ,

$\delta_1$  of  $\delta_2$  de tijd zijn gedurende welken de waterhoogte tusschen  $h_1$  en  $h_1 - n$  cm of  $h_2$  en  $h_2 - n$  cm ligt. Wil men dan weten in welke mate zich waterhoogten boven een vastgesteld bedrag  $H$  zullen voordoen, dan luidt het antwoord dat het aantal keeren dat zulk een hoogte in den tijd  $T$  kan verwacht worden, gegeven wordt door de formule

$$\nu = \frac{1}{T\sqrt{n}} \sum \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)(h_1 + h_2 - H)} \quad (30)$$

en dat de gemiddelde lengte van den tijd gedurende welken telkens de vastgestelde hoogte  $H$  wordt overschreden kan worden gesteld op

$$\tau = \frac{\pi}{4\sqrt{n}} \cdot \frac{\sum \delta_1 \delta_2 (h_1 + h_2 - H)}{\sum \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)(h_1 + h_2 - H)}}.$$

In deze vergelijkingen <sup>1)</sup> hebben de sommen betrekking op alle combinaties van een verheffing  $P$  en een verheffing  $Q$  bij welke de som der maxima  $h_1$  en  $h_2$  de vastgestelde hoogte  $H$  overschrijdt; het is trouwens duidelijk dat alleen het samenvallen van twee dergelijke verheffingen in aanmerking komt. Voert men de berekeningen eerst voor een zekeren tijd  $T$  uit, en herhaalt men ze dan voor een tweemaal zoo langen tijd, dan wordt, daar men mag aannemen dat in twee achtereenvolgende gelijke lange tijden vrijwel dezelfde verschijnselen zullen plaats hebben, het aantal verheffingen  $P$  en eveneens het aantal verheffingen  $Q$  verdubbeld. Het aantal combinaties  $PQ$  en daarmee de waarde van elke der voorkomende sommen wordt viermaal grooter. De formules leeren dus dat, zooals natuurlijk het geval moet zijn,  $\nu$  evenredig met den tijd  $T$  is, en  $\tau$  onafhankelijk daarvan.

Voorts moet worden opgemerkt dat, indien de bovenbedoelde vereenvoudigende onderstellingen geheel juist waren, de tijden  $\delta_1$  en  $\delta_2$  evenredig zouden zijn met  $\sqrt{n}$ , zoodat  $n$  uit de uitkomsten zou wegvallen, hetgeen noodig is omdat de resultaten niet van een willekeurig gekozen grootheid kunnen afhangen. In werkelijkheid zullen echter  $\delta_1$  en  $\delta_2$  niet juist evenredig met  $\sqrt{n}$  zijn, zoodat de keus van  $n$  niet zonder invloed is. Intusschen mag men verwachten dat wanneer men voor  $n$  b.v. 10, 15 of 20 cm neemt, men wel de orde van grootte van  $\nu$  en  $\tau$  uit de formules zal kunnen afleiden.

Voor Harlingen is nagegaan hoe het gesteld is met de veelvuldigheid en met den duur van stuwingen en astronomische standen. Zoo goed het met de nauwkeurigheid der beschikbare gegevens mogelijk was is daarmee de frequentie van bepaalde hooge waterstanden berekend.

Daarbij bleek het volgende:

1°. Waterstanden tot omstreeks 270 cm + N.A.P. komen vrijwel evenveel voor als formule (30) aangeeft. Hieruit mag het besluit worden getrokken dat inderdaad de getij- en stuwings-verheffingen onafhankelijk van elkaar zijn.

2°. Voor nog hoogere standen vindt men met (30) een grootere veelvuldigheid dan werkelijk is waargenomen. Zoo is de stand van 280 cm + N.A.P., die volgens (30) eens in de 25 à 30 jaar zou moeten voorkomen, sinds 1800 slechts tweemaal overschreden. Het peil van 3 meter + N.A.P., dat volgens de formule bijna eens per eeuw kan worden verwacht, is waarschijnlijk niet bereikt zoo lang de Zuiderzee bestaat <sup>2)</sup>.

Dit zou, met alle door de onvolledigheid van het waarnemingsmateriaal geboden voorbehoud, wijzen op het bestaan van een of andere oorzaak die het gelijktijdig voorkomen van zeer hooge astronomische hoogwaters en zeer groote stuwingen tegenwerkt en inderdaad kan een dergelijke oorzaak

<sup>1)</sup> De formules gelden alleen wanneer voor elke combinatie die zich voordoet de grootheid  $h_1 + h_2 - H$  (die aangeeft hoeveel de gestelde grens  $H$  beneden de grootst mogelijke verhooging ligt) kleiner is dan  $\frac{(\delta_1 \sqrt{h_1} + \delta_2 \sqrt{h_2})^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2}$ . Aan deze voorwaarde is allicht voldaan, daar alleen de oplossing voor betrekkelijk groote waarden van  $H$  van belang is.

<sup>2)</sup> Literaturopgave n°. 15.

worden gevonden in de quadratische weerstandswet waardoor het superpositiebeginsel niet geldt. Wanneer de astronomische stand en de stuwung tegelijkertijd een maximum bereiken, moet in de daaraan voorafgaande periode de Waddenzee door beide oorzaken rijzen. Dit eischt, vooral in de zeegaten, vrij sterke stroomen die een belangrijken weerstand ondervinden. Doordat die weerstand niet lineair van de stroomsnelheid afhangt zal hij grooter zijn dan de som van de bij de „astronomische” en de „stuwings”-stroomen behoorende weerstanden. De rijzing van de Waddenzee wordt dus bemoeilijkt en de hoogste stand zal lager liggen dan de som van de astronomische hoogte die zonder stuwung zou zijn voorgekomen en van de grootste stuwung die zich bij afwezigheid van getij zou hebben ontwikkeld.

Deze redeneering gaat alleen op waar zoo groote stroomsnelheden bestaan dat de weerstanden een rol spelen, en dus niet in de Noordzee, waar wegens de groote diepte een groote stuwung door zeer kleine stroomsnelheid kan ontstaan. Hier kunnen stuwung en astronomisch getij onafhankelijk van elkander zijn, zooals de heer GALLÉ voor Hoek van Holland inderdaad heeft aangetoond <sup>1)</sup>.

Wat de in § 65 uitgevoerde berekeningen betreft, kan men uit de formules afleiden dat, wanneer windeffect en astronomische stand onafhankelijk van elkander zijn, waterstanden die b.v. niet meer dan 25 cm beneden de gevonden maxima liggen, zoo veelvuldig kunnen voorkomen dat er zeker rekening mee moet worden gehouden. Voor Harlingen komt een dergelijke stand volgens (30) ongeveer eens in de tien eeuwen voor.

Een andere vraag die men met de gevonden formules kan beantwoorden is die naar de waarschijnlijkheid van nog hoogere vloeden dan in § 65 in het oog werden gevat, zooals die zouden kunnen voorkomen, wanneer hetzij het getij, hetzij de stuwung de bij de berekening aangenomen, reeds zeer hooge, grens overschreed. Inderdaad is, wat het getij betreft, een dergelijke overschrijding werkelijk voorgekomen (§ 65, a).

Men vindt bij nadere beschouwing dat een noemenswaardig overschrijden van de in § 65 gevonden grootste waterhoogten zeer weinig waarschijnlijk is, zoo weinig dat van de mogelijkheid er van mag worden afgezien.

#### D. TWEEDE WIJZE VAN BEREKENEN.

§ 68. *Grondbeginsel.* Zooals reeds werd opgemerkt (§ 58), wordt bij de meeste stormen in het uit Waddenzee en Zuiderzee bestaande gebied de stationaire toestand niet bereikt, terwijl dat, na de afsluiting, in de Waddenzee wel het geval zal zijn. Dan zal daar de hoogte bereikt worden, waartoe het water nu zou stijgen als de wind lang genoeg met onveranderde kracht aanhield en ook overigens de omstandigheden onveranderd bleven; immers (§ 54), is eenmaal in de geheele watermassa de stationaire toestand ontstaan, dan zal het aanbrenge van een schot geen invloed op den waterstand daarbuiten hebben.

Bij de beschouwingen van Dr. LELY <sup>2)</sup> wordt vooreerst steeds de tegenwoordige toestand in het oog gevat en wordt de aandacht gevestigd op het oogenblik van hoogwater aan de Friesche kust. De dan in een of ander punt *A* daarvan bestaande hoogte wordt vergeleken met de hoogte te Vlieland-haven, dus aan de binnenzijde van het zeegat. Tusschen beide hoogten zal een verschil hoogte in *A* — hoogte bij Vlieland = *z* bestaan.

Bleef nu de wind aanhoudend waaien en werd het water bij Vlieland op dezelfde hoogte gehouden, dan zou het verschil hoogte in *A* — hoogte bij Vlieland een zeker maximaal bedrag  $z_m$  bereiken. Het verschil

$$z_m - z \tag{31}$$

geeft aan hoeveel het bedoelde niveauverschil op het beschouwde tijdstip nog ten achter is bij wat het op den duur zou kunnen worden. Dit tekort

<sup>1)</sup> Literaturopgave n°. 14 blz. 118.

<sup>2)</sup> „ n°. 11.

$z_m - z$  zal van het eene punt  $A$  tot het andere veranderen en het zal bij verschillende stormen niet dezelfde waarde hebben, daar de toestand bij den eenen meer en bij den anderen minder tot den stationairen toestand nadert.

Een dergelijk verschil als (31) kan men ook voor een paar andere willekeurig gekozen punten opmaken. Men kan daarvoor het zwaartepunt  $P$  van de Waddenzee en het zwaartepunt  $Q$  van de Zuiderzee nemen. Het verschil hoogte in  $Q$  — hoogte in  $P$  zal op het beschouwde oogenblik een zekere waarde  $\zeta$  hebben, en het zou, als de evenwichtstoestand bereikt werd, tot de grootere waarde  $\zeta_m$  kunnen stijgen.

Het verschil

$$\zeta_m - \zeta \quad (32)$$

is voor  $Q$  en  $P$  wat (31) voor  $A$  en Vlieland is.

Gaat men van één storm over tot een anderen, die verder van den evenwichtstoestand blijft, dan worden al de verschillen (31) en (32) grooter. De heer LELY maakt nu de onderstelling dat zij alle evenredig aan elkander veranderen, dat dus voor een bepaald punt  $A$  de verhouding van (31) en (32) bij alle stormen even groot is. Dit aannemende kan men stellen

$$z_m - z = a (\zeta_m - \zeta), \quad (33)$$

waarbij voor elk punt  $A$  de coëfficiënt  $a$  een bepaalde waarde heeft. Hij is de maat voor wat Dr. LELY „den verlagenden invloed der Zuiderzee” noemt; hij bepaalt nl. in welke mate het wegens het instroomen in de Zuiderzee nog niet bereikt zijn van den stationairen toestand zich op de beschouwde plaats in de waarde van  $z_m - z$  zal doen gevoelen.

Deze laatste grootheid, die men dus vindt door de bij een bepaalden storm vaststaande grootheid  $\zeta_m - \zeta$  voor elk punt  $A$  met de daarvoor passende waarde van  $a$  te vermenigvuldigen, geeft aan, als  $A$  benoorden de afsluitingslijn ligt, hoeveel door de afsluiting het water in  $A$  zal stijgen.

De waarden van  $a$  worden uit de gegevens die voor een groot aantal stormen beschikbaar zijn, afgeleid en zoo wordt een uitgebreid waarnemingsmateriaal aan de oplossing van het vraagstuk dienstbaar gemaakt.

§ 69. *Afleiding der grondvergelijking.* Formule (33) kan op elken storm, en ook op het geval van windstilte of zwakken wind worden toegepast, en het blijkt nu doelmatig, het geval van den storm dien men beschouwen wil te vergelijken met wat Dr. LELY het „normale” geval noemt, nl. hoogwater in de Waddenzee en geen of zwakke wind. Duidt men de grootheden, die daarop betrekking hebben, door den index 0 aan, dan heeft men, analoog aan (33)

$$z_{m0} - z_0 = a (\zeta_{m0} - \zeta_0),$$

en, als men beide vergelijkingen van elkaar aftrekt,

$$z_m - z - (z_{m0} - z_0) = a \{ \zeta_m - \zeta - (\zeta_{m0} - \zeta_0) \}. \quad (34)$$

Om hieruit de vergelijking in de door Dr. LELY gebruikte notaties af te leiden, moet men vooreerst bedenken dat  $z_m$  niet anders is dan de opwaaiing van Vlieland naar de beschouwde plaats. Deze zal, voor een bepaalde richting  $r$  van den wind, van de windkracht afhangen. Voor  $z_m$  wordt daarom geschreven

$$\frac{k_n}{k_7} y_r,$$

waarbij  $y_r$  de opwaaiing voorstelt bij een windkracht 7 op de schaal van BEAUFORT, en  $k_n/k_7$  de verhouding der opwaaiingen bij de werkelijk voorkomende windkracht  $n$  en bij de kracht 7.

De grootheid  $\zeta$  is het hoogteverschil dat in werkelijkheid tusschen de punten  $Q$  en  $P$  bestaat, of liever het verschil tusschen de gemiddelde hoogte (over het geheele oppervlak gemiddeld) in de Zuiderzee en de Waddenzee. Stelt men voor de gemiddelde hoogte in de Zuiderzee  $H_1$ , en voor die in de Waddenzee  $H_2$ , en

$$V_s = H_2 - H_1, \quad (35)$$

dan is

$$\zeta = -V_s.$$

Evenzoo is

$$\zeta_0 = -V_{s0},$$

als  $V_{s0}$  voor het normale geval hetzelfde is als  $V_s$  voor dat van den beschouwden storm,

$$V_{s0} = H_{20} - H_{10}.$$

Eindelijk zijn  $\zeta_m$  en  $\zeta_{m0}$  de hoogteverschillen die in de twee gevallen tusschen de punten  $P$  en  $Q$  bestaan als de eindtoestand bereikt is. Daarbij is  $\zeta_{m0}$  niet nul, want de waarnemingen leeren dat op windzwakke dagen het water in de Zuiderzee gemiddeld ongeveer 6 cm hooger staat dan in de Waddenzee, een verschil dat deels kan worden toegeschreven aan het kleinere soortelijk gewicht van het zoetere water in de Zuiderzee, deels aan de omstandigheid dat gedurende de tijden met zwakken wind (waarop de index 0 betrekking heeft) westelijke winden overwegen (§ 19), voorts hieraan dat bij ebstroom de diepte kleiner is dan bij vloedstroom, en eindelijk aan de kracht van BERNOULLI (§ 34). Hoe dit zij, men kan stellen

$$\zeta_m - \zeta_{m0} = V_w, \quad (36)$$

als  $V_w$  aangeeft hoeveel de evenwichtsofstuwing door den wind van de Waddenzee naar de Zuiderzee bij den uitgekozen storm meer bedraagt dan in het normale geval, in welk geval die opstuwing wel verwaarloosd kan worden.

Voert men de opgegeven waarden van  $z_m$ ,  $\zeta$ ,  $\zeta_0$ ,  $\zeta_m - \zeta_{m0}$  in (34) in en stelt men bovendien  $z_{m0} = 0$ , d.w.z. geen hoogteverschil tusschen Vlieland en de Friesche kust in het normale geval, dan vindt men

$$\frac{k_n}{k_7} y_r - z + z_0 = a(V_w + V_s - V_{s0})$$

of, als men

$$h = V_s + V_w - V_{s0} \quad (37)$$

stelt,

$$z = z_0 + \frac{k_n}{k_7} y_r - a h. \quad (38)$$

Dit is de grondvergelijking van den heer LELY.

In de volgende §§ zal worden medegedeeld hoe men verschillende in de formule voorkomende getalwaarden uit de waarnemingen kan afleiden, welke uitkomsten daarbij zijn verkregen en hoe de formule aan de waarnemingen kan worden getoetst. Daarop zal in § 75 de berekening der te verwachten verhoogingen volgen.

Bij de afleiding der einduitkomst die het meest waarschijnlijk is te achten en die een weinig afwijkt van de oorspronkelijke getallen van Dr. LELY, zal worden gebruik gemaakt van hetgeen de derde methode over de getijden en over den toestand in de zeegaten heeft geleerd.

§ 70. *Waterbeweging van en naar de Zuiderzee bij windstilte.* De gemiddelde hoogten  $H_1$  en  $H_2$  heeft Dr. LELY afgeleid uit de gelijktijdige standen van Helder, Vlieland, Harlingen, Hindeloopen, Stavoren, Lemmer, Kraggenburg, Elburg, Nijkerk, Oranjesluizen, Urk en Enkhuizen, op een wijze die nader in bijlage I van de brochure „Verhooging van de stormvloedstanden op de Friesche kust, tengevolge van de afsluiting der Zuiderzee”<sup>1)</sup> is aangegeven. Deze berekening der gemiddelde hoogten kan zoowel voor het geval van de niet door wind gestoorde getijbeweging als voor het geval van een storm worden uitgevoerd.

Het behoeft nauwelijks gezegd te worden dat men, gegeven de onregelmatige configuratie van de watermassa, bij het opmaken der gemiddelde hoogte over een groot gebied wel eens in onzekerheid er over verkeert hoe men de gegevens het best zal combineeren. Inderdaad zijn verschillende leden der Staatscommissie (o.a. de heer KOOPER) wel eens op eenigszins andere wijze dan Dr. LELY te werk gegaan. Op de einduitkomsten heeft

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 9.

dit echter, zooals in § 17 is medegedeeld, geen noemenswaardigen invloed.

Nadat, van uur tot uur, de hoogten  $H_1$  en  $H_2$  gevonden zijn, kan men nagaan hoe de snelheid van stijging van het water in de Zuiderzee, gemeten door de toeneming  $\Delta H_1$  van de gemiddelde hoogte per uur, samenhangt met het hoogteverschil  $H_2 - H_1$ . Het bleek dat het verband tusschen beide grootheden met voldoende nauwkeurigheid kan worden weergegeven door de formule

$$\Delta H_1 = 0,063 (H_2 - H_1) + 0,4. \quad (39)$$

De hierin voorkomende constanten werden bepaald door uit te gaan, niet van de rechtstreeks waargenomen waterhoogten, maar van die welke uit de verhandeling van M. H. VAN BERESTEIJN<sup>1)</sup> kunnen worden afgeleid. Daarbij werden de getijden  $M_2$ ,  $M_4$  en  $M_6$  in aanmerking genomen.

Later werd de formule nog vergeleken met rechtstreeks aan de peilschalen ontleende waterhoogten. Op deze wijze werden voor 245 tijden waarop de windsterkte beneden 2 BEAUFORT was, waarden van  $H_2 - H_1$  en  $\Delta H_1$  verkregen. Deze gevallen werden naar de waarden van  $H_2 - H_1$  gerangschikt en vervolgens in vijf groepen samengevat, voor elk waarvan de gemiddelde waarden, zoowel van  $H_2 - H_1$  als van  $\Delta H_1$  werden opge maakt. Deze gemiddelden nu kunnen, zooals onderstaande kleine tabel 13<sup>2)</sup> doet zien, werkelijk door de formule worden weergegeven.

TABEL 13.

| Aantal waarnemingen. | $H_2 - H_1$<br>(in cm). | $\Delta H_1$<br>(in cm/sec)<br>uit uurstanden. | $\Delta H_1$<br>ber. uit (39). | Vershil. |
|----------------------|-------------------------|--|--------------------------------|----------|
| 31                   | 48,7                    | 3,5  | 3,5                            | 0,0      |
| 41                   | 34,8                    | 2,2  | 2,6                            | - 0,4    |
| 127                  | 5,0                     | 0,6  | 0,7                            | - 0,1    |
| 59                   | - 30,3                  | - 1,3  | - 1,5                          | 0,2      |
| 87                   | - 54,2                  | - 2,9  | - 3,0                          | 0,1      |

Uit de vergelijking blijkt dat de stroom naar de Zuiderzee ophoudt ( $\Delta H_1 = 0$ ), niet als  $H_2 = H_1$  is, maar als er een hoogteverschil  $H_2 - H_1$  van  $-\frac{0,4}{0,063} = -6,3$  cm bestaat. Dit is het verschil van 6 cm waarvan reeds gesproken werd.

§ 71. *Invloed van den wind op de waterbeweging van en naar de Zuiderzee. Afhankelijkheid van de windkracht.* Als het water aan een wind is blootgesteld zal de verandering van het Zuiderzee-niveau per uur niet meer door verg. (39) worden gegeven, maar zal men kunnen schrijven

$$\Delta H_1 = 0,063 (H_2 - H_1) + 0,4 + \delta, \quad (40)$$

waarbij de term  $\delta$  de maat is voor den windinvloed.

Door deze vergelijking op gevallen van voldoende sterken wind toe te passen kan men uit de waargenomen waterhoogten  $H_1$  en  $H_2$ , in verband met de veranderingen  $\Delta H_1$ , de waarde van  $\delta$  afleiden.

Dit onderzoek heeft zich uitgestrekt over de drie belangrijkste stormvloed en die in de laatste 30 jaren zijn voorgekomen, nl. die van 22/23 December 1894, 12/13 Maart 1906 en 13/14 Januari 1916, voorts over den zeer langdurigen storm van December 1895 en ten slotte over alle perioden in de jaren 1908—1914, in welke volgens de jaarboeken van het Meteorologisch Instituut de windsnelheid te Helder grooter was dan 10 meter per seconde.

Zoo werd, alles samengenomen, een zeer groot aantal (nl. 2684) waarden van  $\delta$  gevonden, telkens met de bijbehorende windrichting en

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n<sup>o</sup>. 47.

<sup>2)</sup> Tabel 2 van proefschrift LELY, p. 23.

windkracht. Deze gegevens werden naar richting en kracht van den wind in groepen verdeeld, en voor elke groep werd de gemiddelde waarde van  $\delta$  bepaald.

Van de uitkomsten werd vervolgens gebruik gemaakt om na te gaan hoe bij een bepaalde richting van den wind,  $\delta$  van de sterkte daarvan, volgens de schaal van BEAUFORT, afhangt. Daartoe werden telkens voor een groep van waarnemingen die, wat de richting betreft, weinig uiteenliepen, de waarden van  $\delta$  en de windkracht  $n$  grafisch tegen elkaar uitgezet en werd door de verkregen punten een vloeiende lijn getrokken.

Aan deze lijnen konden nu de waarden der verhouding  $k_n/k_7$  ontleend worden, waarvan reeds in § 69 werd gesproken; voor deze verhouding werd nl. die van de bij de windsterkten  $n$  en 7 behoorende waarden van  $\delta$  genomen. Het bleek dat  $k_n/k_7$  vrijwel voor alle windrichtingen even groot is. Daarom werd in het vervolg voor elke windsterkte  $n$  met slechts één zoodanig verhoudingsgetal gerekend. Dit getal  $k_n/k_7$ , aldus uit de waarneming der gemiddelde hoogten in Waddenzee en Zuiderzee afgeleid, werd nu ook in de grondvergelijking ingevoerd. Er werd dus aangenomen dat de wet, volgens welke de windinvloed van de windsterkte afhangt, die in het geval Waddenzee—Zuiderzee bij alle windrichtingen dezelfde is, ook nog dezelfde zal blijven als men met de opwaaiing van Vlieland naar de Friesche kust te doen heeft.

Trouwens, in het proefschrift van Dr. LELY (p. 45—47) worden ook de verhoudingen  $k_n/k_7$  uit de bij stormvloedden voorkomende verschillen H.W. Harlingen — H.W. Vlieland afgeleid (verg. § 76). De daarbij verkregen uitkomsten stemmen voldoende overeen met de op de boven uiteengezette wijze uit de rijzingen van den Zuiderzeespiegel afgeleide getallen. Dit blijkt uit de volgende tabel.

TABEL 14. Waarden van  $k_n/k_7$  <sup>1)</sup>.

| Windkracht. | Uit rijzingen en dalingen van den Zuiderzeespiegel. | Uit het verschil H.W. Harlingen—H.W. Vlieland. |                 |
|-------------|---|--|-----------------|
|             |   | Wind Z tot WZW.                                | Wind W tot NNW. |
| 4           | 0,25  | 0,25   | 0,27            |
| 5           | 0,40  | 0,38   | 0,40            |
| 6           | 0,65  | 0,63   | 0,67            |
| 7           | 1,00  | 1,00   | 1,00            |
| 8           | 1,40  | 1,50   | 1,47            |
| 9           | 1,90  | 2,00   | 2,00            |
| 10          | 2,50  | 2,75   | 2,53            |

Nadat de waarden van  $k_n/k_7$  zijn gevonden, kunnen nu onregelmatige afwijkingen worden vereffend door, telkens voor een bepaalde windrichting, alle eerst gevonden waarden van  $\delta$  te herleiden tot de windkracht 7, en er daarna het gemiddelde van te nemen. Zoo verkrijgt men voor elke windrichting een bepaalde waarde van  $\delta$  voor  $n = 7$ , uit welke ten slotte, met behulp van de verhoudingsgetallen  $k_n/k_7$ , de waarden van  $\delta$  voor andere windsterkten worden afgeleid.

Is eenmaal  $\delta$  gevonden, dan volgt daaruit het hoogteverschil dat in de vergelijkingen (36) en (37) door  $V_w$  is voorgesteld. Uit (40) volgt nl. dat de wind gelijkstaat met een hoogteverschil

$$\frac{\delta}{0,063}$$

<sup>1)</sup> De tweede kolom van deze tabel is ontleend aan tabel 6 op p. 33 van proefschrift LELY. De beide volgende kolommen zijn de derde en vijfde kolom van tabel 12, p. 47 van het proefschrift.

zoodat men, om  $V_w$  te krijgen, de waarden van  $\delta$  door 0,063 moet deelen.

De uitkomsten voor  $V_w$  zijn de volgende:

TABEL 15 <sup>1)</sup>.

| Windrichting. | Waarde van $V_w$ in cm voor verschillende windrichtingen bij windkracht: |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|               | 4  | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| Z . . . . .   | - 6  | - 9  | - 15 | - 22 | - 31 | - 43 | - 56 | - 73 |
| ZZW . . . . . | - 5  | - 8  | - 11 | - 19 | - 27 | - 37 | - 48 | - 62 |
| ZW . . . . .  | - 3  | - 5  | - 8  | - 12 | - 16 | - 21 | - 28 | - 37 |
| WZW. . . . .  | 2  | 3    | 5    | 8    | 11   | 15   | 19   | 25   |
| W . . . . .   | 6  | 10   | 16   | 25   | 35   | 48   | 63   | 82   |
| WNW . . . . . | 10   | 16   | 25   | 39   | 55   | 75   | 99   | 129  |
| NW . . . . .  | 11   | 18   | 30   | 46   | 64   | 87   | 115  | 149  |
| NNW . . . . . | 11   | 18   | 30   | 46   | 64   | 87   | 115  | 149  |
| N . . . . .   | 10   | 16   | 26   | 41   | 57   | 78   | 103  | 134  |
| NNO . . . . . | 6  | 10   | 17   | 26   | 37   | 51   | 67   | 87   |
| NO. . . . .   | 2  | 3    | 6    | 9    | 13   | 18   | 24   | 25   |
| ONO . . . . . | - 1  | - 2  | - 3  | - 5  | - 7  | - 9  | - 12 | - 14 |
| O . . . . .   | - 4  | - 6  | - 10 | - 15 | - 20 | - 27 | - 36 | - 47 |
| OZO . . . . . | - 5  | - 9  | - 14 | - 21 | - 29 | - 40 | - 52 | - 67 |
| ZO . . . . .  | - 6  | - 10 | - 16 | - 24 | - 34 | - 46 | - 60 | - 78 |
| ZZO . . . . . | - 6  | - 10 | - 16 | - 24 | - 34 | - 46 | - 60 | - 78 |

§ 72. *Bepaling der coëfficiënten  $y_r$  en  $a$  in de grondvergelijking. Overeenstemming van die vergelijking met de waarnemingen.* Als men de waarde van  $V_w$  kent kan men bij elken storm voor elk tijdstip de waarde van de grootheid  $h$ , die door (37) bepaald is, en in de grondvergelijking voorkomt, aangeven. Men vindt nl. volgens formule (35)  $V_s$  uit de gemiddelde hoogten in Zuiderzee en Waddenzee, berekend zooals in § 70 werd aangegeven.

De term  $V_{s0}$  kan op 35 cm gesteld worden, want zooveel staat op het oogenblik van hoogwater aan de Friesche kust de Waddenzee, gemiddeld genomen, hooger dan de Zuiderzee <sup>2)</sup>.

Na deze voorbereiding heeft Dr. LELY van de waarnemingen bij een 210-tal stormen gebruik gemaakt om voor verschillende plaatsen aan de Friesche kust den coëfficiënt  $a$  in de grondvergelijking (38) te leeren kennen. Het gekozen oogenblik is steeds dat van hoogwater aan de Friesche kust.

Van de in verg. (38) voorkomende grootheden kent men  $z-z_0$ ,  $k_n/k_r$  en  $h$ , terwijl  $y_r$  en  $a$  moeten worden gevonden.

Heeft men voor een bepaalde plaats een zeker aantal waarnemingen, dan heeft men even zoo vele vergelijkingen. Het aantal onbekenden  $a$  en  $y_r$  is echter aanmerkelijk kleiner, en er kan dus van een verificatie der

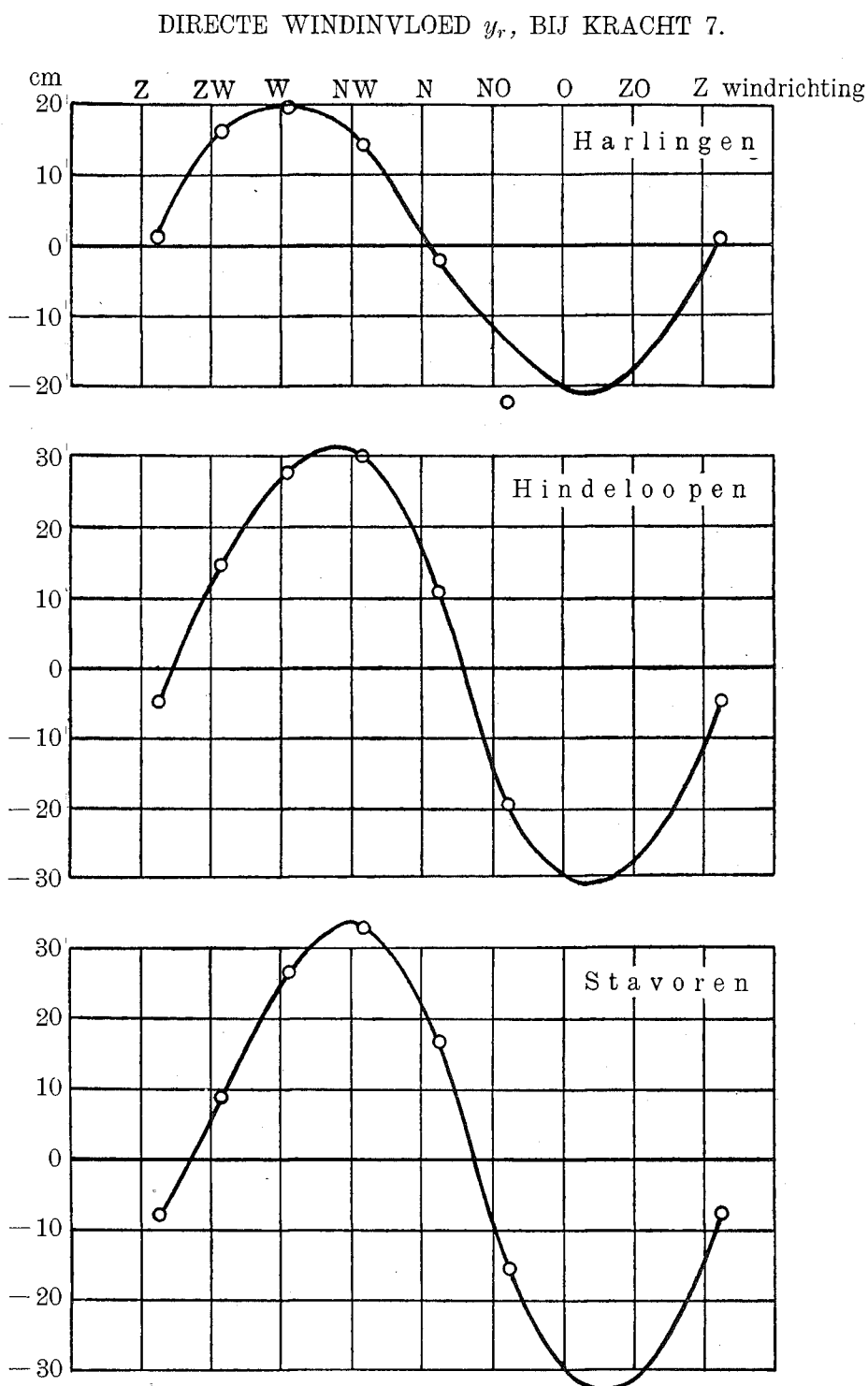
<sup>1)</sup> Tabel 10, p. 39 van het proefschrift van Dr. LELY.

<sup>2)</sup> Dr. LELY stelt  $V_{s0}$  op 41 cm; bij de in den tekst gebruikte waarde telt hij nl. de 6 cm op waarvan in § 69 gesproken werd. Maar hij neemt ook voor  $V_s$  een getal 6 cm grooter dan volgens formule (35), zoodat de termen 6 cm elkaar opheffen.

Wat de waarde van 35 cm betreft, die voor het hoogteverschil tusschen Waddenzee en Zuiderzee bij stil weer wordt aangenomen, kan worden opgemerkt dat op het oogenblik van hoogwater in de Waddenzee volgens de vergelijkingen van § 70 het verschil ongeveer 40 cm bedraagt. Het wordt op 35 cm gesteld omdat het hoogwater aan de Friesche kust (en het tijdstip daarvan wordt in het oog gevat) iets later valt dan gemiddeld hoogwater in de Waddenzee.

grondvergelijking sprake zijn, en wel omdat  $y_r$  alleen van de richting van den wind afhangt en dus voor alle stormen, waarbij de windrichting dezelfde is, even groot moet zijn. Voorts moet  $y_r$ , als men van de eene richting tot de andere overgaat, geleidelijk veranderen.

Door op doelmatige wijze stap voor stap voort te gaan vindt Dr. LELY als meest aannemelijke waarden van  $y_r$ , die, welke in figuur 34, uit zijn



Figuur 34.

bijlage E overgenomen, grafisch zijn voorgesteld, en als meest waarschijnlijke waarden van  $a$  de volgende, met de daarachter aangegeven middelbare fouten.

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| Harlingen . . . . .  | 0,004 ± 0,06 |
| Hindeloopen. . . . . | 0,47 ± 0,07  |
| Stavoren. . . . .    | 0,69 ± 0,05. |



Nevenstaande tabel 16 doet zien hoe, nadat de waarden van  $y_r$  bepaald zijn, de coëfficiënt  $a$  gevonden is. De waarde van  $\frac{k_n}{k_7}$  is ontleend aan de berekeningen waarvan in § 71 gesproken werd, die van  $y_r$  aan de grafische voorstelling van figuur 34. Onder  $\Delta$  wordt het rechtstreeks uit de waarnemingen afgeleide verschil  $z - z_0$  verstaan, d.w.z. het bedrag waarmee het hoogteverschil tusschen de beschouwde plaats en Vlieland van dat hoogteverschil in het normale geval afwijkt. In de tweede kolom heeft  $h$  de in (37) aangegeven beteekenis. In de vierde kolom wordt de windrichting aangegeven door het getal dat gevonden wordt door den hoek tusschen de richting Zuid en de windrichting („met zon” gerekend) door  $22\frac{1}{2}^\circ$  te deelen. De waarden van  $a$  worden gevonden door de verschillen der waarden van

$$\frac{k_n}{k_7} y_r - \Delta$$

door de overeenkomstige verschillen van  $h$  te deelen <sup>1)</sup>.

In hoeverre nu de waarnemingen door de grondvergelijking, met de voor  $y_r$  en  $a$  gevonden waarden, kunnen worden weergegeven, blijkt uit de volgende tabel 17.

Met  $\Delta$  zijn daarin weer de waarden van  $z - z_0$  aangeduid, en wel staat voor elk der drie plaatsen in de eerste kolom  $\Delta$  de waarde (in centimeters) dezer grootte rechtstreeks aan de waarnemingen ontleend, en in de tweede kolom de waarde

$$\Delta = \frac{k_n}{k_7} y_r - a h,$$

die uit de grondvergelijking volgt.

TABEL 17 <sup>2)</sup>.

| Windrichting.          | Aantal waarnemingen. | h     | Harlingen.            |                    |          | Hindeloopen.          |                    |          | Stavoren.             |                    |          |
|------------------------|----------------------|-------|-----------------------|--------------------|----------|-----------------------|--------------------|----------|-----------------------|--------------------|----------|
|                        |                      |       | $\Delta$ waargenomen. | $\Delta$ berekend. | Vershil. | $\Delta$ waargenomen. | $\Delta$ berekend. | Vershil. | $\Delta$ waargenomen. | $\Delta$ berekend. | Vershil. |
| I.<br>Z, ZZW, ZW . .   | 19                   | -27,0 | 2,6                   | 5,5                | - 2,9    | 9,5                   | 13,5               | - 4,0    | 12,1                  | 16,1               | - 4,0    |
|                        | 27                   | - 5,3 | 8,5                   | 5,7                | 2,8      | 5,6                   | 3,4                | 2,2      | 2,3                   | 1,1                | 1,2      |
|                        | 26                   | 18,2  | 5,1                   | 6,5                | - 1,4    | - 6,3                 | - 6,1              | - 0,2    | -13,2                 | -12,6              | - 0,6    |
| II.<br>WZW, W, WNW     | 15                   | - 4,3 | 17,7                  | 16,0               | 1,7      | 22,9                  | 22,8               | 0,1      | 22,5                  | 22,6               | - 0,1    |
|                        | 21                   | 26,1  | 16,9                  | 20,4               | - 3,5    | 10,8                  | 14,7               | - 3,9    | 4,6                   | 7,0                | - 2,4    |
|                        | 17                   | 75,0  | 28,1                  | 27,5               | 0,6      | 6,2                   | 0,9                | 5,3      | -14,1                 | -17,6              | 3,5      |
| III.<br>NW, NNW, N . . | 12                   | -11,5 | 11,7                  | 7,0                | 4,7      | 29,6                  | 22,2               | 7,4      | 34,2                  | 26,7               | 7,5      |
|                        | 19                   | 21,1  | 8,2                   | 10,7               | - 2,5    | 9,6                   | 12,9               | - 3,3    | 9,8                   | 10,6               | - 0,8    |
|                        | 16                   | 58,7  | 10,2                  | 11,2               | - 1,0    | - 1,9                 | - 2,6              | 0,7      | -11,7                 | -12,3              | 0,6      |
| IV.<br>NNO, NO, ONO    | 9                    | -50,1 | -21,2                 | -12,6              | - 8,6    | 7,6                   | 5,9                | 1,7      | 19,7                  | 21,3               | - 1,6    |
|                        | 22                   | -18,1 | -13,2                 | - 8,3              | - 4,9    | - 1,5                 | - 2,7              | 1,2      | 5,8                   | 4,8                | 1,0      |
|                        | 7                    | 9,3   | - 9,9                 | - 6,6              | - 3,3    | -13,3                 | - 9,4              | - 3,9    | -10,0                 | - 6,8              | - 3,2    |

<sup>1)</sup> De tabel is ontleend aan Bijlage II van het proefschrift van Dr. LELY. Alleen is, in overeenstemming met de beteekenis die in § 68 aan  $a$  werd gegeven, het teken van  $a$  overal omgekeerd.

<sup>2)</sup> Tabel 18, p. 54 van het proefschrift.

Men ziet dat er een bevredigende overeenstemming is.

Wat de waarden der constante  $a$  betreft, moge nog worden opgemerkt dat de afneming daarvan naar het Noorden toe zeer begrijpelijk is. Zij is het gevolg hiervan, dat men allengs buiten het gebied komt waar het water op het beschouwde oogenblik naar de Zuiderzee stroomt.

Reeds voor Harlingen is  $a$  zoo goed als nul. Inderdaad worden de overblijvende afwijkingen voor deze plaats niet noemenswaard grooter als men eenvoudig  $a = 0$  stelt. Men kan alleen besluiten dat de coëfficiënt niet grooter dan b.v. 0,1 is.

§ 73. *Mate van zekerheid der gevonden uitkomsten.* Om nader te beoordeelen welke waarde aan de getallen  $a$  voor Hindeloopen en Stavoren moet worden toegekend, kan men b.v. de in tabel 16 gegeven waarden van  $\Delta - \frac{k_n}{k_7} y_r$  als vaststaande beschouwen en, de vergelijking

$$\Delta - \frac{k_n}{k_7} y_r + a h = 0 \quad (41)$$

gebruikende, uit al de in de tabel voor een bepaalde plaats voorkomende gegevens de meest waarschijnlijke waarde van  $a$  zoeken. Daarbij kan ook de middelbare fout van de uitkomst bepaald worden.

Geeft men bij deze berekeningen aan elk der vier groepen I—IV hetzelfde gewicht, dan vindt men voor Hindeloopen

$$a = 0,46 \pm 0,03.$$

Rekent men met de derde groep alleen, dan komt er

$$a = 0,55 \pm 0,08,$$

terwijl, als aan de eerste groep het gewicht  $\frac{1}{4}$  wordt toegekend, aan de tweede en de vierde het gewicht  $\frac{1}{2}$  en aan de derde het gewicht 1, de uitkomst wordt

$$a = 0,47 \pm 0,035.$$

Een reden om aan de gegevens van groep III het grootste gewicht toe te kennen kan men vinden in de omstandigheid dat hier de waarden van  $h$ , en evenzoo die van  $\Delta - \frac{k_n}{k_7} y_r$ , meer dan bij de andere groepen uiteenloopen.

Men kan de vraag ook anders stellen. De windrichtingen in groep III liggen in de nabijheid van die voor welke  $y_r$  de grootste waarde heeft (NW). Men kan dus wel voor alle waarnemingen van deze groep  $y_r$  als constant beschouwen, zoodat men drie vergelijkingen van den vorm (41) met twee onbekenden,  $y_r$  en  $a$ , heeft. Lost men deze op, dan vindt men, altijd voor Hindeloopen

$$a = 0,53.$$

Uit een en ander mag worden besloten dat aan de waarden die Dr. LELY voor den coëfficiënt  $a$  vindt, weinig valt te veranderen.

§ 74. *Verlagende invloed der Zuiderzee voor Piaam en Zurig.* Voor deze plaatsen ontbraken de noodige gegevens om berekeningen als de zoeven besprokene uit te voeren. De waarden van  $a$  die hier moeten worden aangenomen werden daarom door een grafische interpolatie, rekening houdende met de onderlinge afstanden, uit de getallen voor Stavoren, Hindeloopen en Harlingen, afgeleid. Men zie figuur 35, waarin de eene lijn op de grootste en de andere op de kleinste waarden die voor  $a$  kunnen worden aangenomen betrekking heeft <sup>1)</sup>.

Daar de onderstelde vloeiende verandering van  $a$  als men langs de kust van plaats tot plaats gaat aannemelijk is, kunnen de uitkomsten dezer interpolatie betrouwbaar worden geacht.

<sup>1)</sup> Proefschrift p. 57, figuur 6.

De verkregen getallen zijn:

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Stavoren. . . . .     | 0,60 à 0,75 |
| Hindeloopen . . . . . | 0,40 „ 0,55 |
| Piaam . . . . .       | 0,20 „ 0,30 |
| Makkum. . . . .       | 0,15 „ 0,25 |
| Zurig. . . . .        | 0,05 „ 0,15 |
| Harlingen . . . . .   | 0,0 „ 0,10  |

Bij de verdere berekeningen worden de *grootste* waarden gebruikt.

§ 75. *Berekening der te verwachten verhooging.* Hoeveel het water na de afsluiting der Zuiderzee aan de Friesche kust hooger zal komen te staan kan nu aanstonds uit het in § 68 gezegde worden afgeleid. In de eerste plaats kan men nagaan hoever het verschil hoogte in *Q* — hoogte in *P*, d.i. gemiddelde hoogte in Zuiderzee — gemiddelde hoogte in Waddenzee, verwijderd is van de waarde die het in den stationairen toestand zou hebben.

Het water in de Waddenzee staat op de hoogte  $H_2$ , dat in de Zuiderzee op  $H_1$ , dus in de Waddenzee  $H_2 - H_1$  of  $V_s$  hooger. Ontstond nu de evenwichtstoestand zonder wind, dan zou het omgekeerd in de Zuiderzee 6 cm hooger dan in de Waddenzee komen. Daarbij komt nu nog het bedrag  $V_w$  want dit is het hoogteverschil waarmede de wind, wat den invloed op de waterbeweging betreft, gelijk staat en kan dus ook geacht worden het hoogteverschil te zijn dat de wind kan teweegbrengen. Zoo komt men tot

$$V_s + V_w + 6$$

voor de grootheid die aangeeft hoever men, wat het hoogteverschil tusschen

de beide gebieden betreft, nog van den evenwichtsstand is verwijderd, d.w.z. voor wat in § 68  $\zeta_m - \zeta$  genoemd werd. Daaruit volgt dat voor een of andere plaats aan de Friesche kust (vergeleken met Vlieland) de overeenkomstige grootheid de waarde

$$a(V_s + V_w + 6)$$

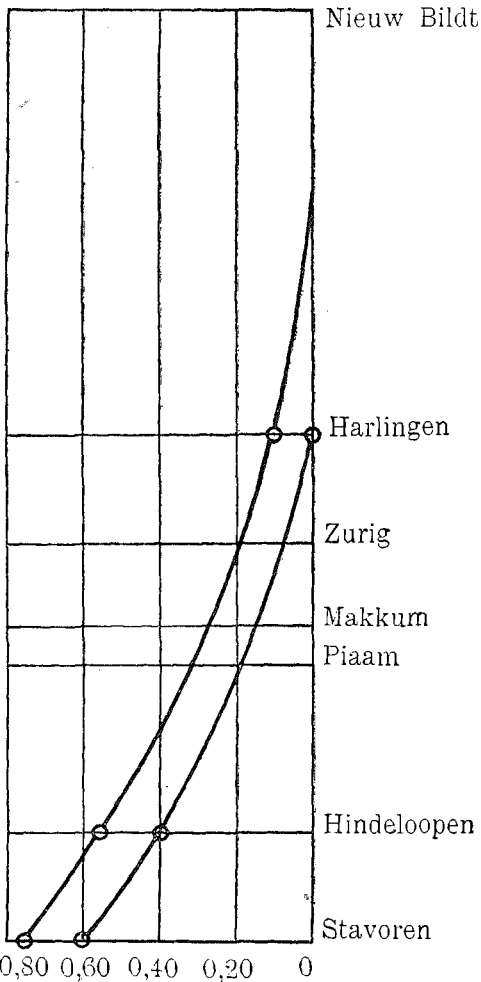
heeft; zooveel zal dus op die plaats na de afsluiting het water hooger komen, als men onderstelt dat de hoogte bij Vlieland blijft wat zij nu is <sup>1)</sup>.

De heer LELY heeft op deze wijze de stijgingen voor de stormen van December 1894, Maart 1906 en Januari 1916 berekend en is tot de volgende uitkomsten gekomen:

|                     | 22/23 Dec. 1894. | 12/13 Maart 1906. | 13/14 Jan. 1916. |
|---------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Harlingen . . . . . | 18               | 16                | 18               |
| Zurig . . . . .     | 27               | 24                | 27               |
| Makkum . . . . .    | 45               | 40                | 45               |
| Piaam . . . . .     | 54               | 48                | 55               |

<sup>1)</sup> In het proefschrift van Dr. LELY vindt men  $a(V_s + V_w)$ , maar  $V_s$  heeft daar de beteekenis  $H_2 - H_1 + 6$ , en in dit verslag de beteekenis  $H_2 - H_1$ .

GRAFISCHE VOORSTELLING GRENSWAARDEN COËFFICIËNT *a*.



Figuur 35.

Thans moet nog in rekening worden gebracht dat de hoogte in Vlieland niet onveranderd zal blijven, maar, zooals later zal blijken, zal toenemen. De vermeerdering moet bij de medegedeelde uitkomsten voor de Friesche kust, die op het *hoogteverschil* betrekking hebben, worden opgeteld. Zij kan (tabel 42, blz. 200a) op 15 cm worden gesteld en zoo vindt men voor de grootste te verwachten verhoogeningen

|                     |    |
|---------------------|----|
| Harlingen . . . . . | 33 |
| Zurig . . . . .     | 42 |
| Makkum . . . . .    | 60 |
| Piaam . . . . .     | 70 |

§ 76. *Vergelijking met andere berekeningen.* Het spreekt vanzelf dat de gevolgde methoden in den grond der zaak niet ten eenenmale verschillend kunnen zijn. Om dit te doen uitkomen mogen de methoden van de heeren GALLÉ en LELY met elkander vergeleken worden. Telt men bij het thans bestaande, door form. (38) gegeven hoogteverschil  $z$  de verhooging (§ 75)  $a(V_s + V_w + 6)$  op, dan vindt men, als men (37) in aanmerking neemt, voor het hoogteverschil na de afsluiting

$$z = z_0 + a(V_{s0} + 6) + \frac{k_n}{k_7} y_r.$$

Terwijl in het normale geval  $z$  de waarde  $z_0$  heeft, is er thans om twee redenen een verhooging. Als er geen wind was, zou de vloedhoogte aan de Friesche kust, in vergelijking met Vlieland, met  $a(V_{s0} + 6)$  toenemen; daarbij komt de opwaaiing

$$\frac{k_n}{k_7} y_r.$$

Zoo blijkt ook hier de verhooging uit de beide deelen te bestaan, die in de eerste methode (§ 64) werden onderscheiden.

Wat de opwaaiing betreft is het eigenaardige van de methode LELY dat zij voor het gebied zelf, waarvoor zij bekend moet worden, uit de waarnemingen bij de 210 beschouwde stormen wordt afgeleid, hetgeen mogelijk is omdat men bij den eenen storm meer en bij den anderen minder van den evenwichtstoestand verwijderd blijft. Daarom kan door combinatie der verschillende gegevens de invloed van het niet bereikt zijn van den evenwichtstoestand worden geëlimineerd en de opwaaiing worden bepaald.

Daarbij verdient het opmerking dat, aangezien voor Harlingen  $a = 0$  gesteld kan worden, hetgeen wil zeggen dat thans reeds op de lijn Vlieland—Harlingen de evenwichtstoestand bereikt wordt, de waarnemingen omtrent de stuwing te Harlingen rechtstreeks zonder correctie tot besluiten omtrent de opwaaiing kunnen leiden. Zij worden dan ook door Dr. LELY gebezigd om de waarden van het verhoudingsgetal  $k_n/k_7$  te bepalen, waardoor de uit de vulling der Zuiderzee afgeleide waarden bevestigd worden (§ 71).

Wat de voor de opwaaiing gevonden uitkomsten betreft, deze komen vrijwel met de getallen overeen, die in § 65, *d* werden gebezigd.

Voor 10 BEAUFORT (ruim 21 m per sec) is (§ 71)  $k_n/k_7 = 2,50$ , en bij de richting NWtW is de waarde van  $y_r$  voor Harlingen 18, voor Hindeloopen 31 en voor Stavoren 33 cm, waaraan de opwaaiingen 45, 78 en 82 cm beantwoorden. Door interpolatie volgt hieruit voor Piaam 65 cm en voor Zurig ruim 50 cm. In § 65, *d* werd gevonden voor Piaam 75, voor Zurig 55 en voor Harlingen 50 cm.

§ 77. *Verband tusschen den invloed van den wind en de windkracht.* Zooals in § 54 werd uiteengezet zal het hoogteverschil, dat in een afgesloten gebied door een standvastigen wind wordt teweeggebracht, evenredig zijn met de kracht  $F$  die de wind per vlakte-eenheid op den waterspiegel uitoefent. Deze kracht is ten naasten bij evenredig met de tweede macht van de windsnelheid en dus ook met den winddruk. Werkelijk zijn, zooals nevenstaande tabel 18 doet zien, de uit de waterhoogte te Harlingen afgeleide

waarden van  $k_n/k_7$  vrijwel gelijk aan de verhouding van den winddruk bij sterkte  $n$  tot dien bij de sterkte 7.

TABEL 18.

| Windsterkte<br>BEAUFORT. | Windsnelheid<br>$V$ in m<br>per sec. | Winddruk $K$<br>in kg<br>per m <sup>2</sup> . | $V_n/V_7$ . | $K_n/K_7$ . | $k_n/k_7$<br>uit opwaaiing<br>Harlingen.<br>1) | $k_n/k_7$<br>uit rijzing<br>Zuiderzee-<br>spiegel. |
|--------------------------|--------------------------------------|---|-------------|-------------|--|--|
| 4                        | 6,7                                  | 3,2   | 0,52        | 0,27        | 0,27   | 0,24   |
| 5                        | 8,8                                  | 5,6   | 0,68        | 0,48        | 0,40   | 0,41   |
| 6                        | 10,7                                 | 8,2   | 0,83        | 0,68        | 0,67   | 0,65   |
| 7                        | 12,9                                 | 12,0  | 1,00        | 1,00        | 1,00   | 1,00   |
| 8                        | 15,4                                 | 17,0  | 1,19        | 1,41        | 1,47   | 1,42   |
| 9                        | 18                                   | 23,5  | 1,39        | 1,96        | 2,00   | 1,92   |
| 10                       | 21                                   | 32  | 1,63        | 2,67        | 2,53   | 2,47   |

1) Dit zijn de getallen uit de laatste kolom van tabel 14 in § 71.

Er werd reeds op gewezen dat de waarden van  $k_n/k_7$ , uit de waterhoogten te Harlingen afgeleid, vrij goed overeenstemmen met die welke uit de rijzing van den Zuiderzeespiegel worden gevonden en men ziet dan ook in de tabel dat de laatste getallen, evengoed als de eerste, gelijk aan  $K_n/K_7$  kunnen geacht worden.

Intusschen ligt hierin iets bevreedendens. Had men nl. met zuivere driftstroomen te doen, dan zou de snelheid daarvan evenredig met den vierkantswortel uit de grootte der werkende kracht zijn (form. 21, § 55); dan zouden dus de getallen in de laatste kolom de vierkantswortels van die in de beide voorafgaande kolommen moeten zijn. Dat hiervan geen sprake is, is hieraan te wijten, dat de stroom naar de Zuiderzee, waarvan de sterkte uit de stijging van het peil wordt afgeleid (§ 71), niet alleen door den wind, maar voor een zeker niet minder groot gedeelte door een verhang bepaald is. Een opzettelijk hiervoor uitgevoerde berekening heeft doen zien dat het verband tusschen den stroom naar de Zuiderzee en de windsterkte werkelijk ongeveer zoo moet zijn als door de cijfers van de laatste kolom van tabel 18 wordt uitgedrukt.

§ 78. *Rechtvaardiging van de in § 68 gemaakte onderstelling.* Op het oogenblik van hoogwater aan de Friesche kust zal in het gebied der Waddenzee een zuidwaarts gerichte stroom bestaan. Werd nu zulk een stroom bij windstil weer alleen door de niveauverschillen bepaald, dan zou men zijn loop van punt tot punt, met inachtneming van de op elke plaats bestaande diepte, uit de wetten der verhangstroomen kunnen afleiden. De afwijkingen van den waterspiegel van een horizontaal vlak zouden misschien, in verband met de diepteveranderingen, op onregelmatige wijze van punt tot punt veranderen, maar zij zouden als men met een stationairen toestand te doen had, overal geheel bepaalde waarden aannemen. De onderlinge verschillen zouden evenredig zijn met de tweede macht der stroomsnelheden, maar zij zouden als men van één stroom tot een anderen die sterker of zwakker is overgaat, alle in dezelfde verhouding veranderen.

Iets dergelijks geldt van den stroom die op een stormdag de Zuiderzee intrekt. Evenals er bij windstille evenwicht zou zijn bij een horizontalen waterspiegel, zou er nu evenwicht zijn bij een waterspiegel  $S_0$  die naar binnen toe in bepaalde mate oploopt en men kan in eerste benadering zeggen dat de sterkte van den stroom bepaald wordt door de afwijkingen van den werkelijken waterspiegel van dat vlak  $S_0$ , evenals zoeven door de afwijkingen van een horizontaal vlak. Zoo komt men tot de opvatting dat de verschillen tusschen de afwijkingen van  $S_0$  alle in dezelfde verhouding zullen veranderen als men van één geval tot een ander overgaat, en dit is juist de onderstelling waarop de grondvergelijking van Dr. LELY berust.

Hierbij moge worden opgemerkt dat reeds in 1917 het lid der Staatscommissie, de heer KOOPER, uit de gegevens die hem, wat den stroom naar

de Zuiderzee betreft, ten dienste stonden, besluiten heeft getrokken omtrent het „relatieve verhang” van den vloeistofspiegel met betrekking tot het evenwichtsvlak  $S_0$ , wat dan verder een schatting van de te verwachten verhooging mogelijk maakte <sup>1)</sup>.

§ 79. *Invloed der afsluiting op de getijden.* De in de vorige § gegeven rechtvaardiging van de door Dr. LELY gemaakte onderstelling gaat in het bijzonder voor stationaire bewegingstoestanden door; zij zal des te minder gelden naarmate men met sneller veranderlijke toestanden te doen heeft. Inderdaad geeft de nu besproken berekeningswijze, wanneer zij op het gewone getij zonder wind wordt toegepast, voor de verhooging daarvan tengevolge van de afsluiting een uitkomst aanmerkelijk lager dan de naar de derde methode gevondene. Dit schijnt hieraan te liggen dat bij het gewone getij de stroomen veel sneller veranderen dan bij een stormvloed.

Zooals reeds in § 76 werd gezegd, wordt de verhooging der getijbeweging, die in de geheele door Dr. LELY berekende verhooging begrepen is, gegeven door  $a(V_{s0} + 6)$ , of, daar  $V_{s0} = 35$  cm is door  $a \times 41$  cm. Voor Piaam, met  $a = 0,30$ , wordt dit 12 cm, terwijl in § 47 voor het gemiddelde hoogwater 37 cm en voor een zeer hoog hoogwater bij springtij zelfs 50 cm werd gevonden.

Bij de becijferingen die tot deze laatste getallen geleid hebben is met al de omstandigheden die bij de getijbeweging voorkomen zoo goed mogelijk rekening gehouden; de drie in § 36 genoemde termen in de bewegingsvergelijking spelen alle daarbij een rol en de phaseverschillen, die er bij de getijbeweging tusschen verschillende punten van het gebied bestaan, zijn niet uit het oog verloren.

In verband hiermede moet er nog eens op gewezen worden dat (§ 40,  $a$ ) de afmetingen der Zuiderzee van de orde van grootte van de golflengte der getijbeweging zijn. Dit blijkt ook uit de formules

$$H_1 = 5,8 \cos 2\pi \frac{t - 10,4}{12} - 5,3$$

en

$$H_2 = 47 \cos 2\pi \frac{t - 7,6}{12} - 12,8$$

waardoor Dr. LELY de gemiddelde waterhoogten in Zuiderzee en Waddenzee boven N. A. P. voorstelt. Tusschen deze uitdrukkingen bestaat een phaseverschil van  $2,8/12 = 0,23$  golflengte of in hoekmaat  $84^\circ$ .

Stelde men de waterhoogten, zooals zij op eenig oogenblik, b.v. op den tijd  $t = 7,6$ , zijn langs een rechte lijn die midden door Waddenzee en Zuiderzee loopt grafisch voor, dan zou men zoo iets als een sinusoïde krijgen, waarbij van het punt  $P$  waarop  $H_2$  betrekking heeft tot het punt  $Q$  waarvoor  $H_1$  geldt, de uitwijking in reden van 47 tot ongeveer 2 daalt. Tusschen  $P$  en  $Q$  zou bijna een kwart golflengte liggen en onder deze omstandigheden is het niet duidelijk dat de rechte lijn die  $P$  en  $Q$  verbindt, het werkzame verhang aangeeft, dat dit dus door  $H_2 - H_1$  bepaald wordt.

Niettemin gelukt het op zeer bevredigende wijze (§ 70) den stroom die van het eene gebied naar het andere gaat en die door de toeneming van  $H_1$  per tijdseenheid gemeten wordt, als evenredig met het hoogteverschil voor te stellen. Bij hun wisselingen hebben nl. de stroom en het hoogteverschil zoo goed als dezelfde phase; het verschil in phase is niet meer dan een paar graden.

Dit blijkt het gevolg hiervan te zijn, dat de verhouding 0,123 der amplituden 5,8 en 47 van  $H_1$  en  $H_2$  bijna gelijk is aan den cosinus van het phaseverschil tusschen beide hoogten ( $\cos 84^\circ = 0,104$ ), dat dus de weerstanden juist zoo groot zijn dat zij op den weg van  $P$  naar  $Q$  de amplitude in de door dien cosinus bepaalde reden doen afnemen. Men kan gemakkelijk omstandigheden bedenken, onder welke de stroom en het

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 8.

verschil  $H_2 - H_1$  onderling een zeer merkbaar phaseverschil zouden vertoonen.

Uit een en ander volgt wel dat het aanbeveling verdient de getijbeweging iets nader te onderzoeken, zooals in §§ 41—51 gedaan is, en voor de getijverhooging na de afsluiting de aldus verkregen uitkomst aan te nemen. Daar, zooals reeds gezegd werd, het gevonden getal voor Piaam tot 38 cm meer bedraagt dan in de uitkomst van Dr. LELY begrepen is, komt men waarschijnlijk dichter bij de waarheid als men zijn eindcijfer voor deze plaats met 38 cm verhoogt, waardoor het op 108 cm komt.

Een dergelijke redeneering kan men ook voor de andere plaatsen langs de Friesche kust volgen. Vervangt men voor Zurig de waarde  $a \times 41 =$  ruim 6 cm door de in § 47 vermelde 35 cm, dan wordt de in § 75 gevonden verhooging van 42 cm met 29 cm verhoogd en komt dus op 71 cm.

Voor Harlingen is  $a \times 41 =$  ruim 4 cm; § 47 geeft 25 cm, dus 21 meer; de 33 cm verhooging van § 75 zou zoodoende op 54 komen.

§ 80. *Opmerkingen over de gevonden uitkomsten.* Bij de behandeling van het vraagstuk, welke methode men ook volge, is een groote moeilijkheid hierin gelegen, dat men tot hetgeen bij hevigen storm zal gebeuren, moet besluiten uit waarnemingen onder rustiger omstandigheden of waarbij althans de invloed van den wind zich nog niet ten volle heeft doen gevoelen. Bij de bespreking der eerste methode is er reeds op gewezen dat in de opwaaiing bij zeer groote windsterkten een element van onzekerheid ligt, en evenzoo zal de toepassing der derde methode op het bezwaar stuiten dat onze kennis van den bewegingstoestand en van de weerstanden bij de groote in het geval van een storm voorkomende snelheden veel te wenschen laat.

Iets dergelijks is het dat bij de methode van Dr. LELY bij het trekken der eindconclusies aanmerkelijk wordt geëxtrapoleerd. Om dit in te zien behoeft men slechts te bedenken dat de waarde van den coëfficiënt  $a$  gevonden wordt door de verschillen der in tabel 16 (§ 72) voorkomende waarden van  $\Delta - k_n/k_7 y_r$  door de overeenkomstige verschillen der waarden van  $h$  te deelen. Neemt men b.v. den eersten en den derden regel der derde groep, dan vindt men een verschil in waarden van  $h$  van 70,2 en een verschil in de waarden van  $\Delta - k_n/k_7 y_r$ , dat voor Hindeloopen 39,7 en voor Stavoren 55,3 bedraagt. Dit geeft voor de eerste plaats  $a = 0,57$  en voor de tweede  $a = 0,79$ .

In werkelijkheid zijn beter betrouwbare waarden van den coëfficiënt door doelmatige combinatie van al de waarnemingen verkregen, maar een blik op de tabel doet zien, dat de uitkomsten op verschillen van  $h$  berusten die hoogstens ongeveer 80 cm bedragen. Om de gezochte verhooging te vinden is dan naderhand  $a$  vermenigvuldigd met een grootte die voor den storm van 1916 173 en voor dien van 1894 181 cm bedroeg. De vergelijking hiervan met 80 cm doet zien hoever men met het extrapoleeren heeft moeten gaan.

## E. BEHANDELING VAN DEN STORMINVLOED NAAR DE DERDE METHODE.

§ 81. *Inleiding tot de behandeling der waterbeweging bij een storm volgens de derde methode.* Al spoedig rees de vraag of men niet, uitgaande van de hydrodynamische bewegingsvergelijkingen, het vraagstuk van de waterbeweging bij storm wat meer in bijzonderheden zou kunnen behandelen dan in het voorgaande gedaan is. De heer KOOPER had reeds uit de hoeveelheid water die thans door de afsluitingslijn naar de Zuiderzee wordt gedreven, een schatting van de te verwachten verhoogingen afgeleid. Zou men nu niet, als men uit de aanwijzingen der rondom de Zuiderzee opgestelde peilschalen de veranderingen der in die zee geborgen hoeveelheid water van uur tot uur heeft leeren kennen, daaruit kunnen besluiten tot de veranderingen, eveneens van uur tot uur, van de hoogten in de Waddenzee, zooals deze bij afsluiting zouden zijn geweest?

In dezen gedachtengang komt men, al meer en meer vereenvoudigende, tot een vraagstuk dat wel is waar al te zeer van de werkelijkheid afwijkt, maar dat toch als inleiding tot verdere beschouwingen van eenig nut is geweest.

Men kan zich (verg. figuur 36, blz. 153, zonder vooreerst aan een rechthoekigen vorm te denken) de te beschouwen watermassa, de Waddenzee, behalve door haar kusten, begrensd denken door een verticaal vlak  $D$ , gaande door de lijn van den afsluitdijk, en door dergelijke scheidingsvlakken  $G$  aan de zijde der Noordzee; daarbij denke men zich deze laatste vlakken buiten de zeegaten aangebracht, op plaatsen voor welke mag worden aangenomen dat de waterhoogte door het aanbrengen van den afsluitdijk niet zal worden veranderd. Deze plaatsen  $G$  zijn in het vervolg bedoeld, wanneer er van punten in de zeegaten gesproken wordt. De hoogte  $h$  van het water, gerekend van een nulvlak, zoo liggende dat  $h$  steeds klein is ten opzichte van de diepte, zal er een bepaalde functie van den tijd zijn.

Men vatte nu twee stroomingstoestanden in het oog, die door de teekens  $Z$  (open Zuiderzee) en  $A$  (afgesloten) zullen worden onderscheiden. De eerste is de toestand die thans bij open zee in geval van een storm bestaat, de tweede de toestand die bestaan zou hebben als bij afgesloten zee de wind op elk oogenblik overal dezelfde richting en snelheid had gehad als nu en ook de hoogte in de zeegaten dezelfde was geweest. De twee toestanden onderscheiden zich van elkander hierdoor, dat er bij den één een stroom  $S$  door het vlak  $D$  heen, eerst naar de Zuiderzee toe en vervolgens daarvan af gericht, bestaat, terwijl bij den toestand  $A$  geen water door dat vlak vloeit. Wat dien stroom  $S$  betreft, kan men zich voorstellen dat de sterkte ervan op elk oogenblik en voor elk punt van het vlak  $D$  gegeven is.

Waren nu de weerstanden evenredig met de eerste macht der stroom-snelheid en waren ook verder de bewegingsvergelijkingen lineair, zoodat het beginsel der superpositie geldt, dan kon men een derden toestand  $V$  invoeren, die eveneens op zich zelf volgens de wetten der mechanica bestaan kan, en die zoo is dat hij, met  $Z$  samengesteld, juist den toestand  $A$  oplevert. Men kan hem gevoeglijk den „verschiltoestand” noemen; symbolisch uitgedrukt:  $Z + V = A$ , of  $V = A - Z$ .

De verschiltoestand zou door de volgende voorwaarden bepaald worden:

1. Er is geen wind, daar de wind bij de toestanden  $Z$  en  $A$  dezelfde is.

2. Aan de zeegaten is  $h = 0$  (geen verheffing boven het nulvlak), omdat aldaar  $h$  bij de toestanden  $Z$  en  $A$  dezelfde waarden heeft.

3. Door het vlak  $D$  gaat op elk oogenblik een stroom, gelijk en tegengesteld aan dien, welke bij den toestand  $Z$  bestaat. Dan zal nl. bij de bewegingen die door het samenstellen van  $Z$  en  $V$  gevonden worden, geen water door het vlak stroomen, zooals het geval moet zijn.

Men kan zich dus den toestand  $V$  aanschouwelijk maken door zich te verbeelden dat op een of andere wijze, terwijl de hoogte in de zeegaten op 0 wordt gehouden, evenveel water door het vlak  $D$  wordt gedreven, als er in werkelijkheid doorgaat, en wel in tegengestelde richting. Doet men dit met alle nauwkeurigheid, zoodat voor elk tijdsdeel en voor elk deel van het vlak aan de voorwaarde voldaan is, dan zullen de niveauverschillen die men in de Waddenzee teweegbrengt, juist aangeven hoeveel de niveauverschillen in den toestand  $A$  anders zullen zijn dan in den toestand  $Z$ . Zoo zullen de gezochte hoogteveranderingen voor elk punt en voor elk oogenblik bepaald worden.

Vooraf verdient hierbij de aandacht dat bij de gemaakte vereenvoudigende onderstellingen de verschiltoestand en dus ook de gezochte verhoogingen *geheel* door de waterbeweging door de afsluitingslijn heen bepaald worden.

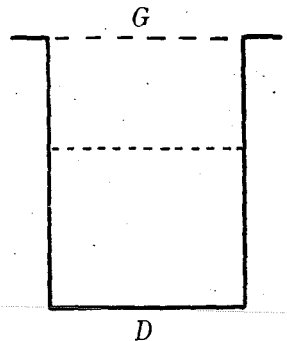
In den toestand  $Z$  is de stroom  $S$  eerst naar de Zuiderzee toe en later, als deze bij het einde van den storm leegloopt, naar buiten gericht.

Daaruit volgt, dat, wanneer de oplossing ook het afloopen van den storm zal omvatten, bij het teweegbrengen van den verschiltoestand eerst water in de Waddenzee moet worden gedreven, en vervolgens daaruit moet worden weggezogen. Het eerste brengt de verhoogingen teweeg waarom het te doen is; het laatste veroorzaakt later voorkomende verlagingen, die echter van geen belang zijn en van welker nadere beschouwing kan worden afgezien.

§ 82. *Verdere vereenvoudiging van het vraagstuk.* De berekeningen kunnen geheel worden uitgevoerd, als men zich nog de volgende vereenvoudigingen veroorlooft.

De Waddenzee wordt vervangen door een rechthoek, waarvan ééne zijde in de afsluitingslijn  $D$  valt, en de twee aangrenzende zijden de kusten zijn, terwijl de vierde zijde  $G$  de grens met de Noordzee is en dus de zeegaten voorstelt.

Het water staat steeds in elk punt van die vierde zijde even hoog, de wind is loodrecht daarop gericht, en langs een lijn evenwijdig aan  $G$  overal even sterk en eindelijk is de stroom  $S$  door de zijde  $D$  gelijkmatig over de lengte daarvan verdeeld. Onder deze omstandigheden zal op een bepaald oogenblik in alle punten van een lijn evenwijdig aan  $D$  en  $G$  de toestand dezelfde zijn, zoowel wat de hoogte van den spiegel als wat de snelheid van het water betreft.



Figuur 36.

Wat de theorie nu voor dit geval leerde, kan ten ruwste als volgt worden uitgedrukt. Van de afsluitingslijn gaat, als de stroom daar gestuit wordt, een verhoogende invloed uit, die zich met een bepaalde snelheid en met steeds afnemende sterkte noordwaarts voortplant en herhaaldelijk aan de vrije zijde van den rechthoek en aan de afsluitingslijn wordt teruggekaatst. Voor verdere bijzonderheden moge naar §§ 147 en 148 worden verwezen en hier moge er alleen nog op worden gewezen dat de ingewikkelde vorm dien de theorie reeds in dit allereenvoudigste geval aanneemt, wel geschikt is om te doen uitkomen dat men zich bij de werkelijk voorkomende omstandigheden met vrij ruwe benaderingen zal moeten tevreden stellen.

Overigens was de belangrijkste uitkomst van deze berekeningen voor een rechthoekige Waddenzee dat een zekere tijd kon worden aangewezen, na welken de invloed van het stuiten van den stroom door den afsluitdijk geheel kan worden verwaarloosd.

Werden de afmetingen van den rechthoek, de diepte van het water, de sterkte van den stroom door de afsluitingslijn en de constante in de lineaire weerstandswet zoo goed mogelijk in overeenstemming met de werkelijkheid gekozen, dan bleek die tijd op een zestal uren te kunnen worden gesteld.

§ 83. *Berekeningen voor een geulennet.* Toen dit laatste gevonden was bestond de mogelijkheid de berekeningen beter aan de werkelijke gedaante der Waddenzee en de configuratie van den bodem aan te passen.

Men kon nl., evenals bij de behandeling der getijden, met een net van geulen werken. Ook daarbij zal de invloed van het stroomen door de afsluitingslijn tot zekeren tijd beperkt blijven en men mag wel aannemen dat die van de zoeven genoemde orde van grootte zal zijn. Zekerheids-halve kan hij nog wat langer, b.v. op een achttal uren worden gesteld.

Is nu  $T_1$  deze aangenomen tijd, en  $T_2$  een zeker tijdsinterval gedurende hetwelk men de verhoogingen wenschte te kennen, dan kan men de periode  $T = T_1 + T_2$  in het oog vatten, samengesteld uit  $T_2$  en een tijd  $T_1$  onmiddellijk daaraan voorafgaande. Wat vóór of na den tijd  $T$  aan de afsluitingslijn plaats heeft, kan op de verhoogingen in het interval  $T_2$  geen

invloed hebben. Stel nu, men kent gedurende den tijd  $T$  den stroom die door de afsluitingslijn gaat als functie van den tijd en heeft hem grafisch door zekere lijn voorgesteld. Men kan dan vóór en na den tijd  $T$ , en zich daaraan en aan elkaar aansluitende, een groot aantal intervallen, alle gelijk aan  $T$ , beschouwen en zich voorstellen dat in elk van die intervallen dezelfde waterbeweging door de afsluitingslijn bestaat als in het eerste interval, datgene nl. waarop het aankomt. De stroom  $S$  wordt dan een periodieke functie van  $T$ , zich over een zeer langen tijd uitstrekkende en door een lijn voorgesteld, die uit de voortdurende herhaling van de lijn waarmede men begon bestaat. Men kan nu, zonder dat de uitkomsten anders worden, met deze periodieke waterbeweging rekenen, daar al wat men vóór en na het eerste interval  $T$  in afwijking van de werkelijkheid heeft aangenomen zonder invloed is op de verhoogingen in het tijdsinterval waarvoor men ze wil leeren kennen.

Volgens het theorema van FOURIER kan nu de zich eindeloos herhalende periodieke functie die den stroom  $S$  voorstelt, worden ontbonden in een standvastig gedeelte en een aantal enkelvoudig periodieke functiën met de perioden  $T$ ,  $\frac{1}{2}T$ ,  $\frac{1}{3}T$ , enz. Men kan de grootte van den eersten term en de amplituden en fasen van al de volgende uit de oorspronkelijke gegevens over de waterbeweging door de afsluitingslijn afleiden.

Zoo wordt het probleem gesplitst in een aantal andere meer eenvoudige, waarvan de uitkomsten ten slotte, op grond van het superpositiebeginsel kunnen vereenigd worden. Bij het eerste dier vraagstukken heeft men een standvastigen stroom door de afsluitingslijn, wat de berekening der verhoogingen al heel eenvoudig maakt, en in de andere vraagstukken kan de verhooging worden gevonden door berekeningen van geheel denzelfden aard als die welke bij de getijden gediend hebben. Zoo zou dan een oplossing van het vraagstuk met inachtneming van alle bijzonderheden worden gevonden.

Althans zou dit het geval zijn als men afzonderlijk voor elke geul die door de afsluitingslijn gesneden wordt, den stroom kende, die door deze lijn heen gaat. In werkelijkheid kan uit de rijzing van het Zuiderzeeniveau slechts de totale hoeveelheid water die in de verschillende zoeven bedoelde geulen stroomt, worden afgeleid, en het was dus noodig de verdeling daarvan over de verschillende geulen op een aannemelijke wijze te bepalen of te schatten.

Inderdaad zijn eenige berekeningen in dezen trant uitgevoerd, maar de ervaring die men daarbij opdeed was niet bevredigend. De toepassing van het superpositiebeginsel leidde tot te groote onnauwkeurigheid en het aanpassen van den coëfficiënt der lineaire weerstandswet aan de werkelijkheid was veel moeilijker dan bij de getijberekeningen. Het bleek meer en meer dat men met de quadratische weerstandswet moest gaan rekenen.

§ 84. *Nauwkeurige oplossing van het vraagstuk.* In beginsel is het niet onmogelijk het vraagstuk exact, met inachtneming van de quadratische weerstandswet, te behandelen en wel volgens een methode die nog altijd eenige overeenkomst met de bij de getijberekening gevolgde vertoont.

Men beschouwe vooreerst een enkel kanaal, blootgesteld aan een windkracht  $F$  die ter vereenvoudiging ondersteld wordt gelijkmatig over de volle diepte verdeeld te zijn en over de geheele lengte dezelfde grootte te hebben. Laat  $h$  de verheffing van het water boven een doelmatig gekozen nulvlak zijn,  $s$  de stroom door de doorsnede,  $h_0$  en  $s_0$  de waarden dezer grootheden aan het begin van het kanaal. Klaarblijkelijk zal de toestand geheel bepaald zijn als men  $h_0$ ,  $s_0$  en  $F$  voor elk oogenblik kent; men stelle zich voor dat deze grootheden door grafische voorstellingen of in tabelvorm als functiën van den tijd zijn gegeven.

De grootheden  $h$  en  $s$  zijn op elk oogenblik functiën van  $x$ , den afstand tot het begin van het kanaal, en kunnen voor niet te groote waarden

daarvan in reeksen naar de opklimmende machten van dien afstand worden ontwikkeld, stel <sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} h &= h_0 - h_1 x + \frac{1}{2} h_2 x^2 - \frac{1}{6} h_3 x^3 + \dots, \\ s &= s_0 - s_1 x + \frac{1}{2} s_2 x^2 - \frac{1}{6} s_3 x^3 + \dots, \end{aligned}$$

waarin de coëfficiënten functiën van den tijd zijn. De beide eersten daarvan,  $h_0$  en  $s_0$  zijn de waarden voor  $x = 0$ , dus, zooals ondersteld werd, bekend, en het blijkt nu dat men met de bewegingsvergelijkingen ook de waarden van alle andere kan leeren kennen. De berekening gaat bij stappen. Uit  $h_0$  vindt men  $s_1$ ; vervolgens  $h_1$  uit  $s_0$  en  $F$ ,  $s_2$  uit  $h_1$ ,  $h_2$  uit  $s_0$  en  $s_1$ , enz. En wél kan men al deze berekeningen voor een zeker aantal oogenblikken uitvoeren. Men leert  $s_1$ ,  $h_1$ ,  $s_2$ , enz. als functiën van den tijd kennen en kan ze achtereenvolgens door kromme lijnen voorstellen, vergelijkbaar met die voor  $h_0$  en  $s_0$  waarvan men uitging. De berekeningen kunnen worden uitgevoerd omdat bij elken stap de reeds bekende grootheden alleen naar den tijd gedifferentieerd behoeven te worden; de waarden der differentiaalquotienten, d. i. der veranderingen per tijdseenheid, kunnen aan de grafische voorstellingen ontleend worden.

Substitueert men, nadat de coëfficiënten zijn berekend, voor  $x$  de lengte  $l$  van het kanaal, dan vindt men de waterhoogte en den stroom aan het einde daarvan. Intusschen kan men alleen dan op deze wijze te werk gaan als de reeksen ook voor de grootste waarde van  $x$  voldoende convergeeren. Het was practisch onmogelijk verder te gaan dan de termen met  $x^3$  en het bleek dat, als het geoorloofd zou zijn de reeksen bij die termen af te breken,  $x$  niet grooter dan een twintigtal kilometers mocht zijn. Heeft een geul een grootere lengte, dan moet zij in een aantal stukken verdeeld worden.

Men vindt dan op de gezegde wijze uit  $h_0$  en  $s_0$  de waarden van  $h$  en  $s$  aan het begin van het tweede deel; hieruit, door voor dit deel een dergelijke berekening uit te voeren als zooeven voor het eerste, de waarden aan het begin van het derde deel en zoo vervolgens.

Het is duidelijk hoe men nu met een net van geulen zou kunnen handelen. Laat  $A_0$ ,  $B_0$ , enz. de aan zee gelegen eindpunten daarvan zijn;  $A_1$ ,  $B_1$ , enz. de plaatsen waar de geulen door de afsluitingslijn worden gesneden. Verder zijn een aantal vertakkingspunten in het oog te vatten. Gegeven zijn, behalve de windkrachten  $F$ , de hoogten  $h_0$  in de punten  $A_0$ ,  $B_0$ , ... en de stroomen  $s_1$  in  $A_1$ ,  $B_1$ , .... Deze laatsten zijn nul bij afgesloten Zuiderzee (geval  $A$ ) en kunnen bij open Zuiderzee (geval  $Z$ ) tot op zekere hoogte uit de waarnemingen worden afgeleid.

Men moet nu beproevenderwijze te werk gaan. Men neemt nl. voor elk der punten  $A_0$ ,  $B_0$ , ... een stroom  $s_0$  aan, en rekent dan, steeds toepassende wat boven voor een enkele geul gezegd werd, het geheele net door. Dan moet aan de voorwaarden voldaan worden, dat in een vertakkingspunt voor elk der daar samenkomende geulen dezelfde hoogte wordt gevonden en dat men voor elk punt  $A_1$ ,  $B_1$ , ... juist tot den stroom  $s_1$  komt, die daar in werkelijkheid bestaat. Slaagt men in deze verschillende opzichten — natuurlijk wordt ook voor elk vertakkingspunt met de continuïteitsvoorwaarde rekening gehouden — dan is het vraagstuk opgelost. Vergelijking van de uitkomsten die men in de gevallen  $A$  en  $Z$  vindt, leert de gezochte verhoogingen kennen.

Intusschen is deze wijze van berekenen, die in het vervolg als de „exacte methode” zal worden aangeduid, uiterst omslachtig, voornamelijk omdat men voor elk zeegat niet slechts een enkele getalwaarde voor den stroom  $s_0$  moet probeeren, maar een geheele reeks van waarden, een geheele kromme lijn die  $s_0$  als functie van den tijd voorstelt, terwijl ook de voorwaarde waaraan moet worden voldaan in de overeenstemming der

<sup>1)</sup> Daar de waarden van  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  enz. zeer goed negatief kunnen uitvallen is door de negatieve teekens niet aan de algemeenheid te kort gedaan. De teekens zijn zoo gekozen omdat dit bij de berekeningen eenig gemak opleverde.

berekende en der waargenomen waarden van  $s_1$  aan de afsluitingslijn, eveneens gedurende het geheele beschouwde tijdsverloop bestaat.

Voor een geulennet dat zich eenigszins aan de werkelijkheid aansluit, kan dan ook van een toepassing der exacte methode geen sprake zijn en moet men wel zijn toevlucht nemen tot een vereenvoudiging.

§ 85. *Vereenvoudiging door de onderstelling van een stationairen toestand.* Men kan zich voorstellen dat de waterhoogten buiten de zeegaten voortdurend zijn, zooals zij op een bepaald oogenblik, dat men ter beschouwing uitkiest, zijn waargenomen en dat hetzelfde geldt van de windkrachten en van de waterbeweging door de afsluitingslijn. Dit laatste zou het geval kunnen zijn als het water dat in de Zuiderzee stroomt, daarin niet werd opgehoopt, maar vrij kon wegvloeien.

Onder deze omstandigheden, als dus alle bepalende grootheden standvastig zijn, zal een toestand ontstaan, waarbij in elk punt ook de waterhoogte en de stroom voortdurend hetzelfde zijn. Ten slotte is nu de volgende weg ingeslagen. Eerst (§§ 86—93) is (berekening I) voor de beide gevallen  $Z$  en  $A$  de stationaire toestand berekend voor een geulennet dat in vrij hooge mate aan de werkelijkheid beantwoordt; daarbij is ook getracht (§ 92) met het niet van elkaar gescheiden zijn der geulen rekening te houden. Voorts zijn eenige kortere berekeningen, eveneens voor een stationairen toestand, uitgevoerd (§§ 94 en 95), met het doel den invloed van de windrichting te leeren kennen.

Vervolgens is (§§ 98—104) voor een sterk vereenvoudigd schema de berekening op twee wijzen uitgevoerd, nl. in de bovengenoemde vereenvoudigende onderstelling en ook exact, met inachtneming van de wijze waarop de hoogte in de zeegaten, de windkrachten en de waterbeweging door de afsluitingslijn van oogenblik tot oogenblik veranderen. Aldus werd gevonden welken invloed bij de geschematiseerde configuratie van den bodem deze veranderingen hebben en in de onderstelling dat in het werkelijke geval het niet-stationair zijn der bepalende grootheden zich in dezelfde mate zal doen gevoelen, werden de correcties bepaald (§§ 105 en 106), die aan de uitkomsten van berekening I moeten worden aangebracht.

In de eerstvolgende §§ 86—88 vindt men een uiteenzetting van de beschouwingen waarvan men zich, als de toestand stationair is, kan bedienen.

§ 86. *De verhoogingen niet geheel bepaald door de waterhoeveelheden die door de afsluitingslijn heen gaan.* De bewegingstoestand in de Waddenzee zou volkomen bepaald zijn als men de volgende gegevens kende:

1. de hoogte van het water in de zeegaten,
2. de door den wind uitgeoefende krachten,
3. de stroom  $S$  door de afsluitingslijn in elk punt daarvan.

Daar, als het derde gegeven vaststaat, de beide eerste nog verschillend kunnen zijn, kan men zich bij open Zuiderzee twee of meer verschillende toestanden  $Z$ ,  $Z'$ ,  $Z''$ , ... voorstellen, bij welke al de stroomen  $S$  door de afsluitingslijn dezelfde zijn. Aan deze toestanden zullen na de afsluiting bepaalde toestanden  $A$ ,  $A'$ ,  $A''$ , ... beantwoorden, die eveneens van elkaar verschillen; het is trouwens duidelijk dat in het overblijvende zeegebied, al naar gelang van de onder 1 en 2 genoemde omstandigheden, verschillende bewegingen kunnen bestaan. Het water kan op allerhande wijzen door het eene zeegat in- en door het andere uitstroomen.

Intusschen wordt, wanneer de bewegingsvergelijkingen lineair zijn en dus het superpositiebeginsel van kracht is, de vergelijking der toestanden  $Z$  en  $A$  eenvoudig.

De verschiltoestand  $V$  dien men dan kan invoeren, is nl. (verg. §§ 81—83) in al de zoeven onderstelde gevallen dezelfde, daar hij alleen van de waterbeweging door de afsluitingslijn afhangt. Symbolisch uitgedrukt wordt dus  $A - Z = A' - Z' = A'' - Z'' = \dots$ , en de hoogteveranderingen, die

bepaald worden door de bij den verschiltoestand bestaande hoogteverschillen, worden dezelfde, ongeacht of men eerst met  $Z$ , dan wel met  $Z'$  of  $Z''$  te doen heeft. Door de invoering van den verschiltoestand worden de boven onder 1 en 2 genoemde invloeden geheel geëlimineerd.

Minder eenvoudig wordt het vraagstuk, als men een quadratische weerstandswet invoert, en dus het superpositiebeginsel moet opgeven. De verhoogingen kunnen in dit geval alleen berekend worden als men omtrent den thans bestaanden toestand  $Z$ , of, wat op hetzelfde neerkomt, omtrent den toekomstigen toestand  $A$  bepaalde onderstellingen maakt.

De berekeningen komen dan nu ook vrijwel hierop neer dat getracht wordt, met behulp van de bewegingsvergelijkingen in de verschijnselen, zoowel voor als na de afsluiting, een inzicht te krijgen. Wel zal tot op zekere hoogte aan het denkbeeld om de twee toestanden  $Z$  en  $A$  met elkander te vergelijken worden vastgehouden; als men afziet van de verandering die de afsluiting in de diepte brengt, geldt zelfs een algemeene stelling (§ 88), die het mogelijk maakt, als eenmaal de tegenwoordige waterbeweging bekend is, daaruit de latere stroomingen en de niveauveranderingen af te leiden, zonder dat daarbij op de hoogte in de zeegaten en op den wind gelet behoeft te worden.

Brengt men de zoeven genoemde verandering der diepte wèl in rekening, dan treden bij de berekening de toestanden  $Z$  en  $A$  meer elk op zich zelf op den voorgrond. De waterhoogten bij den laatsten toestand worden geheel uit de standen in de zeegaten en de windkrachten afgeleid, en de berekeningen voor den toestand  $Z$  hebben vooral de beteekenis dat zij een contrôle op de aangenomen hoogten in de zeegaten en de windkrachten opleveren, de contrôle nl. dat deze in goede overeenstemming zijn met de bekende waterbeweging door de afsluitingslijn. Daarbij is het onvermijdelijk dat de gebrekkige kennis dier bijzonderheden de einduitkomsten min of meer onzeker maakt. Gelukkig mag men hopen dat hun onnauwkeurigheid niet al te groot zal worden. Gold het beginsel der superpositie, dan zouden de verhoogingen geheel onafhankelijk worden van de details waarvan nu sprake is en men kan verwachten dat, daar het beginsel toch met eenige benadering doorgaat, de uitkomsten redelijk nauwkeurig zullen zijn als men bij het kiezen van den toestand  $Z$ , waarvan men uitgaat, niet al te zeer mistast. Trouwens, welken invloed het heeft als men verschillende, bij deze of gene windrichting aannemelijke, onderstellingen maakt, zal opzettelijk worden onderzocht (§§ 94 en 95).

§ 87. *Een algemeene stelling omtrent stationaire stroomingen onder den invloed van den wind.* Het zal goed zijn vooreerst niet aan een net van geulen te denken, maar liever aan het geval dat op de kaart de diepte  $q$  van het water op willekeurige wijze, maar steeds geleidelijk, zonder al te scherpe overgangen, van punt tot punt verandert. De richting van den stroom in een bepaald punt is dan niet, zoals bij van elkander gescheiden geulen, van te voren bepaald, en men moet, wat den wind betreft, met de volle kracht  $F$  die per oppervlakte-eenheid werkt, en niet slechts met den component daarvan in een enkele richting rekening houden.

De grondformules waardoor nu de toestand, als hij stationair is, bepaald wordt, komen, met eenige wijziging, overeen met de vroeger besprokene, die voor een beweging met voorgeschreven stroomrichting, zoals men die in een kanaal heeft, gelden. Vooreerst is er de continuïteitsvergelijking, die uitdrukt dat door een willekeurige op de kaart getrokken gesloten lijn, of liever door het verticale cylindervlak dat door die lijn wordt aangewezen, evenveel water naar binnen als naar buiten gaat. Daarbij komen de vergelijkingen die uitdrukken dat de krachten die op het water werken elkander opheffen.

De krachten van BERNOULLI en CORIOLIS alsmede de centrifugaalkracht worden buiten beschouwing gelaten, met de bedoeling, ze naderhand afzonderlijk in rekening te brengen (§ 108). Wat de andere krachten betreft,

wordt altijd de werking per vlakke-eenheid in rekening gebracht, d.w.z. de werking op een verticale vloeistofkolom die een  $\text{cm}^2$  tot grondvlak heeft. De kracht  $F$  van den wind wordt geacht gelijkmatig over de geheele diepte verdeeld te zijn; de daardoor gemaakte fout zal later worden besproken (§ 109). Voorts wordt onder de snelheid  $v$  een gemiddelde, over de volle diepte genomen, verstaan en voor den weerstand dien het water van den bodem ondervindt, in overeenstemming met (6) van § 31 de uitdrukking

$$\frac{g \varrho}{C^2} v^2 \quad (42)$$

aangenomen.

Is nu in een of ander punt  $P$  van de zeekaart  $PL$  een rechte lijn in willekeurige richting van daar uit getrokken, dan kan men voor elk der werkende krachten den component in de richting  $PL$ , die als de richting  $l$  zal worden aangeduid, nemen. Men vindt dan voor den component van de windkracht

$$F_l = F \cos \vartheta, \quad (43)$$

als  $\vartheta$  de hoek is, dien de windrichting met  $l$  maakt, en voor de kracht die uit het verhang voortvloeit,

$$g \varrho q i,$$

als  $i$  het verhang in de richting  $l$  is. Hiervoor kan men schrijven

$$-g \varrho q \frac{dh}{dl}, \quad (44)$$

waarin  $dh$  de verandering in de hoogte is als men in de richting  $l$  over een afstand  $dl$  voortgaat. Men vindt deze uitdrukking door de kracht per massa-eenheid  $g i$  (§ 30) met de massa  $g \varrho$  der zoeven genoemde waterkolom te vermenigvuldigen.

De componenten (43) en (44) kunnen, naar gelang van omstandigheden, positief of negatief zijn. Hetzelfde is het geval met den component in de richting  $l$  van den weerstand (42), en wel moet, daar de weerstand tegengesteld aan de snelheid gericht is, de gezochte component negatief zijn als de hoek  $\alpha$  dien de snelheid met de richting  $l$  maakt, scherp is, en positief als die hoek stomp is. Dit leidt er toe voor den component te schrijven

$$-\frac{g \varrho}{C^2} |v|^2 \cos \alpha,$$

waarbij het teeken  $|v|$  dient om de absolute grootte van de snelheid aan te wijzen. Daar nu  $|v| \cos \alpha$  de positieve of negatieve component der snelheid in de richting  $l$  is, welke component door  $v_l$  kan worden voorgesteld, kan men voor bovenstaande uitdrukking schrijven

$$-\frac{g \varrho}{C^2} |v| v_l.$$

De voorwaarde dat de krachten elkaar opheffen wordt dus, wat de richting  $l$  betreft, uitgedrukt door

$$-g \varrho q \frac{dh}{dl} + F \cos \vartheta - \frac{g \varrho}{C^2} |v| v_l = 0$$

en zulk een vergelijking kan voor elk punt en voor elke richting  $l$  worden opgesteld. Na deeling door  $-g \varrho q$  komt er

$$\frac{dh}{dl} - \frac{F \cos \vartheta}{g \varrho q} + \frac{1}{C^2 q} |v| v_l = 0.$$

Hieruit kan nu verder een vergelijking worden afgeleid, geldende voor een willekeurige rechte of kromme lijn, die op de kaart van een punt  $P$  naar een punt  $Q$  loopt. Men kan den weg van  $P$  naar  $Q$  in kleine stukken  $dl$  verdeelen, en voor elk daarvan een vergelijking als de bovenstaande opstellen. Elk dezer vergelijkingen vermenigvuldige men met de lengte  $dl$  van het stuk waarop zij betrekking heeft, en daarna telle men al de vergelijkingen bij elkaar op. De som van al de termen  $dh$  is het verschil  $h_Q - h_P$ , als  $h_P$  de hoogte in het beginpunt en  $h_Q$  die in het eindpunt

voorstelt. Verder de sommen door integraalteekens voorstellende, vindt men

$$h_Q - h_P - \frac{1}{gq} \int_{PQ} \frac{1}{q} F \cos \vartheta \, dl + \frac{1}{C^2} \int_{PQ} \frac{1}{q} |v| v_l \, dl = 0,$$

waarbij de weg op welken de vergelijking betrekking heeft, mede is aangewezen. Daar  $gq$  overal dezelfde waarde heeft, en dit ook van de constante van EYTELWEIN zal worden aangenomen konden de factoren  $\frac{1}{gq}$

en  $\frac{1}{C^2}$  voor het integraalteeken worden geschreven. Schrijft men de formule in den vorm

$$h_Q - h_P = \frac{1}{gq} \int_{PQ} \frac{1}{q} F \cos \vartheta \, dl - \frac{1}{C^2} \int_{PQ} \frac{1}{q} |v| v_l \, dl, \quad (45)$$

dan blijkt het hoogteverschil tusschen  $P$  en  $Q$  samengesteld te zijn uit wat men de „opwaaiing” en het „stroomverval” kan noemen. Met de „opwaaiing” alleen zou men te doen hebben als de vloeistof onder den invloed van den wind staande, in rust was. Onder het „stroomverval” van  $P$  naar  $Q$  kan men verstaan het hoogteverschil dat noodig zou zijn om langs de geheele lijn  $PQ$  de weerstanden in de richting dier lijn te overwinnen.

Van belang is ook de gedaante die de vergelijking aanneemt als men in een gesloten kring rond gaat. Dan is nl.  $h_Q = h_P$  en dus

$$-\frac{1}{gq} \int \frac{1}{q} F \cos \vartheta \, dl + \frac{1}{C^2} \int \frac{1}{q} |v| v_l \, dl = 0. \quad (46)$$

Hierbij moge nog worden opgemerkt, dat, indien in den geheelen kring de diepte  $q$  overal even groot is, de factor  $\frac{1}{q}$  vóór het integraalteeken mag worden geplaatst. Daar nu (tenminste bij uniform verdeelden wind en deze is hier steeds in het oog gevat), zooals men gemakkelijk inziet, voor een gesloten weg

$$\int F \cos \vartheta \, dl = 0$$

is, verdwijnt dan de opwaaiing langs den kring; de wind kan het water daarin niet rondrijven. Circulatie door den wind kan slechts bij diepteverschillen plaats hebben (§ 61, *b*). Uit het nul worden van de opwaaiing in een kring, bij overal even groote diepte, volgt verder dat voor twee verschillende wegen tusschen dezelfde punten, van gelijke diepte, de opwaaiingen even groot zijn.

§ 88. *Verband tusschen de stroomen vóór en na de afsluiting.* Het vraagstuk, zooals het nu gesteld wordt, luidt als volgt:

Op het oogenblik waarvoor men de verhoogingen wil leeren kennen, bestaan bij den tegenwoordigen toestand zekere waterhoogten in de zee-gaten en is er op elke plaats een wind van bepaalde richting en sterkte, terwijl er per seconde door elk deel van de afsluitingslijn een bepaalde hoeveelheid water stroomt. Men stelle zich voor dat al deze omstandigheden onveranderd voortbestaan; de stationaire toestand die dan ontstaat is wat  $Z$  genoemd werd.

De toestand  $A$ , dien men hiermede wil vergelijken, is eveneens stationair; het is nl. de toestand die ontstaan zou als, terwijl de dijk was aangebracht, het water in de zeegaten standvastig op de boven bedoelde hoogte werd gehouden en als ook de wind voortdurend zoo was, als zoeven ondersteld werd.

Dit vastgesteld zijnde, kan men voor een willekeurig getrokken gesloten kring tweemaal verg. (46) opstellen, waarbij men moet bedenken dat de diepte  $q$  na de afsluiting min of meer kan zijn veranderd. Ziet men daarvan voorloopig af, dan zou die eerste term in de vergelijking voor het geval  $A$  even groot zijn als voor het geval  $Z$ . Ditzelfde moet dus ook van den laatsten term, van het stroomverval

$$M = \frac{1}{C^2} \int \frac{1}{q} |v| v_l \, dl$$

gelden.

Verder komt men tot een dergelijk besluit voor een lijn die niet gesloten is, maar van één zeegat naar een tweede wordt getrokken, en wel omdat de waterhoogten in de zeegaten door de afsluiting niet zullen veranderen. De slotsom is dus, dat voor elken gesloten kring en voor elke niet gesloten lijn die in zeegaten begint en eindigt, het stroomverval na de afsluiting even groot moet zijn als daarvoor. Dit is de in § 86 aangekondigde betrekking tusschen de waterbeweging vóór en na de afsluiting, waaruit de invloed van den wind geëlimineerd is. Zij blijkt voldoende te zijn om de waterbeweging in den toestand  $A$  te bepalen als die in den toestand  $Z$  gegeven is. Men kan dan nl. eerst, voor elke gesloten lijn en voor elke lijn die twee zeegaten verbindt, de waarde van  $M$  met de in het geval  $Z$  voorkomende stroomsnelheden berekenen en heeft dan vervolgens de snelheden bij den toestand  $A$  zoo te bepalen, dat voor elken kring  $M$  even groot wordt. Bij nadere beschouwing blijkt er slechts één bewegingstoestand te bestaan die aan deze voorwaarde voldoet en bij welken geen water door de afsluitingslijn gaat.

Zijn op de aangegeven wijze de stroomen, zooals zij na de afsluiting zullen zijn, gevonden, dan vindt men gemakkelijk de verhoogingen.

Daartoe behoeft men slechts formule (45) toe te passen op een lijn die van een der zeegaten naar het beschouwde punt loopt, en wel tweemaal, eens voor den toestand  $Z$  en eens voor den toestand  $A$ . Men krijgt dan twee vergelijkingen in welke  $h_P$ , de hoogte in het zeegat, dezelfde waarde heeft, maar  $h_Q$  twee waarden die men als  $h$  (behoorende bij  $Z$ ) en  $h'$  (behoorende bij  $A$ ) kan onderscheiden.

Wordt in het tweede lid, overeenkomstig met hetgeen zooeven gedaan werd, van de verandering der waterdiepte afgezien, dan wordt de eerste term in beide gevallen hetzelfde. In den laatsten term daarentegen zullen de grootheden  $v$  voor den toestand  $A$  door accenten van de overeenkomstige grootheden voor  $Z$  worden onderscheiden. Trekt men ten slotte de vergelijkingen van elkaar af, dan komt er

$$h'_Q - h_Q = \int_{PQ} \frac{1}{C^2 q} |v| v_l dl - \int_{PQ} \frac{1}{C^2 q} |v'| v'_l dl, \quad (47)$$

d. w. z. de verhooging in het punt  $Q$  wordt gevonden door het verschil te nemen voor de waarden die het stroomverval voor en na de afsluiting langs een zelfde lijn van het zeegat naar  $Q$  getrokken heeft. Dank zij de wijze waarop de toestand  $A$  aan den toestand  $Z$  is aangepast, krijgt men voor  $h'_Q - h_Q$  dezelfde uitkomst, onverschillig langs welke lijn men gaat en bij welk zeegat men begint.

Bij de uitvoering der berekeningen is de overeenkomst der aldus op verschillende wijzen gevonden waarden een proef op de som, waarnaar men kan beoordeelen, of dat aanpassen in voldoende mate heeft plaats gehad.

Men ziet aan de vergelijking voor  $h'_Q - h_Q$  dat de afsluiting in het punt  $Q$  een *verhooging* zal teweegbrengen als daarvóór in meerdere mate dan erna het water in de richting van het zeegat naar  $Q$  stroomt; dan zal nl. over het geheel het product  $|v| v_l$  grootere waarden (naar den positieven kant) hebben dan  $|v'| v'_l$ .

Terwijl het bovenstaande bij elke configuratie van den bodem doorgaat, verdient het aanbeveling bij de uitwerking met een geulennet te beginnen. Dit heeft het voordeel dat, terwijl men anders voor *alle* kringen van den aangegeven aard aan de voorwaarden

$$M' = M$$

zou moeten voldoen, nu met de uit geulen bestaande kringen kan worden volstaan.

Intusschen zijn de geulen niet scherp van elkaar gescheiden, wat zich juist bij de hooge stormvloedstanden zal doen gevoelen; het water zal dan vrijelijk in dwarse richting van de eene geul op de andere kunnen overgaan. Daarom is (§ 92) van de voor het geulennet gevonden uitkomsten

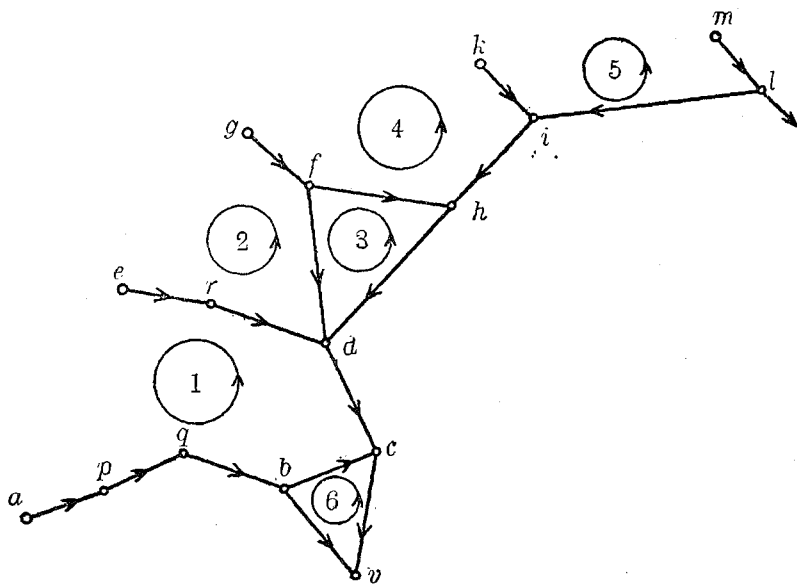
gebruik gemaakt om een zoo goed mogelijk beeld, minder aan dat net gebonden, van de waterbeweging te ontwerpen en de twee aldus gevonden stroombeelden  $Z$  en  $A$  hebben dan gediend, om, met behulp van verg. (45) de meest aannemelijke waarden voor de verhoogingen te bepalen. Men kan hierbij van een „vereffening” spreken, daar scherpe verschillen en plotselinge veranderingen van punt tot punt zijn uitgewischt, terwijl de algemeene aard der bewegingen bewaard is gebleven.

Tot nog toe werd in deze § afgezien van de omstandigheid dat — juist tengevolge van de stormvloedverhoging — in het geval  $A$  de waterdiepten in een deel van de Waddenzee vrij wat grooter zijn dan bij open Zuiderzee. Daarom moet verschil worden gemaakt tusschen  $q'$  en  $q$  en het gevolg hiervan is dat, wanneer men op een bepaalde lijn  $PQ$  voor beide gevallen (45) toepast en de vergelijkingen van elkander aftrekt, de eerste term van het tweede lid *niet* wegvalt. Er blijft een correctie over, die uitdrukking geeft aan het feit, dat de opwaaiing bij afgesloten Zuiderzee door de grootere waterdiepte wat anders (kleiner) is dan bij open Zuiderzee.

In plaats van (47) zal dus moeten worden geschreven:

$$h'_q - h_q = \int_{PQ} \frac{1}{G^2 q} |v| v_l dl - \int_{PQ} \frac{1}{G^2 q'} |v'| v'_l dl - \int_{PQ} \frac{F_l}{g \rho} \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q'} \right) dl. \quad (48)$$

§ 89. *Het aangenomen geulenstelsel.* Het schema daarvan vindt men in figuur 37, waarin  $a, e, g, k$  en  $m$  de eindpunten aan zee voorstellen, terwijl  $b$  en  $c$  in de afsluitingslijn liggen.



Figuur 37.

De geulen of vakken vullen te zamen het geheele gebied; zoo sluiten ook  $qb$  en  $dc$  aan elkander aan. Het is in deze beide geulen, dat bij open Zuiderzee water door de afsluitingslijn stroomt.

Nu was het van het begin af aan de vraag geweest hoe de geheele hoeveelheid water die de Zuiderzee instroomt, zich over het oostelijk en het westelijk deel van de afsluitingslijn verdeelt. Men kan dit uit de peilschaalwaarnemingen niet afleiden, maar kan er een denkbeeld van krijgen door de weerstanden in aanmerking te nemen, die zich verder naar het Zuiden tegen de beweging verzetten. Daartoe zijn de geulen  $bv$  en  $cv$  ingevoerd. De stroomverdeling over deze geulen moet zoodanig zijn, dat ook voor hen de grondvergelijking (45) geldt.

Daar rekening moest worden gehouden met den overgang van water uit  $qbv$  naar  $dcv$  of omgekeerd en daar ongetwijfeld na de afsluiting water langs de noordzijde van den dijk zal kunnen stroomen, werd nog een geul, in het schema door  $bc$  voorgesteld, langs de afsluitingslijn aangenomen. Daaraan werd een lengte van 12 km, iets minder dan de halve

lengte van den dijk, toegekend; de breedte werd op 15 km, de diepte overeenkomstig de plaatselijke omstandigheden op 6 meter gesteld.

Hier moge nog eens worden opgemerkt dat er in de keus der geulen altijd een zekere willekeur is. Bij de zoeven gemaakte onderstelling valt  $bc$  een eind over  $qb$  en  $dc$  heen en de vraag rijst of men daarom niet in geval  $A$  deze laatste geulen met een wat kleinere lengte in rekening had moeten brengen. Men zou geneigd zijn hen met de halve breedte van  $bc$ , d. i. met 7,5 km, te bekorten als  $bc$  over de volle breedte van  $qb$  en  $dc$  reikte, en voor de bekorting b.v. 3 km te rekenen nu  $bc$  nog niet de halve breedte van  $qb$  en  $dc$  bedekt. Die verandering van 3 km zou betrekkelijk klein zijn in vergelijking met de lengte van  $ba$  (38 km) of met den weg  $cdfg$  van  $c$  naar het Vlie (44 km) en men mag dus verwachten dat het weinig verschil zal maken als men met de volle lengte van  $qb$  en  $dc$  tot aan de afsluitingslijn rekent.

Trouwens, de aanpassing aan den toestand die in werkelijkheid nabij een hoek waar twee gebieden elkander ontmoeten, bestaat, zal allicht door de vereffening waarvan in de vorige § gesproken werd, verbeterd worden.

Tabel 19 bevat de afmetingen van alle geulen, waarbij, voor zoover het noodig is, twee of drie naast elkander liggende geulen zijn onderscheiden.

Door de volgorde der letters  $ap$ ,  $pq$ , enz. is telkens de richting aangewezen, die als de positieve wordt gekozen.

TABEL 19.

| Ligging.                                | Lengte.<br>km | Dwarsprofiel.                  |                  |                  | Hoek<br>wind-as<br>geul<br>(ongeveer). |
|---|---------------|--------------------------------|------------------|------------------|--|
|   |               | Hoofdgeul.<br>$b_1 \times q_1$ | $b_2 \times q_2$ | $b_3 \times q_3$ |  |
| Haaksgronden . . . . . $ap$             | 10            | 8,0 × 9,0                      | 2,0 × 20,0       | —                | 70°                                    |
| Binnenkant Heldersche zeegat . . . $pq$ | 13            | 2,0 × 27,0                     | 2,0 × 15,0       | 2,0 × 8,0        | 70°                                    |
| Binnenkant Texelstroom . . . . . $qb$   | 15            | 20,5 × 4,0                     | 1,5 × 20,0       | 1,0 × 10,0       | 0°                                     |
| Wieringer Vlaak . . . . . $bv$          | 15            | 17,5 × 6,25                    | —                | —                | 0°                                     |
| Breezand . . . . . $bc$                 | 16            | 12,0 × 6,0                     | —                | —                | 65°                                    |
| Friesche Vlaak . . . . . $cv$           | 15            | 14,8 × 7,0                     | —                | —                | 55°                                    |
| Zuidoostrak . . . . . $dc$              | 17            | 9,0 × 6,0                      | 1,5 × 16,0       | 10,5 × 4,0       | 30°                                    |
| Eierlandsche zeegat . . . . . $er$      | 8,5           | 1,5 × 10,0                     | 2,5 × 6,0        | 4,0 × 1,0        | 30°                                    |
| Waardgronden . . . . . $rd$             | 12            | 14,0 × 3,5                     | 2,0 × 8,0        | —                | 30°                                    |
| Inschot-Vliestroom . . . . . $fd$       | 19            | 1,3 × 18,0                     | 9,7 × 4,0        | 2,0 × 9,0        | 20°                                    |
| Buitengronden Vlie . . . . . $gf$       | 9             | 11,0 × 9,0                     | 2,0 × 18,0       | —                | 0°                                     |
| Meepen . . . . . $fh$                   | 14            | 1,0 × 16,0                     | 2,0 × 9,0        | 5,0 × 4,0        | 40°                                    |
| Vlakte van Oosterbierum . . . . . $hd$  | 16            | 4,0 × 6,5                      | 6,0 × 3,5        | —                | 90°                                    |
| Terschellinger Wad . . . . . $ih$       | 13            | 16,0 × 5,0                     | —                | —                | 105°                                   |
| Amelandsche zeegat . . . . . $ki$       | 14            | 1,2 × 21,0                     | 3,8 × 5,0        | —                | 0°                                     |
| Amelandsche Wad . . . . . $li$          | 19            | 8,5 × 5,5                      | —                | —                | 120°                                   |
| Zeegat van Schiermonnikoog . . . $ml$   | 13            | 11,0 × 5,0                     | 1,5 × 12,0       | —                | 0°                                     |

$b$  in km;  $q$  in meters.

Wat de geulen betreft die uit verschillende andere, naast elkander liggende, zijn samengesteld, moge er nog op worden gewezen, dat bij vroegere berekeningen veelal met een zekere gemiddelde diepte daarvan werd gerekend. Daarbij stuit men echter op een groote moeilijkheid. Bij een bepaald probleem kunnen steeds twee of drie naast elkander liggende geulen door een enkele worden vervangen, maar de diepte die men daaraan moet toekennen, wat men dus voor de „gemiddelde diepte” moet nemen, hangt van den aard van het vraagstuk af. De waarde is anders voor het

geval van een verhangstroom dan voor een zuiveren driftstroom en weer anders voor een stationaire opwaaiing; de te pas komende getallen kunnen zeer goed in reden van 1 tot 2 uiteenloopen <sup>1)</sup>. Daar men bij het nu gestelde vraagstuk niet aanstonds weet welk deel de wind en het verhang in de stroomen hebben, kan men niet vooruit zeggen welke gemiddelde diepte in rekening moet worden gebracht.

Om althans deze bron van onzekerheid uit te schakelen zijn bij de nu volgende berekeningen de naast elkander liggende geulen geheel van elkaar gescheiden gehouden.

§ 90. *De toestand bij open Zuiderzee.* Als grondslag voor de berekeningen zal men het beste de gegevens nemen van een stormvloed die bij afgesloten Zuiderzee zeer hooge standen in de Waddenzee zou hebben veroorzaakt. Als zoodanig komen alleen de stormen van 30/31 Januari 1877 en van 22/23 December 1894 in aanmerking. Bij alle andere stormvloeden, inclusief die van 1825, zouden minder hooge Waddenzeestanden zijn voorgekomen (§ 25).

Daar de gegevens van den storm van 1894 veel vollediger zijn dan die van 1877 is de eerste tot uitgangspunt voor de nu volgende berekeningen gekozen. Later (§§ 111 en 112) zal worden nagegaan op welke wijze met de andere stormen rekening moet worden gehouden.

In tabel 19 is bij het bepalen van de diepten  $q$  reeds gebruik gemaakt van de in 1894 voorgekomen waterhoogten.

Overeenkomstig den toestand bij dien storm (§ 27) werd de totale stroom naar de Zuiderzee op 210 000 m<sup>3</sup> per seconde gesteld en er werd aangenomen dat de wind Noordwest was met een snelheid van ongeveer 16 meter per seconde, overeenkomende met een opwaaiingsconstante (§ 62)

$$\frac{F}{gq} = 10,5.$$

Met de aanwezigheid van de Lauwerszee werd rekening gehouden door aan te nemen, dat in het punt  $l$  een stroom van 12000 m<sup>3</sup> per seconde het systeem verlaat om in de vulling van dien zeeboezem te voorzien. Als straks wordt aangenomen dat die stroom ook bij afgesloten Zuiderzee even sterk is, wordt een fout gemaakt die zóó gering is, dat zij in de verste verte de grenzen der nauwkeurigheid niet bereikt.

Voor de constante  $C$  van EYTELWEIN is, in overeenstemming met wat aan het slot van § 32 is gezegd, in deze, evenals in de volgende stormvloedberekeningen, de waarde van 500 cm<sup>1/2</sup> per sec aangenomen (verg. ook § 114,  $h$ ).

De grondvergelijking voor een geul  $PQ$  volgt uit (45). Bedenkt men dat de grootheden  $\frac{1}{q} F \cos \vartheta$  en  $\frac{1}{q} |v| v_l$  over de geheele lengte van de geul hetzelfde zijn, dan kan men schrijven

$$h_Q - h_P = \frac{l}{gq} F_l - \frac{l}{q} \cdot \frac{|v| v_l}{C^2}.$$

en voert men hier in plaats van de snelheid  $v$  den stroom  $s$  door de volle doorsnede der geul in, die als  $b$  de breedte is, bepaald wordt door

$$s \equiv bqv,$$

dan komt er

$$h_Q - h_P = \frac{l}{gq} F_l - \frac{l}{b^2 q^3} \cdot \frac{|s| s}{C^2}. \quad (49)$$

<sup>1)</sup> Heeft men naast elkander twee geulen met de breedten  $b_1$  en  $b_2$  en de diepten  $q_1$  en  $q_2$ , dan kan men in het eerste geval rekenen met een gemiddelde diepte

$\left( \frac{b_1 q_1^{3/2} + b_2 q_2^{3/2}}{b_1 + b_2} \right)^{2/3}$ , in het tweede geval met  $\frac{b_1 q_1 + b_2 q_2}{b_1 + b_2}$  en in het derde geval met  $\frac{b_1^2 q_1^3 + b_2^2 q_2^3}{b_1^2 q_1^2 + b_2^2 q_2^2}$ . Wanneer b.v., om een uiterste, schoon werkelijk voorkomend, geval te nemen, bij  $q_1 = 16$  meter en  $q_2 = 2$  meter de verhouding van  $b_1$  tot  $b_2$  is als 1 tot 5, worden deze uitdrukkingen resp. 5,53, 4,33 en 12,06 meter.

Daar de stroom de richting van de geul heeft, is in plaats van  $s_l$  geschreven  $s$ , welke grootheid echter zoowel negatief als positief kan zijn. Stelt men ter bekorting

$$h_Q - h_P = h,$$

$$\frac{l}{g \varrho q} F_l = h_w \quad (50)$$

en

$$\frac{l}{b^2 q^3} \frac{|s| s}{C^2} = h_s, \quad (51)$$

dan is

$$h = h_w - h_s. \quad (52)$$

In  $h_w$  en  $h_s$  herkent men wat in § 87 de opwaaiing en het stroomverval genoemd werd.

In de laatste kolom van tabel 19 is voor elke geul de hoek  $\vartheta$  opgegeven, dien zij met de richting van den wind maakt; daaruit kan in ieder geval de waarde van  $h_w$  worden afgeleid. Het is er nu om te doen, waarden van de stroomen  $s$  te vinden, zoodanig dat aan elk vertakkingspunt aan de continuïteitsvergelijking voldaan is, dat de som der stroomen in  $b v$  en  $c v$  210 000 is, dat voorts de met behulp van (49) berekende waarden van  $h$  voldoen aan de voorwaarde dat aan elk vertakkingspunt het water in al de daar samenkomende geulen dezelfde hoogte heeft, (en wel in alle elementaire geulen waaruit elk gebied bestaat) en dat de hoogteverschillen in overeenstemming zijn met de waterstanden die in den vroegen morgen van 23 December 1894, tusschen 3 en 4 uur, werkelijk in de Noordzee en langs de kusten der Waddenzee zijn waargenomen.

Om een stroomverdeeling te vinden die aan al deze voorwaarden voldoet, moet men een aantal kringen in het oog vatten van het soort waarvan in § 88 werd gesproken.

Daarbij komen nu alleen de door geulen gevormde kringen ter sprake, en wel de van elkaar „onafhankelijke” kringen, het kleinste aantal kringen dat men zoo kan kiezen dat men, ze alle doorlopende, door elke geul ten minste éénmaal gaat. Men kan onderscheiden „secundaire kringen” en „hoofdkringen”. Secundair heet de kring dien men beschrijft als men bij naast elkander liggende geulen door de eene heen en door de andere teruggaat.

Zulk een secundaire kring geeft als voorwaarde de betrekking dat aan de uiteinden de waterhoogten in beide elementaire geulen gelijk moeten zijn. Dus, als men bij de twee geulen dezelfde richting als de positieve kiest en als de indices 1 en 2 op de naast elkander liggende geulen betrekking hebben:

$$h_1 = h_2 = h$$

dus

$$h_{s1} = h_{w1} - h$$

of

$$\frac{l}{b_1^2 q_1^3} \frac{|s_1| s_1}{C^2} = \frac{l}{g \varrho q_1} F_l - h.$$

Evenzoo is

$$\frac{l}{b_2^2 q_2^3} \frac{|s_2| s_2}{C^2} = \frac{l}{g \varrho q_2} F_l - h$$

en als er nog een geul naast de eerste twee is,

$$\frac{l}{b_3^2 q_3^3} \frac{|s_3| s_3}{C^2} = \frac{l}{g \varrho q_3} F_l - h.$$

Men kan van bovenstaande betrekkingen gebruik maken om, zoodra men b.v.  $h$  heeft aangenomen, daaruit  $s_1$ ,  $s_2$  en  $s_3$  en ook den totalen stroom  $S$ , die de algebraïsche som van  $s_1$ ,  $s_2$  en  $s_3$  is, af te leiden, of ook omgekeerd uit den totalen stroom tot de waarden van  $h$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  en  $s_3$  te besluiten.

Voor elke geul  $a p$ ,  $p q$  enz. kan een tabel of een grafische voorstelling worden gemaakt, waarin men bij een gegeven  $h$  den bijbehorenden totalen stroom  $S$  kan vinden en omgekeerd. Voor de achter elkander liggende geulen  $a p$ ,  $p q$  en  $q b$  en ook  $e r$  en  $r d$  kunnen deze tabellen worden gecombineerd.

Hoofdkringen zijn er in het schema ten getale van zes, in figuur 37 van § 89 aangeduid, nl.:

- ①  $apqbc dre$ ; ②  $erdf g$ ;  
③  $fd h f$ ; ④  $g f h i k$ , ⑤  $k i l m$  en ⑥  $b v c b$ .

De volgorde der letters kan weer de positieve richting aanwijzen.

Men kan nu als volgt te werk gaan. Bij wijze van probeeren wordt een waarde voor  $S_{ab}$  aangenomen, waaruit met behulp van de tabel of grafische voorstelling voor die geul  $h_{ab}$  wordt afgeleid. Daarna moet een onderstelling worden gemaakt over  $S_{bv}$ , waaruit  $h_{bv}$  en met de continuïteitsvoorwaarde  $S_{bc}$  volgt. Uit deze laatste vindt men  $h_{bc}$ , terwijl  $S_{cv}$  is bepaald door de voorwaarde dat  $S_{bv} + S_{cv} = 210000 \text{ m}^3$  per seconde. In de tabel voor  $cv$  vindt men de bij deze waarde van  $S_{cv}$  behoorende  $h_{cv}$ . Daar  $h_{cb} = -h_{bc}$  en  $h_{vc} = -h_{cv}$  kan men nu voor kring ⑥ de grootheid  $\Sigma h = h_{bv} + h_{vc} + h_{cb}$  opmaken. Hiervoor moet men in dezen gesloten kring (§ 87) nul vinden, wat allicht niet zal uitkomen. Er moet dan een andere waarde van  $S_{bv}$  worden geprobeerd en hiermee moet men voortgaan tot  $\Sigma h = 0$  wordt.

Nu kan uit de continuïteitsvoorwaarde voor  $c$   $S_{ca}$  en daaruit weer  $h_{ca}$  worden gevonden. Men kent dus nu  $\Sigma h$  voor den weg  $abcd$ . Dit aftrekkende van de bekende som voor den kring ① (die gelijk is aan het niveauverschil in de punten  $a$  en  $e$ ) vindt men  $\Sigma h$  voor  $de$  en daaruit den stroom  $S_{de}$ . Zoover gekomen voert men bij wijze van probeeren een waarde voor  $S_{df}$  in; deze geeft  $h$  voor  $df$ , en daar  $\Sigma h$  voor ② gegeven is (niveauverschil tusschen  $e$  en  $g$ ), vindt men  $h$  voor  $fg$  en dus  $S_{fg}$ . Uit de continuïteitsvoorwaarde kan men dan verder  $S_{fh}$  en  $S_{hi}$  afleiden, uit welke stroomen, in verband met wat men reeds voor  $df$  kent, de grootheid  $\Sigma h$  voor den kring ③ wordt gevonden. De waarde die men daarvoor vindt, hangt van de gekozen  $S_{df}$  af, en men verandert deze laatste zoo lang tot men voor ③  $\Sigma h = 0$  vindt. Daarmede zijn dan ook  $S_{fh}$  en  $S_{hi}$  gevonden; de continuïteitsvoorwaarde geeft  $S_{hi}$ , en men kent dus  $\Sigma h$  voor den weg  $gfhi$ . Dit, gecombineerd met  $\Sigma h$  voor ④, geeft  $h$  voor  $ik$ ,

TABEL 20.

|            |           |           |           |            |            |            |           |           |             |        |           |           |
|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|
| Geul       | $ap_9$    | $ap_{20}$ | $pq_{27}$ | $pq_{15}$  | $pqs$      | $qb_4$     | $qb_{20}$ | $qb_{10}$ | $bv_{6,25}$ | $bc_6$ | $cv_7$    | $dc_6$    |
| $F_i: g e$ | 4,0       | 4,0       | 4,0       | 4,0        | 4,0        | 10,5       | 10,5      | 10,5      | 10,5        | 4,4    | 6,0       | 9,0       |
| $s$        | 51,33     | 40,16     | 56,97     | 24,41      | 10,12      | 52,95      | 30,50     | 8,05      | 105,54      | -14,04 | 104,46    | 50,65     |
| $h_w$      | 4,4       | 2,0       | 1,9       | 3,5        | 6,5        | 39,4       | 7,9       | 15,8      | 25,2        | 8,8    | 12,9      | 24,0      |
| $h_s$      | 22,6      | 20,2      | 21,4      | 23,0       | 26,0       | 62,6       | 31,0      | 38,9      | 89,1        | -1,9   | 87,3      | 93,8      |
| $h$        | -18,2     | -18,2     | -19,5     | -19,5      | -19,5      | -23,2      | -23,1     | -23,1     | -63,9       | 10,7   | -74,4     | -69,8     |
| Geul       | $dc_{16}$ | $dc_4$    | $er_{10}$ | $er_6$     | $er_1$     | $rd_{3,5}$ | $rd_8$    | $fd_{18}$ | $fd_4$      | $fd_9$ | $gf_9$    | $gf_{18}$ |
| $F_i: g e$ | 9,0       | 9,0       | 9,0       | 9,0        | 9,0        | 9,0        | 9,0       | 10,0      | 10,0        | 10,0   | 10,5      | 10,5      |
| $s$        | 33,69     | 34,16     | 13,54     | 11,40      | 2,13       | 21,16      | 5,91      | 24,20     | 25,51       | 14,63  | 52,59     | 19,77     |
| $h_w$      | 9,0       | 36,0      | 7,6       | 12,7       | 76,5       | 30,9       | 13,5      | 10,6      | 47,5        | 21,1   | 10,5      | 5,2       |
| $h_s$      | 78,8      | 105,8     | 27,6      | 32,7       | 96,4       | 25,6       | 8,2       | 45,2      | 82,1        | 55,7   | 11,3      | 6,0       |
| $h$        | -69,8     | -69,8     | -20,0     | -20,0      | -19,9      | 5,3        | 5,3       | -34,6     | -34,6       | -34,6  | -0,8      | -0,8      |
| Geul       | $fh_{16}$ | $fh_9$    | $fh_4$    | $hd_{6,5}$ | $hd_{3,5}$ | $ih_5$     | $ki_{21}$ | $ki_5$    | $li_{5,5}$  | $ml_5$ | $ml_{12}$ |           |
| $F_i: g e$ | 7,9       | 7,9       | 7,9       | 0          | 0          | -2,6       | 10,5      | 10,5      | -4,8        | 10,5   | 10,5      |           |
| $s$        | -3,63     | 4,30      | 7,35      | 17,23      | 9,86       | 19,07      | 9,84      | 9,23      | 0           | 17,98  | -5,98     |           |
| $h_w$      | 6,9       | 12,2      | 27,6      | 0          | 0          | -6,8       | 7,0       | 29,4      | -16,6       | 27,3   | 11,4      |           |
| $h_s$      | -1,8      | 3,5       | 18,9      | 43,3       | 43,2       | 5,9        | 4,1       | 26,4      | 0           | 11,1   | -4,8      |           |
| $h$        | 8,7       | 8,7       | 8,7       | -43,3      | -43,2      | -12,7      | 2,9       | 3,0       | -16,6       | 16,2   | 16,2      |           |

$F_i: g e$  in duizendsten centimeters;  $s$  in  $1000 \text{ m}^3$  per sec;  $h_w$ ,  $h_s$  en  $h$  in cm. De index bij de letters die de geul aanduiden geeft de diepte aan (tabel 19).

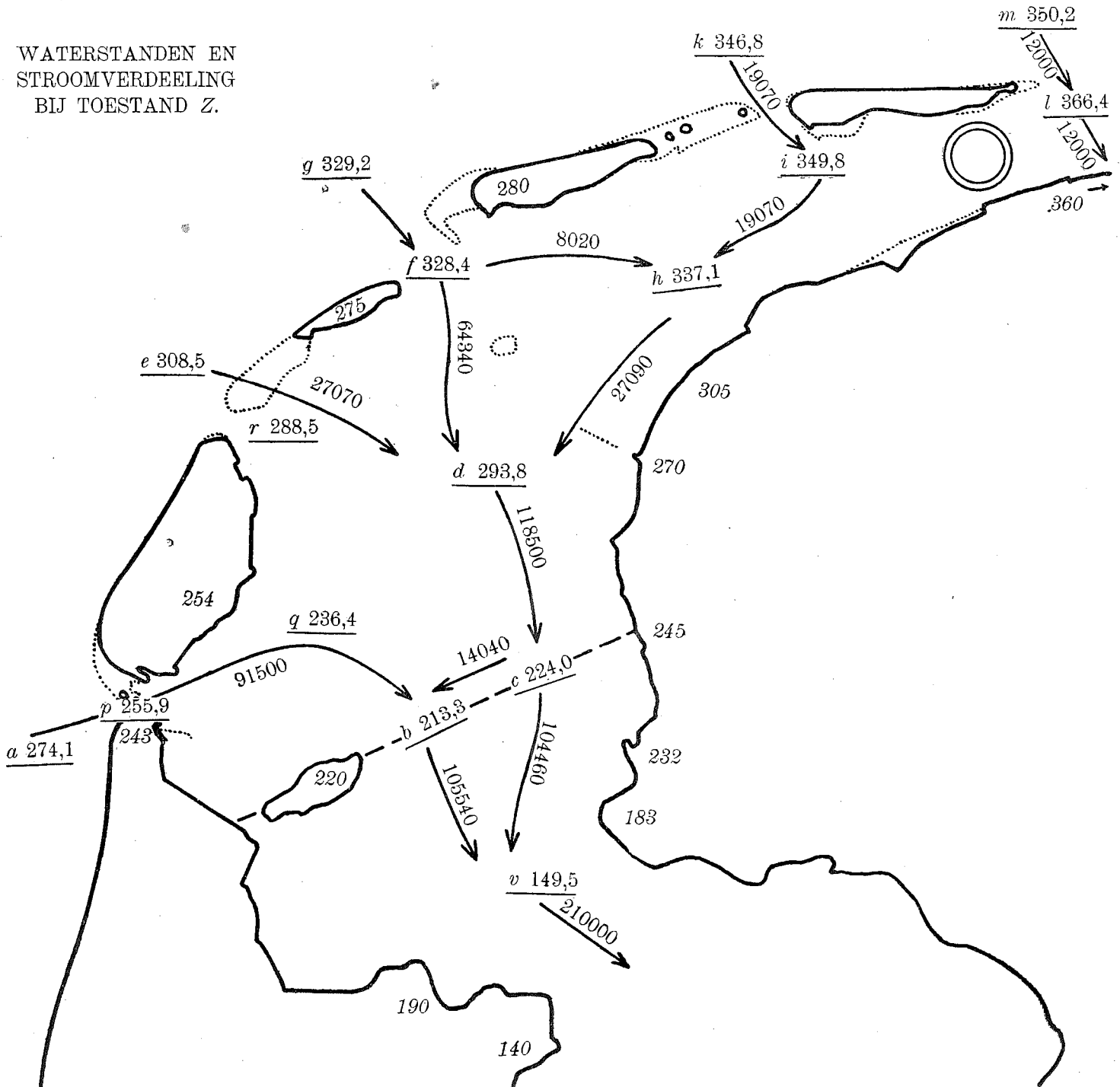
dus  $S_{ik}$  en met inachtneming van de continuïteitsvoorwaarde  $S_{ii}$  en  $S_{im}$ . Ten slotte berekent men uit de laatstgevonden stroomen  $\Sigma h$  voor den kring ⑤. De uitkomst hangt van de keus van  $S_{ab}$  af, waarmede men begonnen is, en die keus wordt nu zoo lang gewijzigd tot voor den laatsten kring het goede getal wordt gevonden.

Daar de Noordzeestanden alleen bij benadering bekend zijn is men betrekkelijk vrij in de keuze van de grootheden  $\Sigma h$  voor die kringen waarvan de beide uiteinden in een zeegat liggen, dus ①, ②, ④ en ⑤. Men kan tevreden zijn wanneer men een stroomverdeling heeft gevonden, waarbij de berekende verschillen tusschen de Noordzeestanden onderling niet meer dan eenige centimeters van de van te voren daarvoor aangenomen waarden afwijken.

Voor de stroomverdeling die ten slotte gekozen is vindt men de voornaamste grootheden in tabel 20 en figuur 38.

Men kan voor elke geul gemakkelijk verifieeren dat aan de verge-

WATERSTANDEN EN  
 STROOMVERDEELING  
 BIJ TOESTAND Z.



Figuur 38.

lijkingen (50), (51) en (52) voldaan is. Ook merke men op dat de som van de stroomen in  $bv$  (105,54) en  $cv$  (104,46) 210 is.

Verder dat, hoewel voor naast elkander liggende geulen  $h_w$  en evenzoo  $h_s$  kan verschillen,  $h$  (behoudens kleine verschillen) dezelfde waarde heeft en dat b.v., zooals het geval moet zijn  $h_{fa} - h_{fn} = h_{na}$ . Het verschil der beide eerste getallen is  $-34,6 - 8,7 = -43,3$  en  $h_{na}$  is voor de beide naast elkander liggende geulen  $-43,3$  en  $-43,2$ .

De grootheid  $\frac{F_i}{g \varrho}$ , die de dimensie van een lengte heeft, is uitgedrukt in duizendsten centimeters. Het gevolg is dat, als men de lengte  $l$  in kilometers en de diepte  $q$  in meters aangeeft,

$$\frac{l}{g \varrho q} F_i$$

een hoogteverschil in centimeters wordt.

Men kan ten slotte van één bepaalden waterstand, b.v. 224 cm + N.A.P. in het punt  $c$  (gebaseerd op de werkelijk waargenomen waterhoogten in Makkum en den Oever) uitgaan en daaruit, met de waarden van  $h$  in de tabel, den waterstand in alle andere knooppunten afleiden. De uitkomsten, ook wat de stroomen aangaat, zijn opgenomen in figuur 38, waar ook alle uit de waarnemingen afgeleide waterhoogten zijn aangegeven (cursieve getallen).

Bij de beoordeeling der uitkomsten moet in aanmerking worden genomen, dat de invloed van aardrotatie, centrifugaalkrachten en krachten van BERNOULLI nog niet in rekening is gebracht en ook dat men een stationairen toestand heeft willen weergeven, zooals die kon zijn bij de op het gekozen tijdstip voorkomende Noordzeestanden. Zooals later (§ 105) zal blijken zouden bij zulk een toestand andere standen in de Waddenzee optreden dan in werkelijkheid op het beschouwde oogenblik voorkwamen. Het verschil is in de buurt van den afsluitdijk van de orde van grootte van een decimeter en het is bevredigend dat in figuur 38 de standen nabij het noordelijk deel van de Friesche kust iets hooger zijn dan de (met cursieve cijfers aangewezen) aldaar waargenomen standen.

De verschillen bij Vlieland en Terschelling en misschien ook bij Harlingen kunnen geheel of gedeeltelijk worden verklaard door locale afwaaiing bij de waarnemingstations.

Houdt men met dit alles rekening, dan komt men tot de conclusie, dat de berekende toestand voor een zoo ingewikkeld vraagstuk op bevredigende wijze de werkelijkheid weergeeft.

Wanneer dit niet het geval geweest zou zijn en dus de berekende waterstanden belangrijk zouden afwijken van wat men op grond van de waarnemingen mag verwachten, dan had men hieruit moeten besluiten dat het gekozen geulenstelsel de Waddenzee niet voldoende kan weergeven.

Bij betrekkelijk geringe afwijkingen zou men ook kunnen denken aan een minder juiste waarde van de opwaaiingsconstante  $F_i$  in eenige geulen, daar de kennis van de windrichting en -snelheid over de geheele Waddenzee tamelijk onvolledig is. Men heeft dan ook voor de geheele Waddenzee dezelfde windrichting en windsterkte aangenomen.

§ 91. *De toestand bij afgesloten Zuiderzee. Bedrag der verhoogingen.* Zooals reeds gezegd werd, moet voor vele geulen na de afsluiting een grootere diepte  $q'$  dan daarvoor ( $q$ ) in rekening worden gebracht (vergelijk de indices van tabel 21 met die van tabel 20). De vermeerdering is gebaseerd op vroeger berekende stormvloedverhoogingen en bedroeg voor  $pq$  40 cm;  $qb$  90;  $bc$  110;  $dc$  90;  $rd$  40;  $fd$  30;  $hd$  10 cm; voor de overige geulen werd de diepte niet veranderd.

Het gebied  $bc$ , dat zich ook ten zuiden van den afsluitdijk uitstrekt, is thans smaller genomen; de breedte is van 15 tot 12 km teruggebracht.

Voor de gewijzigde gebieden moet een nieuwe tabel of grafische voorstelling die het verband tusschen  $h'$  en  $S'$  aangeeft, worden gemaakt. Hierbij kan worden opgemerkt dat door het wegvallen van de ten zuiden

van den afsluitdijk gelegen gebieden  $bv$  en  $cv$  de stroom over de geheele lengte van  $abcd$  dezelfde is en voor dit deel van de Waddenzee dus met een enkele tabel kan worden volstaan.

Bij het zoeken van de goede stroomen begint men weer met beproevenderwijze een stroom in  $a$ , dus  $S'_{abcd}$  aan te nemen. Uit de tabel volgt dadelijk  $\Sigma h'_{abcd}$  en daar voor den geheelen kring ①  $\Sigma h'$  gelijk moet zijn aan  $\Sigma h$  van den toestand  $Z$  (dus aan het hoogteverschil tusschen de Noordzeestanden buiten de Heldersche en Eierlandsche zeegaten) staat ook  $\Sigma h'$  voor  $de$  vast. Het verdere verloop van de berekening is geheel gelijk als dat voor den toestand  $Z$  (§ 90).

Het is er ditmaal om te doen een toestand te vinden die alleen van dien bij open Zuiderzee verschilt door het ontbreken van den stroom over de afsluitingslijn, maar geheel denzelfden wind en dezelfde Noordzeestanden heeft. Daardoor wordt het noodzakelijk, dat in de kringen ①, ②, ④ en ⑤  $\Sigma h'$  volkomen dezelfde waarde heeft als bij open Zuiderzee  $\Sigma h$ . Alleen wanneer aan die voorwaarde voldaan is geldt de berekening bij afgesloten Zuiderzee voor dezelfde Noordzeestanden als die bij open Zuiderzee.

Bij het uitvoeren der berekeningen valt het op, dat kleine veranderingen in den voor de geul  $ab$  aangenomen stroom zeer groote veranderingen in de waarden van  $\Sigma h'$  voor den laatsten kring geven. Een verandering van slechts 15 m<sup>3</sup> per seconde van den stroom in  $a$  (d. i.  $\frac{1}{3}$  ‰) geeft een verschil van 1 centimeter in die grootheid. Dit beteekent dat wijzigingen in den toestand nabij Ameland weinig invloed hebben op hetgeen nabij den afsluitdijk gebeurt.

Van den toestand die het best aan de voorwaarden voldoet vindt men de bepalende grootheden in tabel 21.

TABEL 21.

|        |             |            |             |             |            |            |             |             |            |            |           |            |
|--------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|------------|
| Geul   | $ap_9$      | $ap_{20}$  | $pq_{27,4}$ | $pq_{15,4}$ | $pqs_4$    | $qb_{4,9}$ | $qb_{20,9}$ | $qb_{10,9}$ | $bv$       | $bc_{7,1}$ | $cv$      | $dc_{6,9}$ |
| $s'$   | — 21,86     | — 22,87    | — 30,72     | — 11,24     | — 2,78     | — 8,79     | — 29,60     | — 6,35      | —          | — 44,74    | —         | 22,77      |
| $h'_w$ | 4,4         | 2,0        | 1,9         | 3,4         | 6,2        | 32,2       | 7,5         | 14,4        | —          | 7,4        | —         | 20,9       |
| $h'_s$ | — 4,1       | — 6,5      | — 6,0       | — 4,5       | — 1,7      | — 0,9      | — 25,6      | — 18,7      | —          | — 18,6     | —         | 12,5       |
| $h'$   | 8,5         | 8,5        | 7,9         | 7,9         | 7,9        | 33,1       | 33,1        | 33,1        | —          | 26,0       | —         | 8,4        |
| Geul   | $dc_{16,9}$ | $dc_{4,9}$ | $er_{10}$   | $er_6$      | $er_1$     | $rd_{3,9}$ | $rd_{8,4}$  | $fd_{18,3}$ | $fd_{4,3}$ | $fd_{9,3}$ | $gf_9$    | $gf_{18}$  |
| $s'$   | 1,35        | 20,62      | — 3,05      | 3,82        | 1,78       | 9,88       | — 7,33      | 6,91        | 18,42      | 7,51       | 35,83     | — 0,34     |
| $h'_w$ | 8,5         | 29,4       | 7,6         | 12,7        | 76,5       | 27,7       | 12,9        | 10,4        | 42,2       | 20,4       | 10,5      | 5,2        |
| $h'_s$ | 0,1         | 21,0       | — 1,4       | 3,7         | 67,4       | 4,0        | — 10,9      | 3,6         | 35,4       | 13,7       | 5,2       | 0,0        |
| $h'$   | 8,4         | 8,4        | 9,0         | 9,0         | 9,1        | 23,7       | 23,8        | 6,8         | 6,8        | 6,7        | 5,3       | 5,2        |
| Geul   | $fh_{16}$   | $fh_9$     | $fh_4$      | $hd_{3,6}$  | $hd_{3,6}$ | $ih_5$     | $ki_{21}$   | $ki_5$      | $li_{5,5}$ | $ml_5$     | $ml_{12}$ |            |
| $s'$   | — 5,89      | 1,78       | 6,70        | 5,90        | 3,45       | 6,70       | 2,52        | 8,55        | — 4,17     | 15,46      | — 7,63    |            |
| $h'_w$ | 6,9         | 12,2       | 27,6        | 0           | 0          | — 6,8      | 7,0         | 29,4        | — 16,6     | 27,3       | 11,4      |            |
| $h'_s$ | — 4,7       | 0,6        | 15,8        | 4,8         | 4,8        | 0,7        | 0,3         | 22,7        | — 1,1      | 8,2        | — 7,8     |            |
| $h'$   | 11,6        | 11,6       | 11,8        | — 4,8       | — 4,8      | — 7,5      | 6,7         | 6,7         | — 15,5     | 19,1       | 19,2      |            |

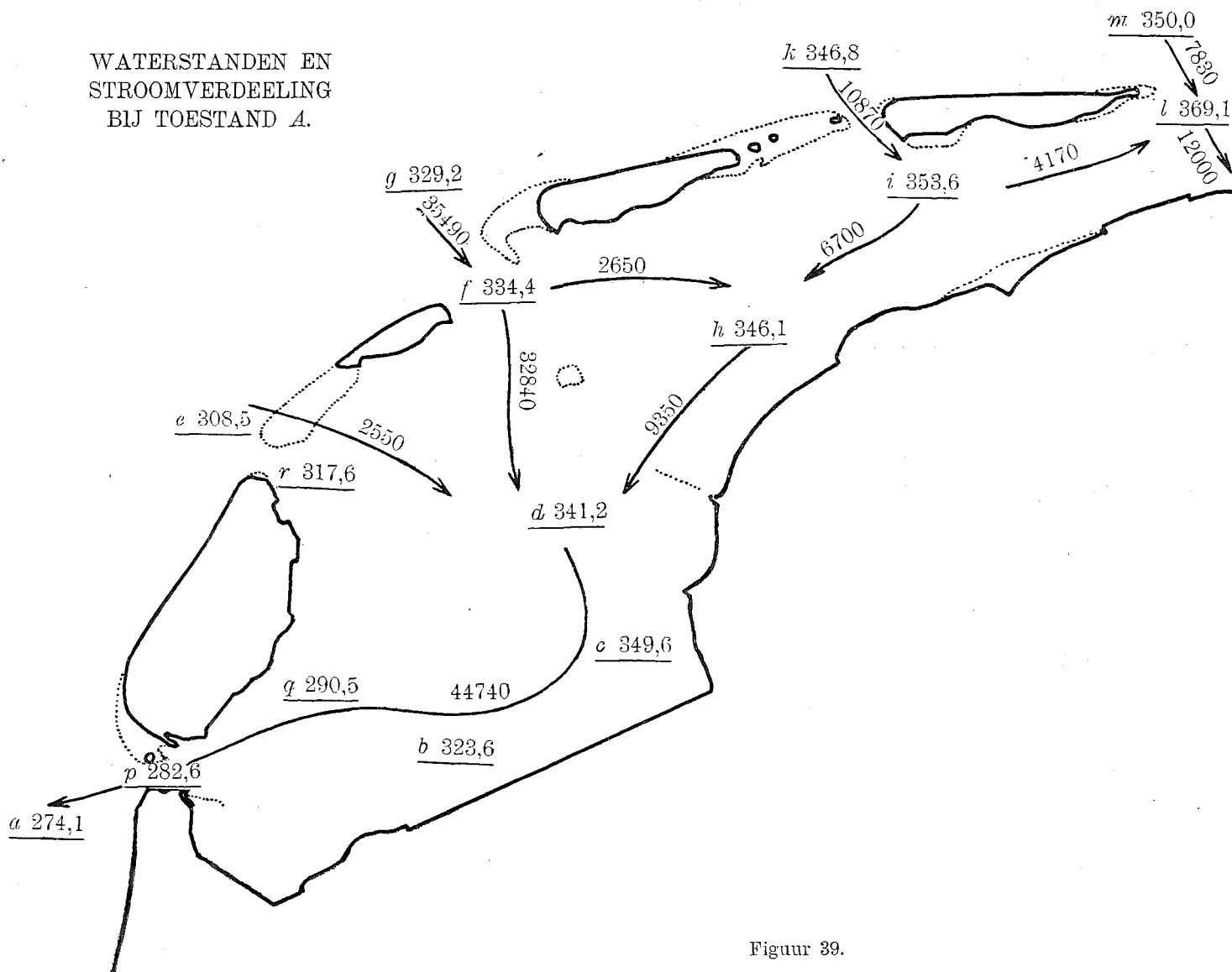
Op dezelfde wijze als bij tabel 20 overtuigt men zich van de juistheid van de verschillende getallen.

Met de gegevens van tabel 21 is figuur 39 geteekend, dat voor afgesloten Zuiderzee dezelfde beteekenis heeft als figuur 38 voor open Zuiderzee. De ingeschreven waterstanden zijn gevonden door uit te gaan van het punt  $a$  buiten het Heldersche zeegat, waarvoor dezelfde hoogte is aangenomen als in figuur 38, en dan de hoogteverschillen  $h'$  in de geulen die men achtereenvolgens doorloopt, in aanmerking te nemen. Vergelijking van de getallen die in de twee figuren op dezelfde plaats staan, doet de ver-

hooging kennen. De gevonden bedragen berusten op de omtrent den toestand  $Z$  aangenomen onderstellingen, maar zij hangen alleen van de *stroomen* af, die bij dien toestand bestaan. Werden, zooals denkbaar is, dezelfde stroomen  $s$  door een andere verdeling van den wind met andere hoogten in de zee-gaten teweeggebracht, dan zouden de getallen  $h_w, h_s, h, h'_w, h'_s$  en  $h'$  anders zijn uitgevallen, maar voor elke geul zou het *verschil* tusschen  $h'$  en  $h$  hetzelfde zijn gebleven en uit zulke verschillen is de verhooging in elk punt samengesteld.

Men kan de berekening waardoor men in figuur 39, van het punt  $a$  uitgaande, de hoogte in de verschillende knooppunten bepaalt, tot de punten  $e, g, k$  en  $m$ , buiten de andere zeegaten, uitstrekken. Men vindt dan, zooals het geval moet zijn, ook op deze plaatsen dezelfde hoogten als in figuur 38, een gevolg van de omstandigheid dat voor elk der kringen  $abcde, edfg, gfhik, kilm$ , de som der waarden  $h'$  van tabel 21 even groot is als de som der waarden  $h$  in tabel 20.

WATERSTANDEN EN  
STROOMVERDEELING  
BIJ TOESTAND A.



Figuur 39.

Alleen voor den laatsten kring is er een verschil van 0,2 cm, dat zich hierin toont dat buiten Schiermonnikoog in figuur 39 350,0 staat en in figuur 38 350,2. Het is duidelijk dat een verschil in zeestand buiten Schiermonnikoog van 2 mm geen waarneembaren invloed op de toestanden in de Waddenzee heeft. Daarom werd de berekening van den toestand  $A$  gestaakt toen op zoo weinig na het goede getal voor den laatsten kring was gevonden.

§ 92. *Bepaling der bewegingstoestanden met inachtneming van stroomen dwars over de geulen.* Thans werd overgegaan tot de vereffening waarover

in § 88 gesproken werd. Zoowel voor open als voor afgesloten Zuiderzee werd voor iedere elementaire geul de snelheid  $v$ , resp.  $v'$  berekend door  $s$ , resp.  $s'$  door het dwarsprofiel te deelen.

Aan de hand van de waarden van  $v$  en  $v'$  werden twee kaartjes, een voor  $Z$  en een voor  $A$ , geteekend, waarin de stroomlijnen met bijgeschreven snelheden werden aangegeven, zooals een en ander aannemelijk kon worden geacht, wel is waar op grond van het voor de geulen gevondene, maar met inachtneming van de omstandigheid dat er meer vrijheid van beweging is dan bij geheel gescheiden geulen het geval zou zijn. Dit zijn de figuren 40 en 41. Bij het teekenen er van werd met inachtneming van de op elk punt bekende diepte  $q$  of  $q'$  zoo goed mogelijk met de continuïteitsvoorwaarde rekening gehouden en niet uit het oog verloren dat in het eene geval 210 000 m<sup>3</sup> per seconde, en in het andere geval geen water door de afsluitingslijn moet gaan.

Het rondloopen in kringen dat in figuur 41 op sommige plaatsen in het oog valt, is een gevolg van het feit dat in tabel 21 de stroom  $s'$  wel eens in naast elkaar liggende geulen tegengestelde richting heeft, iets dat natuurlijk alleen aan het licht kon komen doordat bij de berekening die geulen uit elkaar werden gehouden en niet voor het gebied dat zij samenstellen met zekere gemiddelde diepte werd gerekend.

Voor elke lijn (dezelfde op beide kaartjes) die van een punt  $P$  naar een punt  $Q$  loopt, kan nu het in § 87 gedefinieerde stroomverval

$$\int_{PQ} \frac{1}{C^2 q} |v| v_l dl, \text{ resp. } \int_{PQ} \frac{1}{C^2 q'} |v'| v'_l dl$$

worden berekend, wat in werkelijkheid gedaan werd door met stappen van enkele kilometers voort te gaan; voor elken stap werden  $q$  en  $v$ , resp.  $q'$  en  $v'$ , als constant beschouwd.

In de geulen waar voor den toestand  $A$  een grootere waterdiepte  $q'$  moest worden aangenomen dan in den toestand  $Z$  bestond ( $q$ ) is de opwaaiing in beide gevallen niet even groot. Om de verhooging te leeren kennen moet men dan, zooals aan het slot van § 88 is gezegd, nog de verandering van de opwaaiing

$$-\int_{PQ} \frac{F_l}{g q} \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q'} \right) dl$$

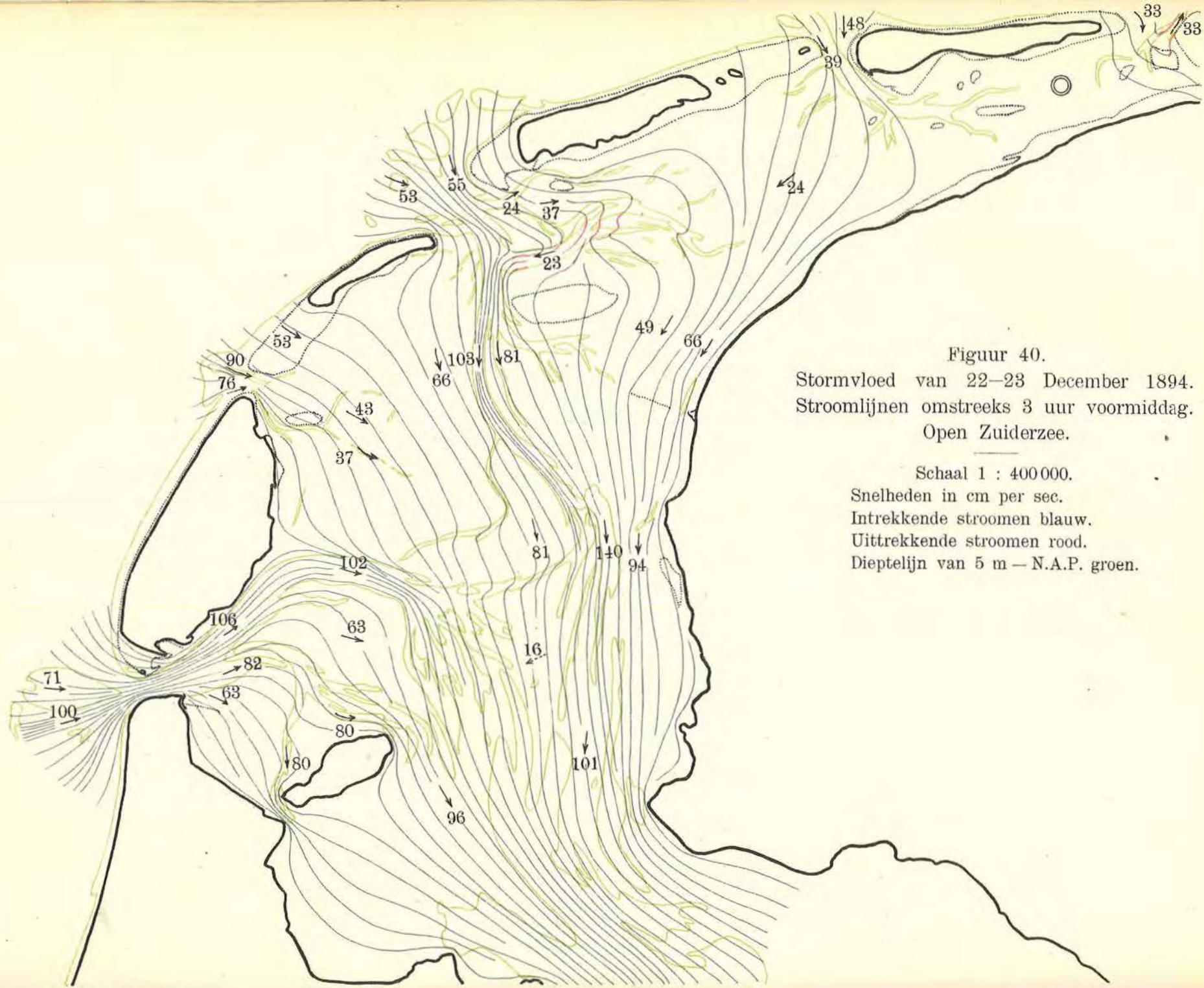
in rekening brengen. Deze correctieterm is over het algemeen niet groot. Kiest men  $P$  buiten het Heldersche of Terschellingsche zeegat en  $Q$  bij Piaam dan bedraagt hij omstreeks drie centimeters wanneer de lijn  $PQ$  door de diepe geulen wordt getrokken om tot een decimeter te stijgen wanneer die lijn over de banken gaat.

Het verschil  $A_{PQ}$  van de twee voor de lijn  $PQ$  gevonden uitkomsten voor het stroomverval, eventueel gecorrigeerd voor de veranderde opwaaiing, is het verschil van de stormvloedverhoogingen in de punten  $P$  en  $Q$ .

Deze berekeningen werden uitgevoerd voor een netwerk van lijnen, dat men in figuur 42 vindt. Daartoe behooren ook lijnen die langs de kusten van de eilanden en het vasteland loopen; dientengevolge kan ten slotte voor elk punt van de kust de stormvloedverhooging worden gevonden, terwijl dit, zoo lang men zich aan de geulen hield, alleen voor punten op de assen daarvan mogelijk was.

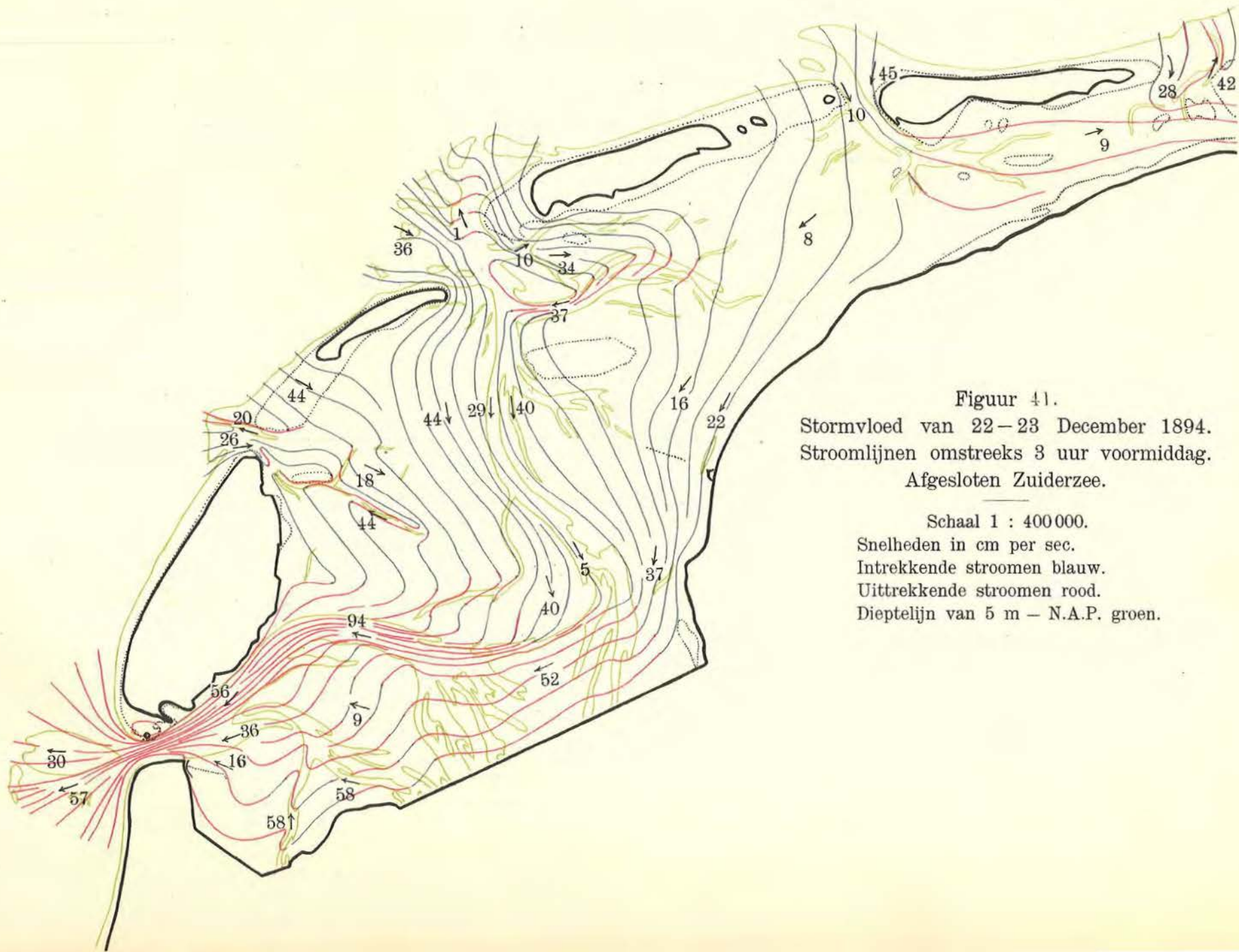
In de figuur wijst voor elke zijde van het net een pijl de als positief aangenomen richting aan en is de waarde van  $A_{PQ}$  aangegeven.

Bij beschouwing dezer getallen blijkt nu echter dat het doel nog niet bereikt is. Want (verg. § 88) er moet voldaan worden aan de voorwaarde dat de som van de getallen  $A_{PQ}$ , elk met het geschikte teeken genomen ( $A_{QP} = -A_{PQ}$ ), nul is voor elken gesloten kring en voor elken kring die in een zeegat begint en eindigt. Dit is niet geheel het geval en men ziet daaruit dat de stroomen voor de toestanden  $Z$  en  $A$ , zooals zij op de figuren 40 en 41 zijn voorgesteld, nog niet behoorlijk bij elkaar passen.



Figuur 40.  
 Stormvloed van 22-23 December 1894.  
 Stroomlijnen omstreeks 3 uur voormiddag.  
 Open Zuiderzee.

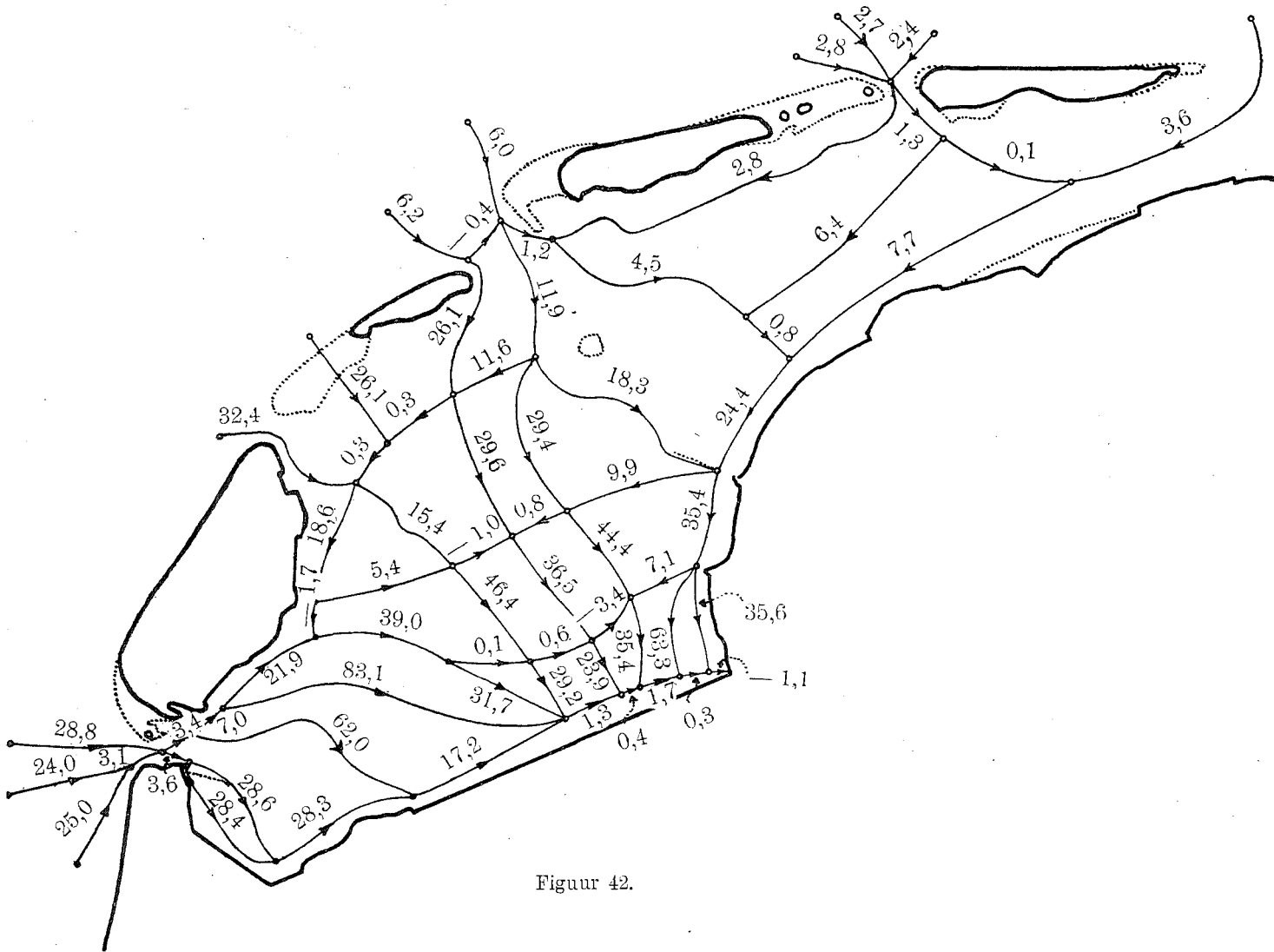
Schaal 1 : 400 000.  
 Snelheden in cm per sec.  
 Intrekkende stroomen blauw.  
 Uittrekkende stroomen rood.  
 Dieptelijn van 5 m — N.A.P. groen.



Figuur 41.  
 Stormvloed van 22—23 December 1894.  
 Stroomlijnen omstreeks 3 uur voormiddag.  
 Afgesloten Zuiderzee.

Schaal 1 : 400 000.  
 Snelheden in cm per sec.  
 Intrekkende stroomen blauw.  
 Uittrekkende stroomen rood.  
 Dieptelijn van 5 m — N.A.P. groen.

Het gelukte intusschen, door kleine wijzigingen in de stroomen de getallen  $A_{PQ}$  zoo te veranderen, dat aan de genoemde voorwaarden wél voldaan is. De nieuwe waarden zijn in figuur 43 opgenomen en men kan nu voor een of ander punt van de kusten de stormvloedverhooging bepalen door voor een lijn die van een zeegat naar die plaats loopt, de som te nemen der waarden van  $A_{PQ}$  die bij de lijn staan, elk met het geschikte

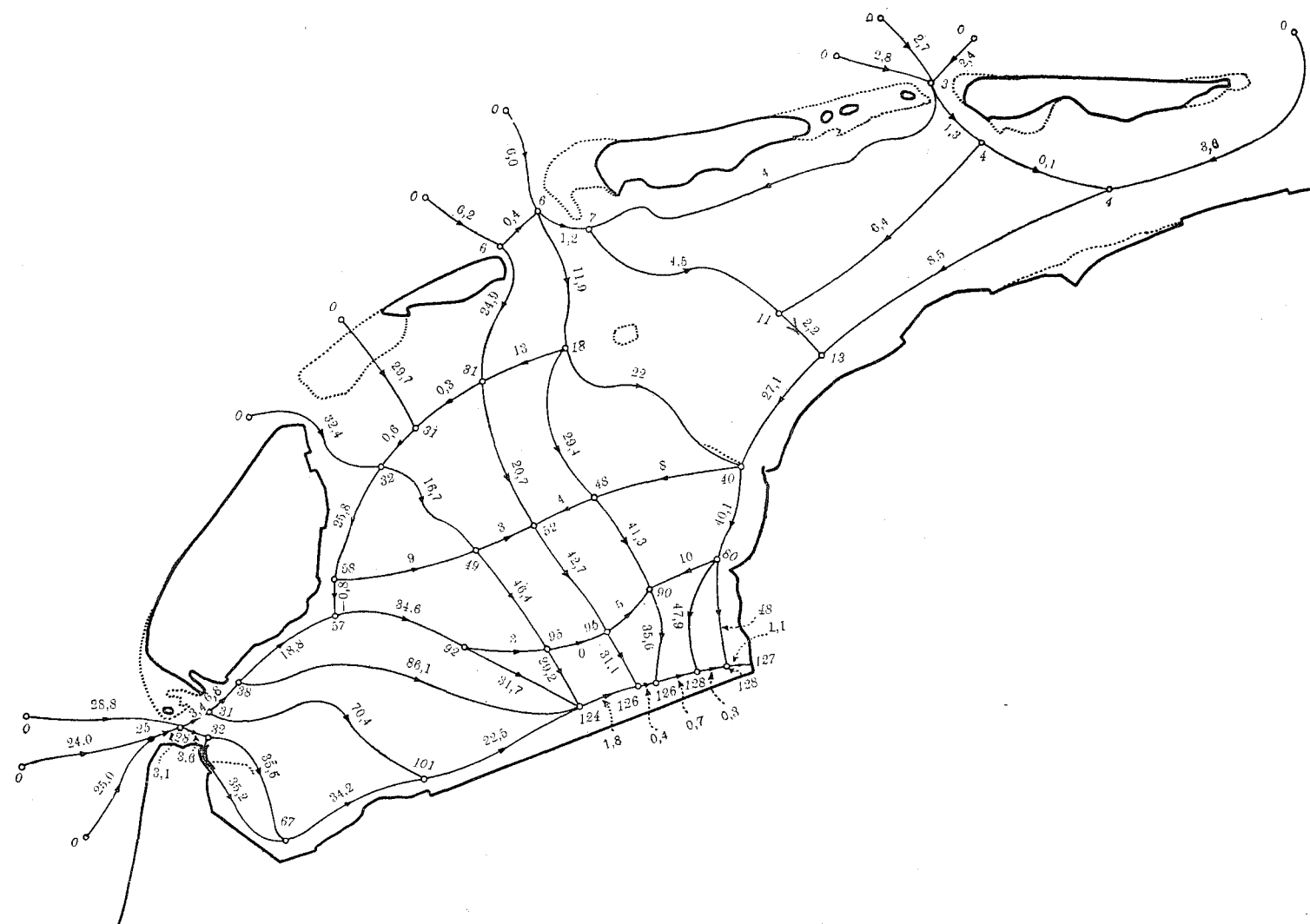


Figuur 42.

teeken genomen. De uitkomst is dezelfde, onverschillig van welk zeegat men uitgaat en welke lijn men volgt.

De zoo berekende verhoogingen zijn in figuur 43 door de cursief gedrukte getallen bij de ontmoetingspunten der lijnen aangegeven. Hieruit kunnen nu verder door interpolatie de verhoogingen voor andere punten der kusten worden afgeleid. De zoo berekende waarden vindt men in kolom 1 van tabel 42 (blz. 200a).

De thans gevonden getallen maken het mogelijk, de grootte van den laatsten term in verg. (28), welke grootte in § 65, *e* noodig was, te schatten. Vergelijking der formules (27) en (49) doet zien dat  $m|s|s$  niet anders is dan het stroomverval, dat later  $h_s$  genoemd is. Ziet men nu in (28) af van de termen die op den toestand bij windstilte betrekking hebben (de termen zonder accenten), welke termen zeker aanmerkelijk kleiner zijn dan de andere, dan is de laatste term van (28)  $h'_{s,PQ(Z)} - h'_{s,PQ(A)}$ , of bij de notatie die in §§ 90 en 91 gebruikt is  $h_{s,PQ} - h'_{s,PQ}$  d.w.z. de verhooging van den waterstand in  $Q$  die door de afsluiting der Zuiderzee zal worden teweeggebracht. Ontleent men deze verhooging aan fig. 38 en 39, dan vindt men voor Helder  $282,6 - 255,9 = 26,7$  en voor Vlieland  $334,4 - 328,4 = 6,0$ . Gaat



Figuur 43.

men daarentegen op figuur 43 af, waar de verhoogingen door de cursief gedrukte cijfers worden aangegeven, dan krijgt men voor Helder 28 en voor Vlieland wat meer dan 6 omdat men om nabij de haven te komen, van het punt 6 af nog een eind langs de lijn moet gaan die zich om de noordoostpunt van het eiland buigt. Men zal dus niet ver van de waarheid zijn als men den gezochten term in (28) voor Helder op 30 cm en voor Vlieland op 15 cm stelt.

§ 93. *Betrouwbaarheid der gevolgde methode.* Strikt genomen had men het vraagstuk als een probleem in twee dimensies (in het horizontale vlak) moeten behandelen. Om het op te lossen zou noodig geweest zijn, vooreerst voor open Zuiderzee een stel van waterhoogten, stroomen en windkrachten te vinden, dat zich in voldoende mate aan de werkelijkheid aansluit en waarbij voor *elke* lijn die een of ander punt  $P$  met een punt  $Q$  verbindt, aan verg. (45) van § 87 voldaan is, en, ten tweede uit den toestand  $Z$  een toestand  $A$  af te leiden, zóó dat, terwijl geen water door de afsluitingslijn gaat, voor *elke* gesloten lijn en voor *elke* lijn tusschen twee zeegaten, het totale stroomverval even groot is als bij den toestand  $Z$  <sup>1)</sup>.

In werkelijkheid kan er bij de onregelmatige configuratie der watermassa geen sprake van zijn, voor *alle* lijnen nauwkeurig aan de voorwaarden te voldoen. Men moet zich tot een beperkte groep van lijnen bepalen; daarbij kan men een voldoende benadering bereiken als het aantal wegen

<sup>1)</sup> Kortheidshalve is bij de navolgende beschouwing afgezien van de door den laatsten term in (48) voorgestelde verandering in de opwaaiing.

niet te klein is en als zij op geschikte wijze over het oppervlak zijn verdeeld.

Bij de beschouwingen van §§ 90 en 91 werd nu het gebied in „geulen”, of, beter gezegd, „vakken” verdeeld, waarbij het essentieele was, dat de stroom ondersteld werd in elk vak overal dezelfde, of zoo goed als dezelfde, richting, die der as van het vak, te hebben. Tot rechtvaardiging van de aangaande den toestand  $Z$  gemaakte onderstellingen diende dat althans voor lijnen die langs de assen der geulen loopen aan verg. (45) met geschikt gekozen waterhoogten en windkrachten voldaan was. Oorspronkelijk was  $bc$  nog niet ingevoerd; het bleek echter wenschelijk, ook nog een weg van de as van  $ab$  naar die van  $dc$  te hebben, en daarvoor diende  $bc$ .

Wat het aanpassen van toestand  $A$  aan toestand  $Z$  betreft, beperkte men zich tot de in § 91 genoemde kringen. Hierbij moet worden opgemerkt dat, wanneer men, bij twee naast elkaar liggende geulen, door de eene heen en door de andere teruggaat, de kring eigenlijk bestaat uit gelijke deelen van beide assen, aan de uiteinden verbonden door lijnen loodrecht daarop. Het stroomverval langs die lijnen is nul, omdat zij een rechten hoek met de stroomrichting maken, en wel voor beide gevallen  $Z$  en  $A$ , want er werd ondersteld dat de stroomrichtingen, door de vakken aangegeven, door de afsluiting niet veranderen, en dat men alleen andere stroomsterkten krijgt.

Met de verdere beschouwingen (§ 92), waarop de fig. 40—43 betrekking hebben, is men veel meer tot het tweedimensionale vraagstuk genaderd. Men zal toegeven dat het aantal lijnen van het gekozen net zoo groot is, dat men er mede tevreden kan zijn als voor deze alle aan de voorwaarden voldaan is. Vergelijking van de figuren 40 en 41 doet zien dat nu de veranderingen, die de afsluiting in de richtingen der stroomen brengt, voor den dag komen.

Verder is, omdat er met veel meer kringen rekening is gehouden, de aanpassing van den toestand  $A$  aan  $Z$  beter dan eerst. Wijst men duidelijkshalve met  $\bar{Z}$  en  $\bar{A}$  de toestanden aan, waarvan het verschil in de definitieve teekening (figuur 43) is aangegeven (nl. het verschil tusschen de vervallen door de getallen bij de zijden der vakken, en de verschillen tusschen de waterstanden door die bij de knooppunten), dan mag men wel zeggen dat de voor de verhoogingen gevonden uitkomsten geheel te vertrouwen zouden zijn als maar vaststond dat de toestand  $\bar{Z}$  voldoende met de werkelijkheid overeenstemt. Dit nu schijnt wel aannemelijk, daar men van den toestand  $Z$ , waarop figuur 38 betrekking heeft, is uitgegaan. Terwijl de algemeene trekken van het beeld bewaard zijn gebleven, zal het door het afronden en vereffenen gewonnen hebben. Het bezwaar dat men in het ten deele over elkaar vallen der oorspronkelijke vakken kon vinden bestaat nu niet meer.

Intusschen zullen de toestanden  $Z$  en  $\bar{Z}$  zeker wel niet *volkomen* overeenstemmen. Een verdeeling van windkrachten door welke toestand  $\bar{Z}$  precies zou kunnen worden gehandhaafd, en zulk een verdeeling kan men zich altijd voorstellen, zou allicht min of meer afwijken van die, welke eerst bij het opstellen van den in tabel 20 weergegeven toestand werd aangenomen. Dat aldus ten slotte de verhoogingen zijn berekend voor een storm die in sterkte en verdeeling van den wind wat verschilt van dien welken men aanvankelijk op het oog had, is geen bezwaar, daar in werkelijkheid dergelijke verschillen van den eenen storm tot den anderen kunnen voorkomen.

§ 94. *Andere berekeningen in de onderstelling van een stationairen toestand.* Alvorens nu wordt nagegaan welke wijzigingen nog in de gevonden getallen moeten worden gebracht, moge melding gemaakt worden van eenige andere berekeningen, die op hetzelfde geulennet als het in figuur 37 voorgestelde betrekking hebben, maar waarbij van eenige vereenvoudigingen werd

gebruik gemaakt. Het doel was daarbij, eenigermate den invloed van de windrichting te leeren kennen en te beoordeelen in hoeverre andere stormen in hun uitwerking van dien van 1894 verschild kunnen hebben, dit laatste zonder voor die andere stormen in zulke lange berekeningen te treden als voor 1894 werden uitgevoerd.

De aangebrachte vereenvoudigingen bestonden vooreerst hierin, dat niet met de naast elkander liggende strooken van ongelijke diepte afzonderlijk werd gewerkt, maar over de geheele breedte een zekere gemiddelde diepte in rekening werd gebracht. Daarvoor werd het gemiddelde genomen, dat in het geval van een verhangstroom zou passen. Bestaat zulk een stroom in een enkelvoudige geul, met de lengte  $l$ , de breedte  $b$  en de diepte  $q$ , dan wordt het verband tusschen het hoogteverschil  $h$  tusschen de uiteinden en den stroom  $s$  gegeven door

$$s = \frac{C h^{1/2} b q^{3/2}}{l^{1/2}},$$

waaruit volgt dat onder den invloed van datzelfde hoogteverschil de totale stroom in een aantal naast elkander liggende enkelvoudige geulen de sterkte

$$s = \frac{C h^{1/2}}{l^{1/2}} \sum b q^{3/2}$$

heeft.

Stelt men

$$\Omega = \frac{l}{C^2 (\sum b q^{3/2})^2},$$

dan is dus  $h = \Omega s^2$ , en dit, of liever

$$h_s = \Omega |s| s,$$

wordt nu als de waarde van het stroomverval ook in de werkelijk voorkomende gevallen, waarbij men met gemengde verhang- en driftstroomen te doen heeft, aangenomen.

In de tweede plaats werd aan de geul  $bc$  in het geval  $A$  dezelfde breedte toegekend als in het geval  $Z$ , zoodat het eerste geval zich alleen door het wegvallen der geulen  $bv$  en  $cv$  van het tweede onderscheidt.

Voorts werd afgezien van de verandering die de afsluiting in de waterdiepte zal brengen. Dientengevolge konden nu (verg. § 88) de toestanden  $Z$  en  $A$  aan elkaar worden aangepast door de voorwaarde dat voor elk der vijf in figuur 37 aangewezen kringen ① tot en met ⑤ het totale stroomverval in beide gevallen hetzelfde is, en kon de verandering der stormvloedhoogte in een of ander punt worden gevonden uit het verschil in de twee gevallen van het stroomverval langs een weg van een der zeegaten naar het beschouwde punt.

Dank zij de aangewezen vereenvoudigingen was de berekening nu zooveel korter geworden, dat zij met verschillende onderstellingen kon worden herhaald. Soms werd daarbij, evenals vroeger, van een toestand  $Z$  uitgegaan; de bepaling van  $A$  geschiedde dan op de in § 91 aangegeven wijze, met dit onderscheid alleen dat voortdurend op de waarde van het stroomverval voor de verschillende wegen en niet op die van het geheele verval werd gelet. Bij andere berekeningen werd begonnen met den toestand  $A$ , en wel met deze of gene circulatie in de overblijvende Waddenzee, zooals die, zonder dat er in bijzonderheden rekenschap van werd gegeven, bij verschillende windrichtingen aannemelijk kon worden geacht. Daar de bovengenoemde vereenvoudigende onderstellingen voor alle gevallen dezelfde waren, kunnen de uitkomsten als onderling vergelijkbaar worden beschouwd.

De aanpassing van een toestand  $Z$  aan een aangenomen toestand  $A$  is een vraagstuk geheel overeenkomende met de omgekeerde aanpassing van  $A$  aan  $Z$  en dat eveneens slechts één oplossing toelaat, als men ook nog de voorwaarden die voor kring ⑥ gelden in aanmerking neemt. Het probleem is geheel bepaald als men voor dezen kring het totale stroomverval kent, dat door de som der opwaaiingen langs de drie zijden bepaald is. Bij

de keus der voor deze opwaaiingen aangenomen getallen werd met de windrichting rekening gehouden.

§ 95. *Uitkomsten in verschillende onderstellingen voor stationaire toestanden verkregen.* De berekeningen waarvan in de vorige § sprake was, zijn uitgevoerd voor vier gevallen, die door de letters *P*, *Q*, *R* en *M* zullen worden onderscheiden, terwijl met *U* de uitvoerige berekening van §§ 89—91 zal worden aangeduid.

*P.* Ten einde den invloed na te gaan, dien de vereenvoudigingen op de uitkomst hebben, werd aangenomen dat de stroomen in den toestand *Z* dezelfde zijn als bij *U*.

*Q.* De stroomen in den toestand *A* werden ondersteld gelijk en tegengesteld te zijn aan die, welke bij berekening *P* waren gevonden. Alleen in het Noordoosten van het gebied, waar een dergelijke stroomverdeeling alleen denkbaar is als men zeer onwaarschijnlijke waarden voor wind en Noordzeestanden aanneemt, is hiervan afgeweken.

*R.* De stroomen bij toestand *A* liggen ongeveer midden tusschen die van *P* en *Q* in; m. a. w. er wordt aangenomen dat er na de afsluiting in de Waddenzee bijna stilstand zal zijn.

*M.* De stroomen bij den toestand *Z* komen ongeveer overeen met die van *P*; alleen is achter Ameland een vrij sterke naar het Westen gaande stroom aangenomen. Deze stroom is zoo sterk gekozen dat hij ook in den bij *Z* aangepasten toestand *A* nog naar het Westen is gericht.

TABEL 22.

| Geul                                | <i>ap</i> | <i>pq</i> | <i>qb</i> | <i>bv</i> | <i>bc</i> | <i>cv</i> | <i>dc</i> | <i>rd</i> | <i>er</i> | <i>fd</i> | <i>gf</i> | <i>fh</i> | <i>hd</i> | <i>ih</i> | <i>ki</i> | <i>li</i> | <i>ml</i> |                   |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| $\Omega$                            | 26        | 27        | 55        | 80        | 99        | 80        | 65        | 255       | 440       | 141       | 18        | 223       | 590       | 162       | 227       | 640       | 152       | $\times 10^{-22}$ |
| <i>P.</i> (wind ongeveer NW).       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |                   |
| <i>s</i>                            | 91,50     | 91,50     | 91,50     | 105,54    | -14,04    | 104,46    | 118,50    | 27,07     | 27,07     | 64,34     | 72,36     | 8,02      | 27,09     | 19,07     | 19,07     | 0         | 12,00     | $\times 10^9$     |
| <i>h<sub>s</sub></i>                | 21,77     | 22,60     | 46,05     | 89,16     | -1,95     | 87,30     | 91,27     | 18,69     | 32,24     | 58,37     | 9,42      | 1,43      | 43,30     | 5,89      | 8,26      | 0         | 2,19      | cm                |
| <i>s'</i>                           | -44,00    | -44,00    | -44,00    | —         | -44,00    | —         | 44,00     | 3,92      | 3,92      | 33,70     | 32,66     | -1,04     | 6,38      | 7,42      | 13,75     | -6,33     | 5,67      | $\times 10^9$     |
| <i>h'<sub>s</sub></i>               | -5,03     | -5,23     | -10,65    | —         | -19,17    | —         | 12,58     | 0,19      | 0,68      | 16,01     | 1,92      | -0,02     | 2,40      | 0,89      | 4,31      | -2,57     | 0,49      | cm                |
| <i>Q.</i> (wind tusschen W en WZW). |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |                   |
| <i>s</i>                            | 118,48    | 118,48    | 118,48    | 103,96    | 14,52     | 106,04    | 91,52     | 25,60     | 25,60     | 41,42     | 53,34     | 11,92     | 24,50     | 12,58     | 11,09     | 1,47      | 9,47      | $\times 10^9$     |
| <i>h<sub>s</sub></i>                | 36,50     | 37,90     | 77,21     | 86,46     | 2,09      | 89,96     | 54,44     | 16,71     | 28,83     | 24,19     | 5,12      | 3,17      | 35,41     | 2,56      | 2,79      | 0,14      | 1,36      | cm                |
| <i>s'</i>                           | 44,00     | 44,00     | 44,00     | —         | 44,00     | —         | -44,00    | -3,90     | -3,90     | -33,70    | -26,70    | 6,00      | -6,40     | -12,40    | -6,40     | -6,00     | 2,00      | $\times 10^9$     |
| <i>h'<sub>s</sub></i>               | 5,03      | 5,23      | 10,65     | —         | 19,17     | —         | -12,58    | -0,39     | -0,67     | -16,01    | -1,28     | 0,80      | -2,42     | -2,49     | -0,93     | -2,30     | 0,06      | cm                |
| <i>R.</i> (wind ongeveer WNW).      |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |                   |
| <i>s</i>                            | 104,96    | 104,96    | 104,96    | 104,10    | 0,86      | 105,90    | 105,04    | 26,06     | 26,06     | 53,40     | 62,26     | 8,86      | 25,58     | 16,72     | 13,28     | 3,44      | 13,44     | $\times 10^9$     |
| <i>h<sub>s</sub></i>                | 28,6      | 29,8      | 60,6      | 86,9      | 0,0       | 89,8      | 71,7      | 17,3      | 29,9      | 40,2      | 7,0       | 1,75      | 38,6      | 4,5       | 4,0       | 0,75      | 2,75      | cm                |
| <i>s'</i>                           | 0         | 0         | 0         | —         | 0         | —         | 0         | 0         | 0         | 0         | 2,50      | 2,50      | 0         | -2,50     | 1,50      | -4,00     | 6,00      | $\times 10^9$     |
| <i>h'<sub>s</sub></i>               | 0         | 0         | 0         | —         | 0         | —         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,01      | 0,14      | 0         | -0,10     | 0,05      | -1,02     | 0,55      | cm                |
| <i>M.</i> (wind ongeveer NW).       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |                   |
| <i>s</i>                            | 91,50     | 91,50     | 91,50     | 105,54    | -14,04    | 104,46    | 118,50    | 27,07     | 27,07     | 62,43     | 64,43     | 2,00      | 29,00     | 27,00     | 19,50     | 7,50      | 19,50     | $\times 10^9$     |
| <i>h<sub>s</sub></i>                | 21,77     | 22,60     | 46,05     | 89,16     | -1,95     | 87,30     | 91,27     | 18,69     | 32,24     | 54,95     | 7,47      | 0,09      | 49,62     | 11,81     | 8,63      | 3,60      | 5,78      | cm                |
| <i>s'</i>                           | -44,07    | -44,07    | -44,07    | —         | -44,07    | —         | 44,07     | 3,60      | 3,60      | 28,76     | 20,14     | -8,62     | 11,71     | 20,33     | 15,21     | 5,12      | 17,12     | $\times 10^9$     |
| <i>h'<sub>s</sub></i>               | -5,05     | -5,25     | -10,68    | —         | -19,23    | —         | 12,62     | 0,33      | 0,57      | 11,66     | 0,73      | -1,66     | 8,09      | 6,70      | 5,25      | 1,68      | 4,46      | cm                |

TABEL 23.

| Berekening. | ①            |               | ②            |               | ③            |               | ④            |               | ⑤            |               | ⑥            |               |
|-------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|             | $\Sigma h_s$ | $\Sigma h'_s$ | $\Sigma h_s$ | $\Sigma h'_s$ | $\Sigma h_s$ | $\Sigma h'_s$ | $\Sigma h_s$ | $\Sigma h'_s$ | $\Sigma h_s$ | $\Sigma h'_s$ | $\Sigma h_s$ | $\Sigma h'_s$ |
| P.          | - 53,73      | - 53,73       | - 16,86      | - 16,86       | 13,64        | 13,63         | - 3,30       | - 3,30        | 6,07         | 6,39          | 3,81         | —             |
| Q.          | 53,72        | 53,72         | 16,23        | 16,23         | - 14,39      | - 14,39       | 2,94         | 2,94          | 1,31         | 1,29          | - 5,59       | —             |
| R.          | 0,1          | 0             | 0,0          | - 0,01        | - 0,15       | - 0,14        | 0,25         | 0,25          | 0,5          | 0,48          | - 2,9        | —             |
| M.          | - 53,73      | - 53,73       | - 11,49      | - 11,49       | 5,24         | 5,23          | - 12,88      | - 12,88       | - 0,75       | - 0,89        | 3,81         | —             |

TABEL 24.

| Berekening. | $p$   | $q$   | $b$    | $c$    | $d$   | $r$   | $f$  | $h$  | $i$  | $l$  | $m$    |
|-------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------|--------|
| U.          | 26,69 | 54,10 | 110,33 | 125,65 | 47,44 | 29,08 | 6,05 | 8,99 | 3,83 | 2,73 | - 0,20 |
| P.          | 26,80 | 54,63 | 111,33 | 128,55 | 49,86 | 31,56 | 7,50 | 8,95 | 3,95 | 1,38 | - 0,32 |
| Q.          | 31,47 | 64,14 | 130,70 | 113,62 | 46,60 | 29,50 | 6,40 | 8,77 | 3,72 | 1,28 | - 0,02 |
| R.          | 28,6  | 58,2  | 119,0  | 119,0  | 47,3  | 29,9  | 7,0  | 8,6  | 4,0  | 2,0  | 0      |
| M.          | 26,82 | 54,67 | 111,40 | 128,68 | 50,03 | 31,67 | 6,74 | 8,49 | 3,38 | 1,46 | 0,14   |

Het geval  $M$  werd aan de andere toegevoegd, ten einde ook rekening te houden met de waterbewegingen, waarop het lid der Staatscommissie, de heer MANSHOLT, de aandacht had gevestigd.

Er moge nog worden opgemerkt dat de gevallen  $P$  en  $U$  ongeveer beantwoorden aan de omstandigheden die bij den storm van 1894 bestaan hebben, en dat die welke bij den storm van 1877 zijn voorgekomen tusschen de toestanden liggen, waarop de berekeningen  $Q$  en  $R$  betrekking hebben.

In tabel 22 vindt men, met de waarden van  $\Omega$  voor de verschillende geulen, de uitkomsten der vier berekeningen; tabel 23 laat zien dat voor de vijf kringen het stroonverval inderdaad bij  $Z$  en  $A$  dezelfde waarden heeft, en tabel 24 bevat de gevonden verhoogingen, alsmede ter vergelijking de waarden die vroeger door de meer gedetailleerde berekening daarvoor werden gevonden.

§ 96. *Formules voor de exacte oplossing van het vraagstuk.* De voornaamste reden waarom de tot nog toe verkregen uitkomsten een verbetering behoeven, is deze, dat in werkelijkheid de toestand niet stationair is. Al de „bepalende grootheden” veranderen met den tijd. Dit geldt van den stroom die door de afsluitingslijn gaat, van de kracht van den wind en van de Noordzeestanden buiten de zeegaten; deze laatste zullen reeds door de getijwerking veranderen, waarbij nog komt, dat ook de kracht waarmee de storm het water naar de kusten drijft, het verwijderde windeffect, niet constant is.

In § 84 werd reeds in beginsel aangegeven hoe men te werk kan gaan om een nauwkeurige oplossing te vinden. Voor elke geul gelden vergelijkingen van den vorm

$$\frac{\partial s}{\partial x} + \dot{h} = 0 \quad (53)$$

$$\dot{s} = -\alpha \frac{\partial h}{\partial x} - \beta |s| s + \frac{1}{\rho} F, \quad (54)$$

als men onder  $s$  den stroom per eenheid van de breedte verstaat, onder  $F$  de per oppervlakte-eenheid werkende windkracht en differentiaalquotienten van den tijd door stippen aanduidt.

De coëfficiënten  $\alpha$  en  $\beta$  hebben de waarden

$$\alpha = g q \quad (55)$$

$$\beta = \frac{g}{q^2 C^2}; \quad (56)$$

als alle grootheden in *C.G.S.*-eenheden worden uitgedrukt kan  $q = 1$  worden gesteld.

Men zoekt nu een oplossing in den vorm van de in § 84 aangegeven reeksen. Voor men dat doet verdient het aanbeveling in plaats van de in (53) en (54) voorkomende grootheden andere in te voeren, die er door zekere standvastige factoren van verschillen. Stelt men nl., die nieuwe grootheden door strepen boven de letters aanduidende,

$$\bar{x} = \frac{x}{\sqrt{a}}, \quad \bar{s} = \beta s, \quad \bar{F} = \beta F, \quad \bar{h} = \beta \sqrt{a} h,$$

dan worden de vergelijkingen

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{x}} + \bar{h} = 0, \quad (57)$$

$$\dot{\bar{s}} = - \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} - |\bar{s}| \bar{s} + \bar{F}, \quad (58)$$

waarin geen constanten meer voorkomen, die van de afmetingen afhangen.

Is aan het einde van de geul of van het beschouwde deel daarvan  $x = l$ , dan is daar  $\bar{x} = \bar{l}$ , als men

$$\bar{l} = \frac{l}{\sqrt{a}}$$

stelt. Men kan zeggen dat  $\bar{l}$ ,  $\bar{s}$ , enz. de lengte, den stroom enz., in nieuwe eenheden uitgedrukt, voorstellen.

Duidt men nu met een index 0 de waarden aan, die aan het begin der geul ( $x = 0$ ) gelden, en onderstelt men dat  $F$  over de geheele lengte even groot is, dan wordt aan de vergelijkingen voldaan door de reeksen

$$\bar{h} = \bar{h}_0 - h_I \bar{x} + \frac{1}{2} h_{II} \bar{x}^2 - \frac{1}{6} h_{III} \bar{x}^3 + \dots \quad (59)$$

$$\bar{s} = \bar{s}_0 - s_I \bar{x} + \frac{1}{2} s_{II} \bar{x}^2 - \frac{1}{6} s_{III} \bar{x}^3 + \dots \quad (60)$$

waarin, als  $\bar{h}_0$  en  $\bar{s}_0$  op elk tijdstip bekend zijn, de coëfficiënten achtereenvolgens bepaald worden door

$$s_I = \dot{\bar{h}}_0 \quad (61)$$

$$h_I = \dot{\bar{s}}_0 \pm \bar{s}_0^2 - \bar{F} \quad (62)$$

$$s_{II} = \dot{h}_I \quad (63)$$

$$h_{II} = \dot{s}_I \pm 2 \bar{s}_0 s_I \quad (64)$$

$$s_{III} = \dot{h}_{II} \quad (65)$$

$$h_{III} = \dot{s}_{II} \pm 2 s_I^2 \pm 2 \bar{s}_0 s_{II}. \quad (66)$$

Hierbij is ondersteld dat over de volle lengte die men in het oog wil vatten,  $s$  hetzelfde teeken heeft. Van de dubbele teekens geldt het bovenste als  $s$  positief, en het onderste als  $s$  negatief is.

Zijn de coëfficiënten gevonden, dan worden door de vergelijkingen

$$\bar{h}_l = \bar{h}_0 - h_I \bar{l} + \frac{1}{2} h_{II} \bar{l}^2 - \frac{1}{6} h_{III} \bar{l}^3 + \dots$$

$$\bar{s}_l = \bar{s}_0 - s_I \bar{l} + \frac{1}{2} s_{II} \bar{l}^2 - \frac{1}{6} s_{III} \bar{l}^3 + \dots$$

de hoogte en de stroom aan het einde bepaald.

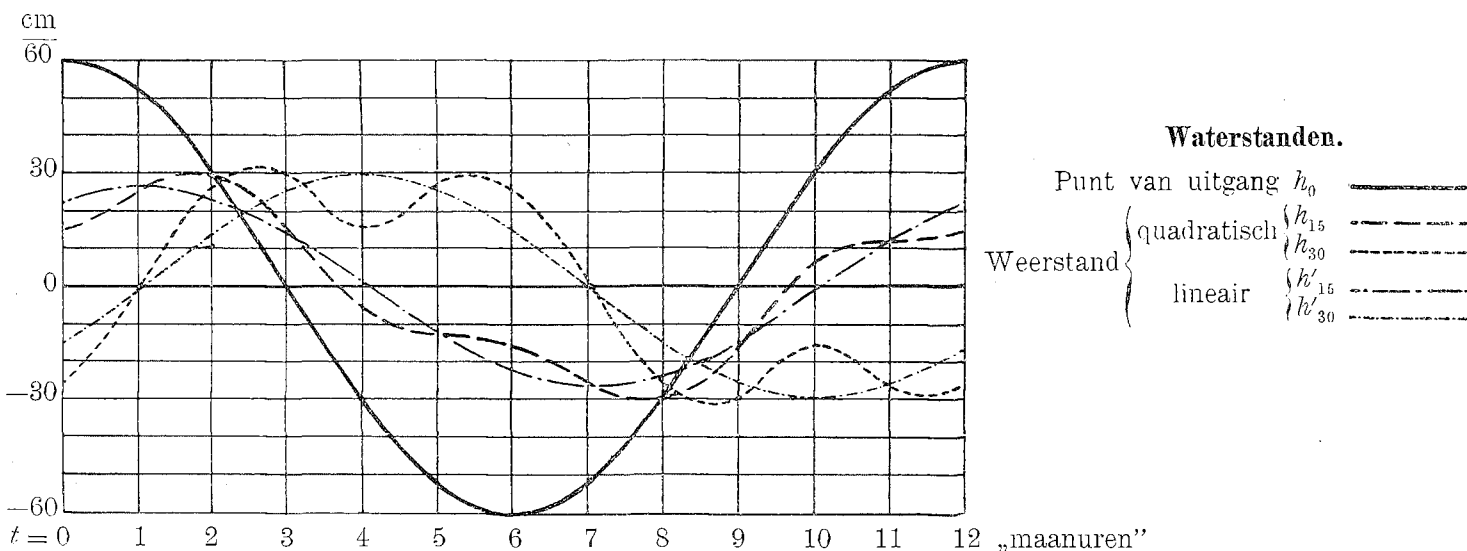
De berekening wordt nu uitgevoerd voor een zeker tijdsinterval, of liever voor een aantal even ver (en niet te ver) van elkander liggende tijdstippen  $t_1, t_2, t_3$ , enz. binnen dat tijdsinterval. Stel, men kent voor elk van die oogenblikken  $\bar{h}_0, \bar{s}_0$  en  $\bar{F}$ . Daaruit kan men  $\dot{\bar{h}}_0$  en  $\dot{\bar{s}}_0$  afleiden, hetzij door de waarden van  $\bar{h}_0$  en  $\bar{s}_0$  grafisch voor te stellen en aan de kromme lijn een raaklijn te trekken, hetzij door gebruik te maken van de omstandigheid dat, indien  $t', t'', t'''$  drie dicht bijeenliggende oogenblikken zijn, waarvan het tweede midden tusschen de andere ligt, het differentiaalquotient van een functie op den tijd  $t''$  bij benadering kan worden gevonden door het verschil der waarden, die zij op de oogenblikken  $t'$  en  $t'''$  hebben, door  $t''' - t'$  te deelen. Meetkundig uitgedrukt: in de grafische voorstelling kan de raaklijn in het punt dat aan  $t''$  beantwoordt, evenwijdig geacht worden aan de verbindingslijnen der punten die bij  $t'$  en  $t'''$  behooren.

Men ziet nu aan de vergelijkingen (61) en (62) hoe  $s_I$  en  $h_I$  voor al de gekozen tijdstippen kunnen worden bepaald, zoodat men, als men wil, ook den loop dezer grootheden grafisch kan voorstellen. Zij kunnen op hun beurt naar den tijd gedifferentieerd worden, en zoo kan men verder gaan.

Met het oog op de lengte der berekening bleek het wenschelijk niet verder te gaan dan tot de termen met  $s_{III}$  en  $h_{III}$ . Naar de grootte die deze in de reeksen (59) en (60), in vergelijking met de voorafgaande termen krijgen, kon men beoordeelen of de reeksen voldoende convergeeren. Was dit niet het geval, dan moest  $l$  kleiner worden genomen. Na een geul in twee of meer op elkaar volgende deelen gesplitst te hebben kon men op ieder daarvan achtereenvolgens de geschetste berekeningswijze toepassen; de waterhoogte en de stroom, die men voor het einde van één deel heeft gevonden, dienen als uitgangspunt voor de berekening voor het volgende deel. Natuurlijk moet men in acht nemen dat, als twee geulen van ongelijke doorsnede op elkander volgen, de waarden van  $s$  omgekeerd evenredig met hun breedten zijn, terwijl ook de coëfficiënten  $\alpha$  en  $\beta$  verschillen. Dit maakt het noodig, even van  $\bar{h}$  en  $\bar{s}$  tot  $h$  en  $s$ , en dan weer omgekeerd over te gaan.

Een kleine moeilijkheid doet zich voor indien, zooals somwijlen voorkomt, de stroom  $s$  ergens van teeken wisselt. Men zou dan afzonderlijk van het begin der geul tot aan het omkeerpunt moeten rekenen, en vervolgens van het omkeerpunt tot aan het einde. Men kan echter ook, zonder zich om de kentering te bekommeren, de geheele geul doorrekenen en ten slotte een correctie aanbrengen, die in § 158 zal worden aangegeven. In de werkelijk voorkomende gevallen bleek deze correctie van geen belang te zijn. De verklaring daarvan is, dat niet te ver van het omkeerpunt de stroom zwak is. Dientengevolge kan de weerstand zoo klein worden dat het weinig invloed heeft als men hem voor een deel der lengte met het verkeerde teeken in rekening brengt.

§ 97. *Getijberekening volgens de exacte methode.* Om in een voorbeeld te zien wat met de exacte berekeningswijze kan worden gedaan, is zij



Figuur 44.

op een gewoon getij toegepast, en wel voor een kanaal met een diepte van 8 meter. Daarbij werd aangenomen dat aan het begin de door

$$h_0 = 60 \cos n t$$

voorgestelde hoogteveranderingen bestaan en dat aldaar een wisselende stroom van dezelfde phase is (zooals in de zeegaten voorkomt), nl. (stroom per cm van de breedte)

$$s_0 = 6,5 \cdot 10^4 \cos n t.$$

Voor  $n$  werd gesteld

$$n = 1,405 \cdot 10^{-4},$$

overeenvakende met de frequentie van het getij  $M_2$  (§ 41).

Met deze gegevens werden nu voor punten op afstanden resp. van 15 en 30 km van het begin  $h$  en  $s$  (verder onderscheiden als  $h_{15}$ ,  $s_{15}$ ,  $h_{30}$  en  $s_{30}$ ) op de in § 96 aangegeven wijze berekend, waarbij de waarde  $C^2 = 280\,000 \text{ cm/sec}^2$  werd aangenomen (verg. tabel 6, § 45). De stroom en hoogten op dezelfde plaatsen ( $h'_{15}$ ,  $s'_{15}$ ,  $h'_{30}$ ,  $s'_{30}$ ) werden vervolgens ook naar de methode, die vroeger voor de getijberekening was gevolgd, bepaald, d. w. z. door met een lineaire weerstandswet te werken, maar den coëfficiënt daarvan zoo goed mogelijk aan den werkelijken door  $C$  bepaalden weerstand aan te passen (§ 44).

Wat de hoogten betreft vindt men de uitkomsten in figuur 44 grafisch voorgesteld; de vijf lijnen geven de veranderingen van oogenblik tot oogenblik van  $h_0$ ,  $h_{15}$ ,  $h'_{15}$ ,  $h_{30}$  en  $h'_{30}$ . Daar in elk punt van het kanaal de periodiciteit, die aan het begin bestaat, wordt teruggevonden, was het voldoende de lijnen voor één periode van  $M_2$  (op 12 maanuren gesteld) te teekenen.

Men ziet dat, terwijl bij de vroegere (de „lineaire”) berekeningswijze de schommelingen enkelvoudig harmonisch blijven ( $h'_{15}$  en  $h'_{30}$  worden evenals  $h_0$  door sinusoides voorgesteld), de exacte berekening tot een vormverandering der golven bij de voortplanting leidt. Zulk een verandering heeft steeds plaats als de bewegingsvergelijkingen niet-lineair zijn (slot van § 158), zooals zij dat bij een quadratische weerstandswet worden, en inderdaad ontstaan dan ook bij de voortplanting in de Zuiderzee uit het in de zeegaten binnenkomende getij andere golven met kortere periode. De exacte methode zou het mogelijk maken, bij voldoende gegevens, dit verschijnsel in bijzonderheden te berekenen.

Past men de FOURIER-analyse op  $h_{15}$  toe, dan blijkt daarin naast het grondgetij hoofdzakelijk een getij met driemaal kortere periode ( $M_6$ ) te bestaan, terwijl in  $h_{30}$  ook een getij met vijfmaal kortere periode ( $M_{10}$ ) met merkbare amplitude voorkomt.

Intusschen wordt, zooals men ziet, de algemeene gang der verschijnselen ook door de lineaire berekening op bevredigende wijze weergegeven.

Tot nadere vergelijking van de twee methoden kan men nu nog den door de FOURIER-analyse bepaalden  $M_2$ -component in  $h_{15}$  en  $h_{30}$  met  $h'_{15}$  en  $h'_{30}$  vergelijken.

Men vindt

$$h_{15 (M_2)} = 25,8 \cos (nt - 33^\circ, 2); \quad h_{30 (M_2)} = 30,1 \cos (nt - 119^\circ, 8),$$

terwijl men heeft

$$h'_{15} = 26,5 \cos (nt - 32^\circ, 8); \quad h'_{30} = 29,6 \cos (nt - 121^\circ, 1).$$

De overeenkomstige uitkomsten voor de stroomen zijn (met weglating van den factor  $10^4$ )

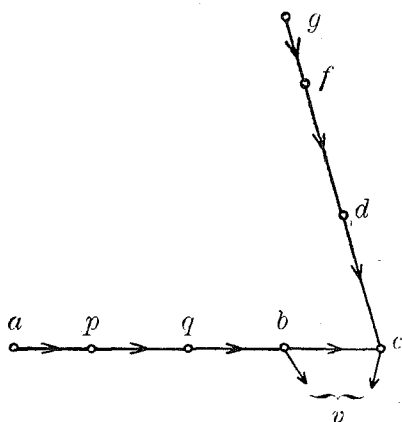
$$s_{15 (M_2)} = 6,43 \cos (nt - 7^\circ, 3); \quad s_{30 (M_2)} = 6,02 \cos (nt - 8^\circ, 3),$$

$$s'_{15} = 6,41 \cos (nt - 7^\circ, 9); \quad s'_{30} = 5,98 \cos (nt - 9^\circ, 0).$$

(Zie ook § 158).

§ 98. *Het voor de exacte berekening aangenomen geulennet.* Dit is voorgesteld in figuur 45, waarin de letters  $a$ ,  $p$ ,  $q$ , enz. ongeveer dezelfde plaatsen aanwijzen als in de vroegere figuren, nl.  $a$  Westgat,  $p$  Nieuwediep (Helder),  $q$  Oude Schild—van Ewycksluis,  $b$  den Oever,  $g$  Noordgat,  $f$  Vlieland (haven)—Terschelling (haven),  $d$  Harlingen,  $c$  Piaam.

Wat de vakken aangaat, komt  $ap$  overeen met het Heldersche zeegat,  $pqb$  met den Texelstroom c. a.,  $bc$  met Breezand en Dooven Balg,  $gf$  met het zeegat van Terschelling (Vlie) en  $fdc$  met het oostelijk deel der Waddenzee.



Figuur 45.

De afmetingen der vakken vindt men in tabel 25, die ook de waarden van  $\alpha$  en  $\beta$  (§ 96) bevat. Onderaan staat de hoek aangegeven die de as der vakken met de richting naar het Noorden (bij  $g f d c$  naar het Westen daarvan afwijkend) maakt.

TABEL 25. Afmetingen van de geulen.

| Gebied:                           | $ap$                   | $pqb$                  | $bc$                   | $fdc$                  | $gf$                   |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Lengte $l$ . . . . .              | $10^6$                 | $3 \times 10^6$        | $1,2 \times 10^6$      | $3,8 \times 10^6$      | $0,8 \times 10^6$      |
| Breedte $b$ . . . . .             | $0,4 \times 10^6$      | $1,5 \times 10^6$      | $1,5 \times 10^6$      | $2,3 \times 10^6$      | $0,8 \times 10^6$      |
| Diepte $q$ . . . . .              | 1750                   | 800                    | 600                    | 700                    | 1250                   |
| $\alpha = gq$ . . . . .           | $1,716 \times 10^6$    | $0,785 \times 10^6$    | $0,589 \times 10^6$    | $0,687 \times 10^6$    | $1,227 \times 10^6$    |
| $\beta = g : (C^2 q^2)$ . . . . . | $0,128 \times 10^{-8}$ | $0,613 \times 10^{-8}$ | $1,090 \times 10^{-8}$ | $0,801 \times 10^{-8}$ | $0,251 \times 10^{-8}$ |
| Hoek met noordrichting . . . . .  | $90^\circ$             | $90^\circ$             | $90^\circ$             | $15^\circ$             | $15^\circ$             |

$C. G. S.$ -eenheden.  $C^2 = 250\,000$  cm per sec<sup>2</sup>.

Wat den weg  $bc$ , de verbinding tusschen het westelijk en het oostelijk deel der Waddenzee, betreft is nog een vereenvoudiging ingevoerd; men heeft zich voorgesteld dat hier niet, zooals in de andere vakken, gelegenheid is tot waterberging door verhooging van den vloeistofspiegel. Het is, behalve dat ook het water in  $bc$  beschouwd wordt als aan den wind blootgesteld, alsof men met een duiker te doen had, waarvan de uiteinden bij  $b$  en  $c$  geheel onder water liggen. Deze vereenvoudiging was wenschelijk, omdat anders de berekeningen al te ingewikkeld zouden worden, en er is dit voor te zeggen, dat de vakken  $qb$  en  $dc$  met hun gezamenlijke breedte van 38 km reeds de geheele breedte der Waddenzee beslaan.

Voor  $bc$  wordt nu de continuïteitsvergelijking eenvoudig dat de stroom  $s$  over de geheele lengte even groot is, en men heeft verder alleen de bewegingsvergelijking

$$\dot{s} = -\alpha \frac{dh}{dx} - \beta |s|s + \frac{1}{\rho} F,$$

waaruit men kan afleiden

$$h_1 - h_0 = -\frac{l}{\alpha} \dot{s} - \frac{\beta l}{\alpha} |s|s + \frac{l}{\alpha \rho} F,$$

waarin  $\alpha$  en  $\beta$  door de vergelijkingen (55) en (56) bepaald worden.

Het scheen niet noodig voor den weg  $bc$  in plaats van  $l$  en  $F$  de grootheden  $\bar{l}$  en  $\bar{F}$  (§ 96) in te voeren.

§ 99. *De gegevens voor de exacte berekening.* Opnieuw werd de storm van 22/23 December 1894 gekozen en vooreerst werd zoo goed mogelijk vastgesteld hoe toenmaals op verschillende tijdstippen de waterhoogten in de zeegaten  $a$  en  $g$ , de windkrachten en de stroom naar de Zuiderzee geweest zijn. Men vindt de aangenomen getallen in onderstaande tabellen 26—28, voor oogenblikken die met tusschenpoozen van 5000 seconden op elkander volgen. Het tijdstip  $t=0$  komt overeen met middernacht van 22 op 23 December. Men is niet verder teruggegaan dan  $t = -10\,000$  omdat het, zooals nog zal blijken, vooral aankomt op den toestand na  $t = 10\,000$ , en omdat op grond van vroegere beschouwingen (§ 82) mocht worden aangenomen dat wat langer dan 6 uur (= 21600) geleden is, geen invloed meer heeft.

In bijlage 10 is nader uiteengezet hoe men tot de verschillende getallen is gekomen.

TABEL 26. Waterhoogten  $h_a$  en  $h_g$ .

| $t$                  | -10000 | -5000 | 0   | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | seconden      |
|----------------------|--------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| $h_a$ (Westgat) . .  | 150    | 240   | 295 | 305  | 295   | 255   | 195   | 130   | } cm + N.A.P. |
| $h_g$ (Noordgat) . . | 137    | 203   | 262 | 305  | 339   | 315   | 269   | 205   |               |

De loop van  $h_g$  is door de volgetrokken roode lijn in het diagram, figuur 46, voorgesteld, terwijl de volgetrokken zwarte lijn (die de uitkomsten der aanstonds te vermelden berekeningen weergeeft) vrijwel de waarden van  $h_a$  laat zien.

TABEL 27. **Stroom S naar de Zuiderzee.**

| $t$ | —10000 | —5000 | 0   | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | seconden                              |
|-----|--------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|
| S   | 130    | 130   | 160 | 195  | 210   | 200   | 165   | 105   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |

TABEL 28. **Snelheid V en richting van den wind. Windwrijving F.**

| $t$                      | —10000 | —5000 | 0    | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | seconden                         |
|--------------------------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|
| windsnelheid $V$ .       | 26,5   | 24,5  | 22,5 | 21   | 19    | 18    | 17    | 16,5  | meter per seconde                |
| windrichting $\varphi$ . | 121°   | 126°  | 129° | 132° | 133°  | 133°  | 131°  | 127°  | naar $\varphi^\circ$ ten O van N |
| $F = 0,04 V^2$           | 28     | 24    | 20,5 | 17,5 | 15    | 13    | 11,5  | 11    | dynes per cm <sup>2</sup>        |

De laatste regel geeft in *C. G. S.*-eenheden (dynes) de kracht door den wind per cm<sup>2</sup> uitgeoefend; zij is afgeleid uit de betrekking  $F = 0,04 V^2$ , zooals uit het in § 62 gezegde kan worden afgeleid.

De termen  $F$  die in de vergelijkingen voor de verschillende geulen voorkomen, vindt men door de zoeven aangegeven volle kracht met den cosinus van den hoek dien zij met de as der geul maakt te vermenigvuldigen. Daar, zooals figuur 45 doet zien, slechts twee assenrichtingen voorkomen, heeft men op elk oogenblik alleen met twee componenten  $F_{ac}$  en  $F_{gc}$  te doen.

Deze staan in tabel 29, waarin ook nog de evenwichtsoopwaaiingen  $f$  voor elke geul zijn opgenomen. Men vindt deze door den werkzamen component van  $F$  met  $\frac{l}{g \rho q}$  te vermenigvuldigen.

TABEL 29. **Windwrijving en opwaaiing volgens de geulassen.**

| $t$                 | —10000 | —5000 | 0    | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | seconden                  |
|---------------------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|
| $F_{ac}$ . . . . .  | 19,7   | 15,8  | 12,6 | 10,0 | 8,2   | 7,1   | 6,7   | 6,9   | dynes per cm <sup>2</sup> |
| $F_{gc}$ . . . . .  | 16,0   | 14,7  | 13,4 | 12,0 | 10,6  | 9,3   | 8,0   | 6,6   | "                         |
| $f_{ap}$ . . . . .  | 12     | 9     | 7    | 6    | 5     | 4     | 4     | 4     | centimeter                |
| $f_{pqb}$ . . . . . | 75     | 60    | 48   | 38   | 31    | 27    | 26    | 26    | "                         |
| $f_{bc}$ . . . . .  | 40     | 32    | 26   | 21   | 17    | 15    | 14    | 14    | "                         |
| $f_{fdc}$ . . . . . | 88     | 81    | 74   | 66   | 59    | 51    | 44    | 37    | "                         |
| $f_{gf}$ . . . . .  | 10     | 10    | 9    | 8    | 7     | 6     | 5     | 4     | "                         |

§ 100. *Berekening van den toestand bij afgesloten Zuiderzee.* Men ging uit van het Vlie,  $g$ , met verschillende onderstellingen omtrent den stroom die daar op de in de tabellen onderscheiden oogenblikken bestaat. Met behulp van de in § 96 aangegeven formules werd dan telkens het geheele gebied doorlopen en de hoogte in  $a$  afgeleid. De bedoeling was nl. den stroom in  $g$  zoo te kiezen dat de voor  $h_a$  gevonden waarden met de werkelijkheid overeenstemmen. Na herhaalde onderstellingen gelukte dit in voldoende mate. Men vond toen de volgende waarden van  $h_a$ , die tegenover de in tabel 26 van § 99 voorkomende, de er onder geplaatste verschillen vertoonen.

Deze verschillen vallen binnen de nauwkeurigheid met welke de waterstanden in  $a$  bekend zijn.

Zooals reeds gezegd werd, worden de gevonden waarden door de volgetrokken zwarte lijn in figuur 46 voorgesteld. Het zal opvallen dat deze

lijn den dubbelen vloedkop vertoont, die buiten het Heldersche zeegat meestal voorkomt. Dit is zuiver toeval en te danken aan de keuze van  $s_g$ , die even goed een weinig anders had kunnen zijn aangenomen, waardoor de kromme voor  $h_a$  een eenigszins anderen vorm zou hebben verkregen.

Het oorspronkelijk aangenomen verloop van  $h_a$  (tabel 26) heeft den dubbelen kop niet, omdat niet met zekerheid vaststaat, dat hij in werkelijk-

TABEL 30.

| $t$               | — 10000 | — 5000 | 0   | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | seconden    |
|-------------------|---------|--------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $h_a$ (berekend). | 157     | 247    | 299 | 300  | 295   | 259   | 201   | 143   | cm + N.A.P. |
| verschil . . .    | 7       | 7      | 4   | — 5  | 0     | 4     | 6     | 13    | cm          |

heid is opgetreden. De berekende kromme (tabel 30) is intusschen even waarschijnlijk als die van tabel 26.

§ 101. *Toestand bij open Zuiderzee.* De aanwezigheid van de wegen die van  $b$  en  $c$  naar het Zuiden gaan, heeft ten gevolge dat men nu moeilijk van één punt  $g$  uit het geheele systeem kan doorloopen. Het best doet men nu zoowel van  $a$  als van  $g$  uit te gaan; van  $a$  uit berekent men de toestanden in  $apqb$  en van  $g$  uit in  $gfdc$ .

Voor  $g$  worden weer de hoogten ingevoerd, die in werkelijkheid bestaan hebben; voor  $a$  daarentegen de, een weinig van de oorspronkelijk vastgestelde verschillende, hoogten die bij de vorige berekening waren gevonden. Aldus werd bereikt dat de berekeningen  $A$  en  $Z$  op *dezelfde* waterstanden, ook in  $a$ , betrekking hebben.

Er moeten nu omtrent *twee* stroomen, nl. die in  $a$  en  $g$  onderstellingen worden gemaakt, maar daar staat tegenover dat aan *twee* voorwaarden moet worden voldaan. De eerste is dat op elk oogenblik optelling der stroomen die in  $qb$  in het punt  $b$  en in  $dc$  in het punt  $c$  bestaan, den stroom oplevert, die in het geheel naar de Zuiderzee gaat. De tweede voorwaarde krijgt men als volgt. Men leert bij de berekeningen de hoogten in  $b$  en  $c$  kennen en kan daaruit den stroom in  $bc$  afleiden. Daaruit volgen dan de stroomen die in  $b$  en  $c$  door de afsluitingslijn gaan en deze moeten nu met een zelfde waterhoogte verder zuidwaarts bestaanbaar zijn. Er moet, wat den driehoek  $bcv$  (of den kring ⑥ in figuur 37, § 89) betreft, aan een dergelijke voorwaarde als vroeger voldaan zijn.

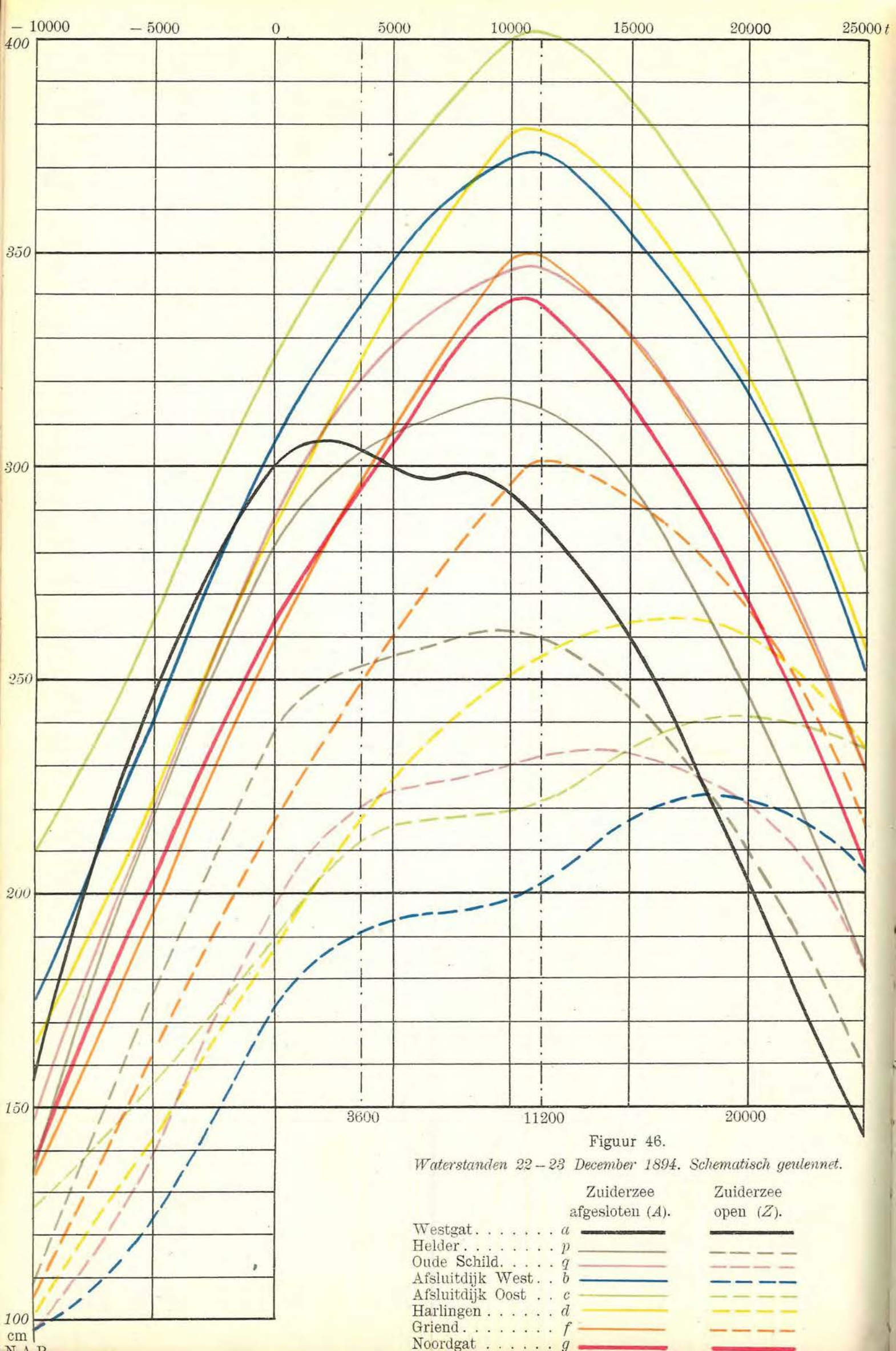
Na verscheidene malen een stroom in  $a$  en een stroom in  $g$  te hebben aangenomen, werd ten slotte een toestand gevonden, die in zeer bevredigende mate aan alle voorwaarden voldoet. De totale stroom naar de Zuiderzee had daarbij de volgende waarden:

TABEL 31.

| $t$                | — 10000 | — 5000 | 0   | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | seconden                              |
|--------------------|---------|--------|-----|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|
| $S$ (berekend).    | 118     | 142    | 160 | 181  | 208   | 193   | 171   | 109   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
| verschil . . .     | — 12    | 12     | 0   | — 14 | — 2   | — 7   | 6     | 4     | „                                     |
| $h_b + f_{bc} - h$ | 12      | — 1    | 10  | — 1  | — 4   | — 2   | — 6   | — 14  | cm                                    |

De getallen die er onder staan wijzen aan hoeveel deze waarden van  $S$  afwijken van de in tabel 27 opgegevene, die men eigenlijk had moeten bereiken. Met het oog op de onzekerheid die uit den aard der zaak in deze getallen bestaat, kan men de overeenstemming bevredigend noemen.

Om te beoordeelen in hoeverre aan de in de tweede plaats genoemde voorwaarde voldaan is, moet men de verdeling van den stroom  $S$  over de geulen  $bv$  en  $cv$  in het oog vatten. Het blijkt dat in den aanvang van het tijdvak de door  $bv$  stroomende waterhoeveelheid wat zwakker moet zijn



Figuur 46.

Waterstanden 22-23 December 1894. Schematisch geplannet.

|                            | Zuiderzee<br>afgesloten (A). | Zuiderzee<br>open (Z). |
|----------------------------|------------------------------|------------------------|
| Westgat . . . . .          | <i>a</i> ———                 | —————                  |
| Helder . . . . .           | <i>p</i> ———                 | -----                  |
| Oude Schild . . . . .      | <i>q</i> ———                 | -----                  |
| Afsluitdijk West . . . . . | <i>b</i> ———                 | -----                  |
| Afsluitdijk Oost . . . . . | <i>c</i> ———                 | -----                  |
| Harlingen . . . . .        | <i>d</i> ———                 | -----                  |
| Griend . . . . .           | <i>f</i> ———                 | -----                  |
| Noordgat . . . . .         | <i>g</i> ———                 | -----                  |

100  
cm  
N. A. D.

dan de stroom die aan het einde van de geul  $apgb$  heerscht. Er moet dus water door  $bc$  afvloeien en het hoogteverschil  $h_3 = h_b + f_{bc} - h_c$ , dat den stroom in  $bc$  beheerscht moet positief zijn en wel van de orde van grootte van een decimeter. Naderhand verandert de toestand: er moet dan stroom van  $c$  naar  $b$  gaan. In verband hiermee moet  $h_b + f_{bc} - h_c$  geleidelijk van  $+10$  tot  $-10$  cm dalen. De uit de berekening volgende waarden van die grootheid zijn in den laatsten regel van tabel 31 opgenomen. Men ziet dat de voorwaarde op een bevredigende wijze wordt vervuld. Alleen bij  $t = -5000$  is  $h_3$  omstreeks een decimeter te klein, welk verschil geen noemenswaardigen invloed op de toestanden tijdens hoogwater ( $t > 10000$ ) heeft.

§ 102. *Uitkomsten der berekeningen.* Bij de berekeningen waarvan in de beide voorgaande §§ sprake was werden nu ook de hoogten en de stroomsterkten op verschillende plaatsen in het gebied gevonden. Men vindt de verkregen getallen, zoowel voor den toestand  $A$  als voor  $Z$ , in tabellen 32 en 33.

Bovendien zijn de hoogten in het diagram (figuur 46) uitgezet, waarin de gebroken lijnen voor den toestand  $Z$  en de volle lijnen voor den toestand  $A$  gelden. Aan deze grafische voorstelling kunnen nu de grootste hoogten die in de verschillende punten voorkomen, de toppen der lijnen, ontleend worden. Ook deze maxima zijn in tabel 32, kolom 3, opgenomen.

Uit deze tabellen blijkt, dat, zocals reeds in § 99 werd opgemerkt, de sterkste stroomen en de hoogste standen omstreeks en na den tijd  $t = 10000$  voorkomen.

TABEL 32.

## Waterstanden.

| Punt. | Toestand.  | Hoogste stand. | $t$    |       |     |      |       |       |       |       | seconden    |
|-------|------------|----------------|--------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|       |            |                | -10000 | -5000 | 0   | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 |             |
| $a$   | $A$ en $Z$ | 306            | 157    | 247   | 299 | 300  | 295   | 259   | 201   | 143   | cm + N.A.P. |
| $p$   | $A$        | 317            | 134    | 218   | 282 | 308  | 316   | 294   | 246   | 183   | cm + N.A.P. |
|       | $Z$        | 262            | 109    | 177   | 238 | 256  | 262   | 246   | 211   | 159   | cm + N.A.P. |
|       | verschil   | 55             | 25     | 41    | 44  | 52   | 54    | 48    | 35    | 24    | cm          |
| $q$   | $A$        | 347            | 147    | 220   | 289 | 328  | 346   | 330   | 290   | 228   | cm + N.A.P. |
|       | $Z$        | 234            | 96     | 138   | 197 | 224  | 230   | 233   | 221   | 183   | cm + N.A.P. |
|       | verschil   | 113            | 51     | 82    | 92  | 104  | 116   | 97    | 69    | 45    | cm          |
| $b$   | $A$        | 373            | 175    | 240   | 306 | 348  | 372   | 354   | 317   | 251   | cm + N.A.P. |
|       | $Z$        | 223            | 98     | 123   | 173 | 194  | 199   | 217   | 222   | 206   | cm + N.A.P. |
|       | verschil   | 150            | 77     | 117   | 133 | 154  | 173   | 137   | 95    | 45    | cm          |
| $c$   | $A$        | 402            | 210    | 264   | 325 | 369  | 400   | 386   | 345   | 275   | cm + N.A.P. |
|       | $Z$        | 242            | 126    | 156   | 189 | 216  | 220   | 234   | 242   | 234   | cm + N.A.P. |
|       | verschil   | 160            | 84     | 108   | 136 | 153  | 180   | 152   | 103   | 41    | cm          |
| $d$   | $A$        | 380            | 166    | 223   | 287 | 339  | 378   | 363   | 321   | 257   | cm + N.A.P. |
|       | $Z$        | 265            | 102    | 144   | 187 | 227  | 252   | 263   | 261   | 233   | cm + N.A.P. |
|       | verschil   | 115            | 64     | 79    | 100 | 112  | 126   | 100   | 60    | 24    | cm          |
| $f$   | $A$        | 350            | 133    | 195   | 258 | 308  | 348   | 330   | 288   | 228   | cm + N.A.P. |
|       | $Z$        | 301            | 104    | 162   | 216 | 260  | 296   | 292   | 267   | 216   | cm + N.A.P. |
|       | verschil   | 49             | 29     | 33    | 42  | 48   | 52    | 38    | 21    | 12    | cm          |
| $g$   | $A$ en $Z$ | 340            | 137    | 203   | 262 | 305  | 339   | 315   | 269   | 205   | cm + N.A.P. |

TABEL 33.

Stroomen.

| Gebied.        | Punt.    | Toe-stand. | <i>t</i> |       |     |      |       |       |       |       | seconden                              |
|----------------|----------|------------|----------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|
|                |          |            | —10000   | —5000 | 0   | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 |                                       |
| <i>a p q b</i> | <i>a</i> | <i>A</i>   | 84       | 96    | 76  | 49   | —19   | —67   | —91   | —95   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 106      | 131   | 125 | 106  | 98    | 72    | 38    | —20   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                | <i>p</i> | <i>A</i>   | 78       | 90    | 73  | 48   | —17   | —64   | —86   | —93   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 100      | 126   | 123 | 106  | 99    | 75    | 42    | —15   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                | <i>q</i> | <i>A</i>   | 50       | 58    | 50  | 38   | —16   | —50   | —62   | —63   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 81       | 101   | 104 | 99   | 98    | 81    | 57    | 6     | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                | <i>b</i> | <i>A</i>   | 21       | 27    | 26  | 24   | —17   | —38   | —39   | —34   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 67       | 81    | 87  | 92   | 94    | 80    | 64    | 23    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
| <i>b v</i>     | <i>b</i> | <i>Z</i>   | 38       | 93    | 62  | 75   | 102   | 88    | 81    | 55    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
| <i>b c</i>     | —        | <i>A</i>   | 21       | 27    | 26  | 24   | —17   | —38   | —39   | —34   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 29       | —12   | 25  | 17   | —8    | —8    | —17   | —32   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
| <i>g f d c</i> | <i>g</i> | <i>A</i>   | 73       | 86    | 80  | 57   | 38    | —16   | —61   | —83   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 131      | 143   | 150 | 147  | 143   | 114   | 73    | 24    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                | <i>f</i> | <i>A</i>   | 66       | 78    | 73  | 52   | 37    | —12   | —54   | —75   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 123      | 136   | 143 | 141  | 142   | 117   | 79    | 31    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                | <i>d</i> | <i>A</i>   | 25       | 24    | 23  | 12   | 27    | 14    | —9    | —20   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 79       | 93    | 104 | 110  | 125   | 119   | 101   | 63    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                | <i>c</i> | <i>A</i>   | —21      | —27   | —26 | —24  | 17    | 38    | 39    | 34    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|                |          | <i>Z</i>   | 51       | 61    | 73  | 89   | 114   | 113   | 107   | 86    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
| <i>c v</i>     | <i>c</i> | <i>Z</i>   | 80       | 49    | 98  | 106  | 106   | 105   | 90    | 56    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
| <i>S</i>       |          | <i>Z</i>   | 118      | 142   | 160 | 181  | 208   | 193   | 171   | 109   | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |

Uit de getallen van tabel 33 ziet men dat bij den toestand *A* de stroomen in de zeegaten zwakker zijn dan bij *Z*. Bij *a* (Texelsche zeegat) neemt het maximum van den stroom van 131 000 tot 96 000 m<sup>3</sup> per sec af; bij *g* (Vlie) van 150 000 tot 86 000. Er is dus geen sprake van dat dezelfde stroomen die bij open Zuiderzee door de zeegaten trokken dit na de afsluiting zullen blijven doen.

§ 103. *Opmerkingen over de uitvoering van de berekening.* *a.* Door het werken met gelijke tijdsintervallen wordt het differentieeren van de verschillende grootheden naar *t* al heel eenvoudig. Zijn nl. *t'* en *t''* twee op elkander volgende van de gekozen tijdstippen en heeft de beschouwde grootheid op die oogenblikken de waarden  $\varphi'$  en  $\varphi''$ , dan kan men met voldoende benadering zeggen dat

$$\frac{\varphi'' - \varphi'}{t'' - t'} \tag{67}$$

de waarde van het differentiaalquotient voor het tijdstip  $\frac{1}{2}(t' + t'')$  is. Voor tijden nabij het begin en het einde van het geheele beschouwde interval

zijn echter de differentiaalquotienten bepaald door raaklijnen te trekken aan de lijnen die de grootheden als functiën van den tijd voorstellen <sup>1)</sup>.

b. Een goede contrôle op de uitkomsten, waarvan in den regel gebruik is gemaakt, bestaat hierin dat men, na eerst met de formules van § 96 voor een geul  $\bar{h}_i$  en  $\bar{s}_i$  uit  $\bar{h}_0$  en  $\bar{s}_0$  te hebben afgeleid, terugkeert en, wat natuurlijk met dergelijke formules kan worden gedaan, uit de gevonden  $\bar{h}_i$  en  $\bar{s}_i$  weer de waarden van  $\bar{h}_0$  en  $\bar{s}_0$  berekent.

De verschillen tusschen de aldus bepaalde waarden en de  $\bar{h}_0$  en  $\bar{s}_0$  waarvan was uitgegaan, bleken verwaarloosd te kunnen worden; zij bedroegen niet meer dan enkele eenheden van de laatste decimaal, d. w. z., wat de waterhoogten betreft, nog geen centimeter. Hierin ligt een waarborg, dat men bij de voorkomende lengte der vakken, door het weglaten van de verdere termen der reeksen, geen noemenswaardige fouten heeft begaan, en dat de wijze van differentieeren nauwkeurig genoeg is geweest.

§ 104. *Invloed van de afsluiting op de scherpte der maxima.* Het diagram (figuur 46) geeft tot een interessante gevolgtrekking aanleiding, die betrekking heeft op den tijdsduur gedurende welken de hooge waterstanden voorkomen. De maxima zijn nl. na de afsluiting wel aanmerkelijk hooger dan daarvoor, maar zij zijn scherper geworden. Men kan b.v. uit de figuur afleiden gedurende hoe langen tijd de waterhoogte niet meer dan 20 cm beneden het maximum is. Men vindt daarvoor ongeveer het volgende:

|              | Open Zuiderzee. | Na de afsluiting. |
|--------------|-----------------|-------------------|
| $p$          | 70 min.         | 60 min.           |
| $q$          | 85 „            | 50 „              |
| $b$          | 70 „            | 45 „              |
| $c$ meer dan | 80 „            | 40 „              |
| $d$          | 70 „            | 40 „              |
| $f$          | 40 „            | 35 „              |

§ 105. *Gevolgtrekkingen. Bepaling der correctie die, wegens het niet stationair zijn van den toestand, aan de vroegere uitkomsten moet worden aangebracht.* Indien men met stationaire toestanden rekent, zoodat men voor elk punt slechts één hoogte  $h_Z$  en één hoogte  $h_A$  vindt, levert het verschil daarvan de verhooging op, die door de afsluiting wordt teweeggebracht. Op overeenkomstige wijze kan men bij veranderlijke toestanden het verschil der op hetzelfde oogenblik voorkomende hoogten,  $\delta h = h_A - h_Z$  bepalen; de waarden daarvan zijn dan ook in tabel 32 opgenomen. Maar het is duidelijk dat dit niet de getallen zijn, waarop het aankomt. Wat men verlangt te weten is hoeveel de hoogste stand tot welken het water na de afsluiting zal stijgen boven den hoogsten stand ligt, die vóór de afsluiting bereikt wordt; dat de twee aldus vergeleken hoogten niet op hetzelfde oogenblik voorkomen doet daarbij niet ter zake.

De verschillen

$$\Delta h = h_{Amax} - h_{Zmax},$$

afgeleid uit de grafische voorstelling, vindt men in de derde kolom van de tabel. Met deze getallen moet nu verder rekening worden gehouden, waarbij steeds de tweeërlei verschillen door de notaties  $\delta h$  en  $\Delta h$  van elkaar zullen worden onderscheiden.

Om de grootheden  $\Delta h$  te doen dienen voor de correcties die aan de uitkomsten van § 92 moeten worden aangebracht, werd nu ook voor het vereenvoudigde geulennet, waarop de laatste §§ betrekking hadden, de verhooging in de onderstelling van een stationaire toestand berekend.

<sup>1)</sup> Bij de in § 97 vermelde berekening van het getij naar de exacte methode bleek het wenschelijk bij de toepassing van den in (67) uitgedrukten regel met kleinere tijdsverloopen en wel met intervallen van 3725 sec te werken.

Bij de berekening van het effect van een windstoot (§ 107) was de loop der kromme lijnen zoo onregelmatig, dat de differentiaalquotienten alle uit den stand der raaklijn moesten worden afgeleid.

Men kan nl., een willekeurig tijdstip in het oog vattende, zich voorstellen dat de bepalende grootheden, de hoogten in de zeegaten, de windkracht en de stroom naar de Zuiderzee, voortdurend de waarden hebben die op dat oogenblik voorkomen en dan te werk gaan zooals in § 91, wat nu al heel eenvoudig is. Men leert op deze wijze de verhooging  $\delta h$  kennen en wel kan de berekening daarvan voor verschillende tijdstippen worden uitgevoerd.

Bij gebrek aan beter wordt nu ten slotte aangenomen dat het niet-stationair zijn van den toestand zich bij het uitgebreide geulennet waarmede vroeger werd gerekend in dezelfde mate in de waterverhoogingen zal doen gevoelen als bij het eenvoudige geulennet dat thans werd beschouwd. Nauwkeuriger uitgedrukt luidt de onderstelling als volgt (in het volgende hebben de grootheden met den index  $u$  betrekking op het uitgebreide geulennet, en de grootheden zonder index op het geschematiseerde):

Ook bij het uitgebreide geulennet komt het aan op het hoogteverschil der maxima die in werkelijkheid bij de niet-stationaire bewegingen bij afgesloten en open Zuiderzee voorkomen. Er wordt nu ondersteld dat dit verschil  $\Delta h_u$  in dezelfde verhouding tot het boven besproken verschil  $\Delta h$  staat, als het vroeger berekende verschil  $\delta h_u$  tot het verschil  $\delta h$ , indien dit laatste genomen wordt voor hetzelfde oogenblik waarvoor  $\delta h_u$  werd berekend,

$$\Delta h_u = \frac{\Delta h}{\delta h} \delta h_u. \tag{68}$$

Op grond hiervan kan men uit de reeds bekende  $\Delta h$  en de nog te berekenen  $\delta h$  voor elk punt den coëfficiënt

$$\chi = \frac{\Delta h}{\delta h}$$

afleiden, waarmee  $\delta h_u$  moet worden vermenigvuldigd.

De berekening van  $\delta h$  voor het eenvoudige geulennet werd uitgevoerd voor het oogenblik  $t = 11200$ , d.w.z. iets na 3 uur in den morgen van 23 December.

Er werden dus twee berekeningen ( $Z$  en  $A$ ) van stationaire toestanden in het eenvoudige geulennet uitgevoerd, met de waarden die de bepalende grootheden (hoogten in de zeegaten, windkrachten en stroomen naar de Zuiderzee) op dat tijdstip hadden.

Uit het diagram (figuur 46) leest men voor  $t = 11200$  af:  $h_a = 287$  en  $h_g = 338$ . Als maat voor de windkrachten kunnen de in tabel 29 aan-gegeven opwaaiingen dienen (die met de waarden van  $h_w, h'_w$  in tabel 20 en 21 overeenkomen). Door interpolatie vindt men voor  $t = 11200$ :

$$f_{ap} = 5; \quad f_{pb} = 30; \quad f_{bc} = 16; \quad f_{fc} = 56; \quad f_{gf} = 7 \text{ cm.}$$

Verder is (tabel 33) bij open Zuiderzee de stroom in de richting naar  $v$  bij  $b$   $103 \times 10^9$  en bij  $c$   $107 \times 10^9$   $\text{cm}^3$  per sec.

Het verdient opmerking dat deze gegevens slechts weinig verschillen van die waarvan werd uitgegaan bij de berekening  $U$  in het uitgebreide geulennet (verg. fig. 38 en 39, tabellen 20 en 21). Dit komt hiermede overeen, dat de tijdstippen waarop deze laatste berekening en de nu uitgevoerde betrekking hebben, op weinig na overeenstemmen. (Alleen zijn thans de waterstanden ruim 20 cm hooger, maar dit doet niets ter zake; de waterstand-verschillen van plaats tot plaats, waar het op aankomt, zijn nagenoeg gelijk).

De uitkomsten voor de waterstanden en de daaruit afgeleide waarden van  $\delta h$  en van de verhouding  $\chi$  zijn:

TABEL 34.

|  | $a$ | $p$  | $q$  | $b$  | $c$  | $d$  | $f$  | $g$ |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| $h_A$ . . . . .                              | 287 | 300  | 324  | 348  | 382  | 361  | 340  | 338 |
| $h_Z$ . . . . .                              | 287 | 258  | 235  | 212  | 231  | 268  | 305  | 338 |
| $\delta h$ . . . . .                         | 0   | 42   | 89   | 136  | 151  | 93   | 35   | 0   |
| $\chi = \frac{\Delta h}{\delta h}$ . . . . . |     | 1,31 | 1,27 | 1,10 | 1,06 | 1,24 | 1,40 |     |

Het verdient in het bijzonder de aandacht dat het water in werkelijkheid na de afsluiting hooger zal oploopen dan volgens de berekening met stationaire toestanden het geval zou zijn. Men vindt nl. in tabel 32 voor  $h_{A \max}$  in de verschillende punten

|     |     |     |     |     |      |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $p$ | $q$ | $b$ | $c$ | $d$ | $f$  |
| 317 | 347 | 373 | 402 | 380 | 350, |

welke getallen alle grooter zijn dan de zoeven medegedeelde waarden van  $h_A$ .

Dit treft te meer omdat deze laatste berekend werden voor een tijdstip, waarop vóór de afsluiting in de meeste punten der Waddenzee de waterhoogte in de nabijheid is van de hoogst voorkomende. Er is een sterke naar de Zuiderzee gaande stroom, zoodat er alle reden is om bij de berekening met stationaire toestanden een groote hoogte na de afsluiting, d. w. z. een groote waarde van  $\delta h$ , te verwachten.

Dat in werkelijkheid het water *nog* hooger kan rijzen is, zooals nadere beschouwingen geleerd hebben, te wijten aan de getijbeweging, die nog altijd ook gedurende een storm voorkomt, en die in de in het voorgaande besproken waterbewegingen begrepen is. Ook bij een berekening van de getijden alleen, wanneer die wordt uitgevoerd voor waterdiepten zooals zij bij een stormvloed voorkomen, doet zich iets dergelijks voor. Uit de uitkomsten waartoe de berekening der uitwerking van een windstoot (§ 107) heeft geleid, kan worden besloten dat men hier niet met een dynamisch windeffect (§ 59) te doen heeft.

§ 106. *Bespreking van de gemaakte onderstelling.* De hypothese die in (68) is uitgedrukt moet uit den aard der zaak onbewezen blijven, juist omdat men voor het „uitgebreide” geulennet de exacte berekening van een niet-stationairen toestand niet kan uitvoeren. Toch kan wel iets tot rechtvaardiging er van worden aangevoerd.

Neemt men nl. aan dat  $\Delta h$  en  $\Delta h_u$  evenredig zijn met de verhoogingen  $\delta h$  en  $\delta h_u$  die men bij de twee gevallen (het vereenvoudigde en het uitgebreide net) voor zeker tijdstip vindt, dan kan men evengoed zeggen, dat  $\Delta h$  en  $\Delta h_u$  evenredig zijn met de voor een ander oogenblik  $t'$  berekende verhoogingen  $\delta' h$  en  $\delta' h_u$ . Zal ook dit het geval zijn, dan moet men hebben

$$\frac{\delta h}{\delta h_u} = \frac{\delta' h}{\delta' h_u},$$

en dit is een betrekking die men op de proef kan stellen.

Om dat te doen kan men voor het vereenvoudigde geulennet de berekening van  $\delta h$ , die boven wat den tijd  $t = 11\,200$  betreft vermeld werd, voor een paar andere tijdstippen herhalen, en voor diezelfde tijdstippen ook  $\delta h_u$  voor het uitgebreide geulennet berekenen. De uitkomsten voor de drie tijden 11 200 (reeds boven beschouwd), 3600 en 20 000 vindt men in onderstaande tabel 35.

Tot toelichting daarvan diene het volgende. De berekening van  $\delta h$  geschiedde voor de nieuw gekozen oogenblikken geheel op dezelfde wijze als voor het in de vorige § in het oog gevatte tijdstip. Wat  $\delta h_u$  betreft, kon er met gerustheid van worden afgezien becijferingen, zoo omslachtig als de in §§ 90 en 91 vermelde, te herhalen. Daarom werd te werk gegaan evenals in § 94. Er werden dus geen naast elkander liggende geulen van verschillende diepte onderscheiden en de waterdiepten werden in de formules voor de toestanden  $A$  en  $Z$  gelijk genomen. Dientengevolge was voor de berekening der verhoogingen  $\delta h_u$  slechts de kennis der stroomvervallen in de kringen van figuur 37 (welke vervallen bij  $A$  en  $Z$  even groot zijn) noodig. Men kan nu opmerken dat de kringen ① en ② in figuur 37, te zamen genomen, overeenkomen met den weg  $a p q b c d f g$ . Men stelde daarom de som der stroomvervallen in de kringen ① en ② gelijk aan het stroomverval dat bij de berekening van  $\delta h$  voor den weg

$apqbcdfg$  was gevonden. De stroomvervallen in de beide genoemde kringen elk afzonderlijk en in de andere in figuur 37 voorkomende kringen werden zoo goed mogelijk geschat, waarbij ook met de sterkte en richting van den wind rekening werd gehouden.

TABEL 35.

|             |                                   | $p$  | $q$  | $b$  | $c$  | $d$  | $f$ |
|-------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-----|
| $t = 3600$  | $\delta h$                        | 29   | 61   | 93   | 93   | 58   | 23  |
|             | $\delta h_{u_i}$                  | 20   | 41   | 83   | 81   | 35   | 6   |
|             | $\frac{\delta h}{\delta h_{u_i}}$ | 1,45 | 1,49 | 1,12 | 1,15 | 1,66 | 3,8 |
| $t = 11200$ | $\delta h$                        | 42   | 89   | 136  | 151  | 93   | 35  |
|             | $\delta h_{u_i}$                  | 27   | 54   | 112  | 128  | 50   | 7   |
|             | $\frac{\delta h}{\delta h_{u_i}}$ | 1,56 | 1,65 | 1,21 | 1,19 | 1,86 | 5,0 |
| $t = 20000$ | $\delta h$                        | 27   | 59   | 90   | 107  | 66   | 25  |
|             | $\delta h_{u_i}$                  | 17   | 35   | 71   | 87   | 31   | 4   |
|             | $\frac{\delta h}{\delta h_{u_i}}$ | 1,59 | 1,69 | 1,26 | 1,23 | 2,13 | 6,2 |

Men ziet dat inderdaad op een bepaalde plaats de voor verschillende tijden gevonden verhoudingen niet al te zeer uiteenloopen, wat eenigszins voor de in de vorige § gemaakte en in (68) uitgedrukte onderstelling pleit. De coëfficiënt  $\chi$ , die men in tabel 34 vindt, is dan ook verder gebruikt om de uitkomsten, die op de in § 92 aangegeven wijze waren gevonden, te corrigeeren en er aldus rekening mee te houden, dat in werkelijkheid de toestanden niet stationair zijn.

Hierbij moge nog het volgende worden opgemerkt. De waarden van  $\chi$  in tabel 34 berusten op die van  $\delta h$  berekend voor den tijd  $t = 11\ 200$ . De waarde van  $\delta h_{u_i}$ , die in § 92 bepaald werd, zou dus alleen met  $\chi$  vermenigvuldigd behoeven te worden, als die waarde op datzelfde oogenblik  $t$  betrekking had. Mocht zij voor een daarvan verschillende tijd, stel  $t'$ , gelden en had men dus in § 92  $\delta h_{u_i(t')}$  bepaald, dan zou men, daar de gezochte grootheid

$$\Delta h_{u_i} = \chi \cdot \delta h_{u_i(t)}$$

is, de verhooging  $\delta h_{u_i(t')}$  moeten vermenigvuldigen met

$$\chi \cdot \frac{\delta h_{u_i(t)}}{\delta h_{u_i(t')}}.$$

Intusschen scheen een correctie van dezen aard niet noodig. Vooreerst kan men het tijdstip waarvoor de berekeningen van § 92 gelden bezwaarlijk met eenige zekerheid wat vroeger of later dan 11 200 stellen. Ten tweede zijn in tabel 35 de waarden van  $\delta h_{u_i}$  op den tijd 11 200 steeds hoger dan op de twee andere beschouwde oogenblikken. Men is dus klaarblijkelijk niet ver van een maximum en dientengevolge zal, als  $t'$  niet veel van  $t$  verschilt,

$$\frac{\delta h_{u_i(t)}}{\delta h_{u_i(t')}}.$$

weinig van 1 verschillen.

Eindelijk moet er nog op worden gewezen dat de coëfficiënten  $\chi$  slechts voor enkele bepaalde plaatsen (de in tabel 34 voorkomende) rechtstreeks zijn berekend. Door grafische interpolatie zijn daaruit de waarden afgeleid, die voor andere plaatsen zijn aangenomen.

In tabel 42, blz. 200a, waarin de uitkomsten van alle berekeningen volgens de derde methode zijn vereenigd, vindt men in de eerste kolom de voor een stationairen toestand berekende verhoogingen  $\delta h_u$  (§ 92). In de tweede kolom staat de correctiefactor  $\chi$  en in de derde kolom staat wat er komt als men de cijfers van de eerste kolom met dien factor vermenigvuldigt.

§ 107. *Berekening der uitwerking van een windstoot.* Om eenig inzicht in dit vraagstuk te verkrijgen kan men o. a. als volgt te werk gaan.

Een rechthoekig kanaal van uniforme diepte is aan de eene zijde afgesloten en staat aan het andere einde in verbinding met de open zee. Op de watermassa in het kanaal grijpt een, over het oppervlak gelijkelijk verdeelde, kracht, de windwrijving, aan.

Deze kracht groeit snel aan van nul tot een maximum, in het uitgewerkte geval in 50 minuten, en daalt daarna geleidelijk weer tot nul.

Op de wijze van § 84 kan de uitwerking van de kracht van oogenblik tot oogenblik worden berekend. Om de oplossing niet al te ingewikkeld te maken is ondersteld dat er geen getij is; de uitwerking van de windkracht is dan rechtstreeks te beoordeelen uit de waterhoogte  $h_t$  aan het gesloten einde van het kanaal.

De hoogte  $h_0$  aan het andere uiteinde is bekend, namelijk steeds nul, en men neemt nu zoo lang een verloop van den daar optredenden stroom,  $s_0$ , aan, tot voor  $s_t$  voor de geheele beschouwde periode nul wordt gevonden.

Na eenig probeeren lukte dit vrijwel en toen bleek het volgende:

In het eerst is de waarde van  $h_t$  kleiner dan de bij de oogenblikkelijke windsterkte behorende evenwichtopwaaing. Er is eenige tijd noodig voor het ontstaan van de opstuwing (verg. § 57). Tijdens de grootste windsnelheid (25 m per sec) is het echter al anders:  $h_t$  is nu grooter dan met de evenwichtopwaaing overeenkomt en wel 1,25 maal zoo groot. Dit is het verschijnsel van het dynamisch windeffect, dat in § 59 is besproken.

Lang duurt deze toestand niet: ruim een uur na den sterksten wind is  $h_t$  ongeveer tot de evenwichtopwaaing genaderd en wijkt daarna er niet noemenswaard meer van af.

In deze laatste periode vallen bij den storm van 1894, evenals bij vrijwel alle andere stormen, de hoogste waterstanden.

Het in § 105 genoemde voorkomen van nog hoogere standen dan de evenwichtsstand kan dus niet worden veroorzaakt door een dynamisch windeffect.

§ 108. *Invloed der krachten van de tweede orde en van de aswenteling der aarde.* Er moet nu nog van eenige verdere correcties worden gesproken, waarbij in de eerste plaats de kracht van CORIOLIS, de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI in aanmerking komen. Deze krachten worden zoowel voor den toestand  $A$  als voor den toestand  $Z$  uit de gevonden snelheden afgeleid; de hoogteveranderingen waartoe zij aanleiding geven worden met behulp van de in § 39 genoemde reciprociteitsstelling geschat, en zoo komt men ten slotte, eerst voor enkele uitgekozen punten en vervolgens door interpolatie ook voor andere, tot de gezochte correcties. Dit alles behoeft, daar de invloed der bedoelde krachten klein is, slechts met geringe nauwkeurigheid gedaan te worden. Zoo werd er niet op gelet dat de krachten van oogenblik tot oogenblik veranderen, terwijl, strikt genomen, de stelling alleen voor stationaire toestanden geldt. De berekeningen, die reeds waren uitgevoerd in aansluiting aan de in §§ 90—94 genoemde becijferingen, zijn in den regel niet herhaald nadat de in § 105 medegedeelde uitkomsten waren verkregen. Het moge voldoende zijn er hier op te wijzen dat de stroomen op het beschouwde oogenblik in het werkelijke geval (bij den niet-stationairen bewegingstoestand) niet zeer verschillend zullen zijn geweest van die welke men in de onderstelling van een stationairen toestand heeft berekend. Althans kan dit van de bewegingen in het eenvoudige in

figuur 45 voorgestelde gebied gezegd worden. De stroomen die op het oogenblik  $t = 11\,200$  bij den niet-stationairen toestand voorkomen hebben de volgende waarden, die men uit de getallen van tabel 33 kan afleiden.

TABEL 36. **Stroomen op het tijdstip  $t = 11\,200$ .**

| Stroomrichting.   | $apqb$ |     |     |     | $bv$ | $bc$ | $gfdc$ |     |     |     | $cv$ |                                       |
|---|--------|-----|-----|-----|------|------|--------|-----|-----|-----|------|---------------------------------------|
| Plaats.   | $a$    | $p$ | $q$ | $b$ | $b$  | —    | $g$    | $f$ | $d$ | $c$ | $c$  |                                       |
| Stroomsterkte $\left\{ \begin{array}{l} A \\ Z \end{array} \right.$ | -36    | -35 | -30 | -26 | —    | -26  | 24     | 25  | 26  | 26  | —    | $\times 10^9$ cm <sup>3</sup> per sec |
|   | 94     | 95  | 96  | 93  | 103  | -10  | 140    | 140 | 126 | 117 | 107  | "                                     |

Daarentegen vindt men bij de berekening der in § 105 besproken stationaire toestanden (eveneens voor  $t = 11\,200$ ) voor geval  $A$  een doorgaanden stroom van  $g$  naar  $a$ , waarvan de sterkte in de in de tabel gezegde eenheid 42 bedraagt (dus  $s_{apqb} = s_{bc} = -42$ ,  $s_{gfdc} = 42$ ) en voor het geval  $Z$  de waarden  $s_{apqb} = 85$ ,  $s_{bc} = -18$ ,  $s_{gfdc} = 125$ . In het gebied dat bij de uitvoerige berekeningen beschouwd werd, en waarin, zooals reeds gezegd werd, toestanden bestaan waarmede die in het geschematiseerde gebied veel overeenkomst vertoonen, zullen dergelijke verschillen tusschen de twee stroomstelsels bestaan. Met het oog hierop schijnt het geoorloofd de correcties, waarvan nu sprake is en die alle door de stroomsnelheden bepaald worden, voor den werkelijken toestand aan te brengen met de grootte die zij voor den beschouwden stationairen toestand hebben. Hiervoor pleit nog, dat berekeningen voor de verschillende gevallen  $P$ ,  $Q$  en  $R$  van § 95 tot weinig verschillende waarden der correcties hebben geleid, ofschoon de stroomsterkten daarbij veel grooter verschillen vertoonen dan tusschen de getallen van tabel 36 en die welke zoeven daarmede werden vergeleken.

Echter zal ook rekening moeten worden gehouden met de grootte die de correcties hebben omstreeks den tijd, waarop de hoogwaters van toestand  $Z$  vallen. Voor de omgeving der zeegaten is dit niet ver van  $t = 11\,200$ , maar in  $b$ ,  $c$  en  $d$  valt het later: tusschen  $t = 15\,000$  en  $t = 20\,000$ . Uit tabel 33 volgt, dat de stroomen bij toestand  $Z$  dan al zwakker zijn geworden dan die in het geval  $U$  (figuur 38), waarvan is uitgegaan, zoodat de correcties ook wat kleiner uitvallen. Hierop dient bij het bepalen van die correcties in het zuidoostelijk deel van de Waddenzee te worden gelet.

De correcties die wegens de aardrotatie, de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI zijn aangebracht, vindt men in de kolommen 4, 5 en 6 van tabel 42, blz. 200a. De centrifugaalkracht doet bij afgesloten Zuiderzee, in vergelijking met den tegenwoordigen toestand, het water in de streek van Ewijcksluis wat hooger en aan de Friesche kust wat lager staan. Dit hangt samen met het feit dat bij open Zuiderzee het water, dat door het Heldersche zeegat instroomt om naar de Zuiderzee te gaan, een scherpe wending naar rechts moet maken (zie figuur 40), waarbij van Ewijcksluis aan den hollen en de Friesche kust aan den bollen kant van den gebogen weg ligt. Na de afsluiting bestaat dit verschijnsel niet meer; vandaar dat wegens de centrifugaalkracht de voor de verhooging gevonden getallen nabij van Ewijcksluis verhoogd en nabij de Friesche kust verlaagd moeten worden.

De kracht van BERNOULLI komt in het algemeen tot uiting waar bij den toestand  $Z$  groote, en, zooals altijd, bij den toestand  $A$  matige snelheden bestaan; dit doet zich voor in het Heldersche zeegat, in het nauwe deel van het Amsteldiep en bij de oostpunt van Wieringen. Wegens deze kracht is de waterstand laag waar de snelheid, tengevolge van een vernauwing van den weg, groot is. Dit had bijvoorbeeld, toen het Amsteldiep nog open was en daarin bij storm een sterke stroom bestaan kon, de strekking de hoogte aldaar te verlagen en dus moet de verhooging na afsluiting aan de noordzijde van den dijk grooter worden.

De kracht van CORIOLIS heeft, zooals tabel 42 doet zien, een geenszins te verwaarloozen invloed. De verhoogingen aan de Friesche kust worden er door verhoogd en die aan de tegengestelde zijde verkleind. Zooals reeds in § 33 werd uiteengezet hangt dit samen met de algemeene waterbeweging naar het Zuiden, die nu bij een storm bestaat.

§ 109. *Eenige kleine quaesties.* Er moeten nu nog enkele omstandigheden in aanmerking worden genomen die misschien tot een correctie aanleiding zouden kunnen geven. De berekeningen die hierbij te pas kwamen kunnen alle worden gedaan naar de methode die in §§ 151—153 is uiteengezet. Zij zijn uitgevoerd in aansluiting aan de uitvoerige berekening van het stationaire geval.

a. In al het voorgaande is ondersteld dat de kracht waarmede de wind het water voortdrijft gelijkmatig over de volle diepte verdeeld is, terwijl zij in werkelijkheid op het oppervlak werkt. Met welke oppervlaktekracht een gegeven volumekracht onder bepaalde omstandigheden gelijk staat, of omgekeerd, is in § 55, c besproken; het wordt door den aldaar ingevoerden coëfficiënt  $\omega$  bepaald en de waarden van dezen coëfficiënt zijn het dan ook, die bij de berekening der vereischte correctie moeten dienen (§ 154).

De uitkomst was dat de verandering die de verhoogingen wegens de nu besproken reden ondergaan zoo klein is dat zij achterwege had kunnen blijven. Het bedrag er van, dat men in kolom 7 van tabel 42 vindt, is hoogstens een centimeter.

b. Vervolgens werd nagegaan of het eenigen invloed heeft dat men bij de berekening van den toestand *A* (§ 91) van een waterdiepte heeft gebruik gemaakt, die, daar zij aan een vroegere voorloopige berekening ontleend was, een weinig fout is. Het bleek dat dit geheel zonder belang is.

c. Een derde vraag was hoe de uitkomsten zullen veranderen als men aan de constante van EYTELWEIN  $C$ , die nu (§ 90) op  $500 \text{ cm}^{1/2}/\text{sec}$  gesteld werd, een andere waarde toekent. De wijziging  $\delta_c$  die aan de berekende verhooging moet worden aangebracht als men tot een nieuwe waarde  $C'$  overgaat, wordt gegeven door een formule van den vorm

$$\delta_c = \Theta_c \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right),$$

waarbij  $\Theta_c$  met de in § 156 afgeleide vergelijkingen voor ieder punt kan worden bepaald. De uitkomsten waren als volgt:

TABEL 37.

| Plaats       | $p$        | $q$   | $b$   | $c$    | $d$    | $r$   | $f$   | $h$   | $i$   | $l$   |       |
|--------------|------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Theta_c$   | 23,3       | 47,1  | 105,8 | 100,2  | 52,2   | 29,1  | 9,0   | 11,0  | 4,9   | 3,1   |       |
| $\delta_c$ { | $C' = 530$ | - 2,6 | - 5,2 | - 11,6 | - 11,2 | - 5,7 | - 3,2 | - 1,0 | - 1,2 | - 0,5 | - 0,3 |
|              | $C' = 510$ | - 0,9 | - 1,9 | - 4,2  | - 4,0  | - 2,1 | - 1,2 | - 0,4 | - 0,4 | - 0,2 | - 0,1 |
|              | $C' = 485$ | 1,5   | 3,1   | 7,0    | 6,7    | 3,5   | 1,9   | 0,6   | 0,7   | 0,3   | 0,2   |

Het valt op dat  $\Theta_c$  in alle punten weinig verschilt van de verhooging  $\delta h$  zelf (tabel 24, blz. 176). Was  $\Theta_c = \delta h$ , dan zou de gecorrigeerde verhooging worden

$$\delta h + \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right) \delta h = \frac{C^2}{C'^2} \delta h;$$

d. w. z. de verhooging zou omgekeerd evenredig aan de tweede macht der constante van EYTELWEIN veranderen. Hierbij kan worden opgemerkt dat de hoogteverschillen die bij afwezigheid van wind bij een gegeven waterbeweging voorkomen op deze wijze van  $C$  afhangen.

d. Ten slotte is nagegaan welke gevolgen het heeft als men den exponent 2 in de weerstandswet door een anderen, stel  $2 - k$ , vervangt (§ 157). Men kan dan voor de correctie aan de verhooging schrijven

$$\delta_k = \Theta_k k,$$

waarin  $\Theta_k$ , evenals zoo even  $\Theta_c$  voor elk punt kan worden berekend. Daarbij werd aangenomen (§ 157) dat de weerstanden gemeten zijn bij een snelheid van 60 cm per sec.

De correcties worden nu:

TABEL 38.

| Plaats.               | $p$  | $q$   | $b$   | $c$   | $d$  | $r$   | $f$ | $h$ | $i$ | $l$  |
|-----------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-----|-----|-----|------|
| $\Theta_k$            | -6,8 | -17,4 | -31,1 | -34,2 | -9,0 | -10,7 | 0,7 | 0,7 | 1,4 | -0,7 |
| $\delta_k; k = 0,125$ | -0,9 | -2,2  | -3,9  | -4,3  | -1,1 | -1,3  | 0,1 | 0,1 | 0,2 | -0,1 |

Deze bedragen zijn wel klein, maar toch niet geheel zonder belang. Een exponent 1,875 is niet onwaarschijnlijk. Voert men dien in, dan dalen de verhoogingen omstreeks 3 %, behalve in het Noordoosten. Daar is echter de berekening niet te vertrouwen omdat de stroomen van het stationaire geval  $U$ , waarop de correcties zijn gebaseerd, er te veel afwijken van de werkelijkheid.

De waarde 0,125 is eigenlijk te groot om als oneindig klein behandeld te worden, maar het lijkt geen twijfel dat men door de gevolgde berekening wel de orde van grootte der correcties behoorlijk vindt.

Daar het moeilijk is met eenige zekerheid aan te wijzen welke veranderingen in de waarden van  $C$  en in den exponent van de weerstandswet moeten worden aangebracht, zijn de correcties  $\delta_c$  en  $\delta_k$  niet in tabel 42 opgenomen.

Bij de bespreking van de onzekerheid in de uitkomsten (§ 114) zal er op worden teruggekomen.

§ 110. *De verhooging op een uitgekozen plaats (Harlingen).* Tot toelichting volgen hier iets meer in bijzonderheden de getallen voor Harlingen (verg. tabel 42).

De verhooging, voor den stationairen toestand berekend (berekening  $U$ ), was na de „vereffening” (§ 92) 40 cm. Dit vermenigvuldigd met  $\chi = 1,25$ , geeft 50. De hoogteverandering door de kracht van CORIOLIS bedroeg voor den toestand  $A - 2,5$ , voor  $Z - 14,6$ ; die voor de centrifugaalkracht werd voor  $A$  op 0 en voor  $Z$  op 0,8 geschat. Voor de kracht van BERNOULLI was het getal  $-0,2$  voor  $A$  en  $-3$  voor  $Z$ , zoodat de verschillen  $A - Z$  resp.  $+12$ ,  $-1$  en  $+3$  bedroegen. De in § 109,  $a$  besproken correctie was niet meer dan  $-1$  cm en de gecorrigeerde verhooging, in kolom 8 opgegeven, is dus  $50 + 12 - 1 + 3 - 1 = 63$  cm.

De hoogste stand heeft bij open Zuiderzee 271 + N.A.P. bedragen; bij afgesloten Zuiderzee had men dus 334 cm kunnen verwachten.

§ 111. *In aanmerking nemen van andere stormen.* Door het aanbrengen van de in §§ 108 en 109 opgenoemde correcties worden de getallen verkregen, die in kolom 8 van tabel 42 staan. Dit zijn dus de (verbeterde) waarden van

$$\Delta h = h_{A \max} - h_{Z \max}$$

(§ 105), waarbij  $h_{Z \max}$  en  $h_{A \max}$  de grootste hoogten zijn, die, altijd bij den storm van 1894, bij open en afgesloten Zuiderzee voorkomen. Maar, om een dergelijke reden als er toe leidde die beide maxima met elkander te vergelijken, al komen zij niet op hetzelfde oogenblik voor, moet men, als men niet slechts één storm, maar alle plaats gehad hebbende stormen in het oog vat, op het verschil letten tusschen de maxima die bij open en bij afgesloten Zuiderzee bij al die stormen te zamen genomen, zijn voorgekomen,

al worden die beide maxima niet bij denzelfden storm gevonden. Het is duidelijk dat, indien de dijken bij den tegenwoordigen toestand tegen al de stormen die er geweest zijn voldoende bescherming hebben verleend, het voldoende zal zijn, ze met het *aldus* berekende bedrag  $\Delta h$  te verhoogen, om er ook na de afsluiting op te kunnen vertrouwen. Dit is de reden waarom de in kolom 9 opgenomen „correcties met het oog op andere stormvloeden” zijn aangebracht. Komt, om een voorbeeld te noemen, de maximale hoogte bij afgesloten Zuiderzee bij den storm van 1894 voor, maar is bij open Zuiderzee bij eenigen vroegeren storm de maximale hoogte 10 cm boven die van 1894 geweest, dan mag men het getal van kolom 8 met 10 cm verlagen, omdat de dijken tegen de bedoelde vroeger voorgekomen hoogte reeds bestand zijn gebleken. Behoort daarentegen  $h_{Zmax}$  bij den storm van 1894, maar heeft men grond om te meenen dat  $h_{Amax}$  bij een anderen storm 10 cm hoger zou geweest zijn dan voor 1894, dan moet het getal van kolom 8 met 10 cm worden verhoogd, omdat men op een mogelijke herhaling van dien vroegeren storm bedacht moet zijn.

Zooals reeds in hoofdstuk V gezegd werd, komen bij deze overwegingen alleen de stormen van 1825 en 1877 in aanmerking. Deze zullen door de letters *a* en *b* worden onderscheiden, terwijl de storm van 1894 met *c* is aangeduid.

De hoogste waarden van  $h_Z$  te Harlingen zijn voor de drie stormen uit de peilschaalwaarnemingen bekend, nl.

|            |      |      |      |
|------------|------|------|------|
|            | 1825 | 1877 | 1894 |
| $h_{Zmax}$ | 293  | 288  | 271. |

De waarde  $h_{Amax}$  werd voor 1894 in de vorige § opgegeven en met behulp van beschouwingen die in de volgende § nader zullen worden besproken ook voor de beide andere gevallen bepaald of geschat. Dit gaf

|                    |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|
|                    | 1825 | 1877 | 1894 |
| $h_{Amax}$ beneden | 334  | 350  | 334. |

Het blijkt dus dat de hoogste waarde van  $h_Z$  voorkwam in 1825 en die van  $h_A$  in 1877. Het verschil van deze hoogten, en dit is het verschil waarmede rekening moet worden gehouden, is  $350 - 293 = 57$ , d. i. 6 cm minder dan het in de vorige § gevonden getal. Dit is de beteekenis van het getal  $-6$  in kolom 9 van tabel 42. Daarachter staat in kolom 10 de verhooging waarop het aankomt, terwijl in de kolommen 11 en 12 de hoogste standen staan waarvan die verhooging het verschil is, met aanwijzing door de letters *a* en *b* van de stormen, waarvoor die hoogste standen gelden.

§ 112. *De verhooging op andere plaatsen.* Voor al de in tabel 42 opgenomen plaatsen zijn op dezelfde wijze als voor Harlingen de getallen in de eerste acht kolommen vastgesteld, waarbij hier en daar, b.v. wat den invloed der aardrotatie betreft, wel eens uit de gegevens van naburige waarnemingsstations werd geïnterpoleerd. Toen men zoo ver was gekomen moest ook voor die andere stations de storm van 1894 met de twee andere worden vergeleken. Hoe het bij open Zuiderzee met de maxima gesteld is kan men met voldoende nauwkeurigheid uit de beschikbare waarnemingen afleiden. Voor de plaatsen Helder (registreerende peilschaal), Nieuwediep, Oude Schild (Texel), Vlieland (haven), Terschelling (haven), den Oever (Wieringen), Makum, Harlingen en Nieuw Bildt zijn de hoogten rechtstreeks bekend, en voor de overige konden zij uit die gegevens worden afgeleid. Zoo kon kolom 11 geheel worden ingevuld, waarbij ter onderscheiding de rechtstreeks waargenomen getallen onderstreept zijn. Men ziet dat bij Terschelling, Ameland, en de oostzijde van Wieringen, alsmede aan de Friesche kust van Piaam tot Harlingen en te Wierum 1825 de grootste hoogten heeft gegeven; bij dezen storm zijn de Noordzeestanden hoog geweest. Daarentegen waren in 1877 deze laatste standen laag en is het alleen aan een deel der Friesche kust, dat men in kolom 11 een *b* vindt, het gevolg van de door den sterken wind teweeggebrachte opwaaiing (verg. § 65, *d*).

Om nu ook een oordeel te verkrijgen over de waterstanden die in 1825 en 1877 bij afgesloten Zuiderzee zouden zijn bereikt werd de aandacht gevestigd op den stroom die toen naar de Zuiderzee heeft geloopt. Deze is het n.l. die in hoofdzaak de door de afsluiting veroorzaakte verhoogingen bepaalt (§ 86). Ook bij groote windsterkte kan het voorkomen dat hij betrekkelijk zwak is, n.l. als men in het geheele gebied niet ver van den evenwichtstoestand is verwijderd. Dan worden de verhoogingen klein; wel bestaat in den toestand *A* een sterke opwaaiing, maar die komt ook reeds bij den toestand *Z* voor.

Voor 1825 ontbreken de gegevens om den stroom naar de Zuiderzee eenigszins nauwkeurig aan te geven, maar men kan uit de ter beschikking staande waarnemingen wel afleiden dat de vulling der Zuiderzee langzamer is geschied dan in 1894. Men heeft gemeend den stroom naar de Zuiderzee minstens 5 à 10 %, en daarom de verhoogingen 10 à 20 % lager te mogen stellen dan voor 1894. Doet men dit dan blijft  $h_{Amax}$  voor 1825 op de meeste plaatsen beneden de waarde voor 1894; alleen in het Noordoosten komt zij er iets boven. Men ziet dat aan de letters *a* in kolom 12, waarbij moet worden opgemerkt dat die voorkomen bij plaatsen waar de verhooging klein is, zoodat de vervanging van *c* door *a* toch van weinig beteekenis is.

Hierbij moge nog worden opgemerkt, dat in de gevallen waar men zoowel in kolom 12 als in kolom 11 de letter *a* vindt, zooals voor Terschelling-haven, dit wil zeggen dat als verhooging in aanmerking komt ( $h_{Amax} - h_{Zmax}$ )<sub>1825</sub> in plaats van het overeenkomstige verschil voor 1894; de correctie in kolom 9 is dan ook de bovengenoemde 20 % van het getal in kolom 8.

Er is, zooals bij de bespreking van dien storm in § 25 reeds is vermeld, nog een reden om aan te nemen dat de maxima bij afgesloten Zuiderzee in het Zuiden en Westen van de Waddenzee in 1825 niet hooger zouden zijn geweest dan in 1894. Bij eerstgenoemden storm was de stand in het Helderse zeegat lager en de wind niet sterker dan in 1894. Hieruit volgt dadelijk dat ook in de Waddenzee de maximumstanden in 1825 lager zouden zijn geweest. Alleen in het Noorden en Oosten zouden de iets hogere Noordzeestanden in 1825 den gevaarlijksten toestand hebben veroorzaakt en alleen daar is men dus genoodzaakt voor de bepaling van de stormvloedverhooging gebruik te maken van den — niet voldoende bekenden — stroom *S* naar de Zuiderzee.

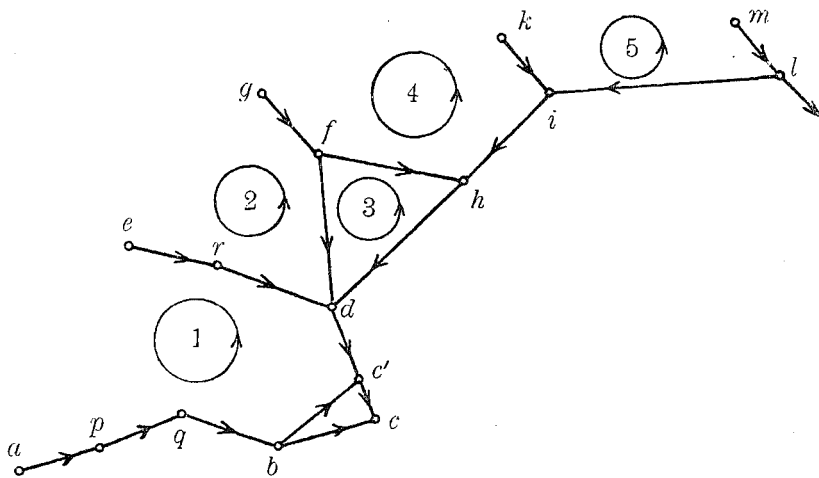
Wat den storm van 1877 (*b*) betreft, moet er, in aansluiting aan het in §§ 26 en 27 gezegde, op worden gewezen, dat de stroom naar de Zuiderzee daarbij even sterk geweest is als in 1894. Men heeft daarom aan de verhoogingen die voor dit laatste jaar waren gevonden geen andere wijzigingen aangebracht dan die uit de andere richting van den wind voortvloeien. Om die wijziging te bepalen werd van de uitkomsten der berekeningen *P*, *Q*, *R* van § 95 gebruik gemaakt. Wat de windrichting betreft komt 1894 met *P* overeen, terwijl 1877 ongeveer het midden houdt tusschen *Q* en *R*. Men kon dus uit de getallen in de tabellen van § 95 afleiden in welke verhouding de bij de berekening *U* gevonden verhooging moet worden veranderd om van 1894 tot 1877 over te gaan. Men ziet in kolom 12 van tabel 42 dat wat  $h_{Amax}$  betreft, alleen aan de Friesche kust *b* boven *c* komt. Overal elders blijft *b* beneden *c*, een gevolg van de lage Noordzeestanden in 1877.

Alles samengenomen blijkt het inacht nemen ook van andere stormen alleen aan de Friesche kust nabij den afsluitdijk een wijziging van belang ten gevolge te hebben. De vrij groote negatieve correcties die men voor dit gebied in kolom 9 vindt, zijn alle geheel of bijna geheel hieraan toe te schrijven dat blijkens de waarnemingen het water in 1825 hooger is gestegen dan in 1894 en dat de bestaande dijken geacht kunnen worden op die hooge standen van 1825 berekend te zijn.

§ 113. *Berekeningen voor het geval dat de afsluitdijk naar Zurig gelegd wordt.* De verhoogingen die in dit geval kunnen verwacht worden, kan men het best bepalen door zich voor te stellen dat eerst de dijk naar Piaam is gelegd, zoodat de tot nu toe verkregen uitkomsten gelden en dat dan door het aanbrengen van den dijk naar Zurig de driehoek den Oever—Piaam—Zurig wordt afgesneden. De veranderingen die dit in de waterhoogten zal brengen, kunnen op dezelfde wijze bepaald worden als vroeger die welke het gevolg zijn van het leggen van den dijk Wieringen—Piaam. In plaats van den toestand  $Z$  van het vroegere vraagstuk komt nu de toestand die  $A$  genoemd werd (afsluiting door een dijk naar Piaam) en in plaats van den toestand  $A$  bij de vroegere berekening komt de toestand  $A'$  die na afsluiting door een dijk naar Zurig zal bestaan. De toestanden  $A$  en  $A'$  kunnen nu op dezelfde wijze met elkaar vergeleken worden als vroeger  $Z$  en  $A$ .

De berekeningen zijn uitgevoerd in aansluiting aan de in § 95 besprokene, en wel voor de gevallen die in die § door de letters  $P$ ,  $Q$  en  $R$  zijn onderscheiden.

In het voor den toestand  $A$  aangenomen geulennet, dat in figuur 47 is voorgesteld, brengt de dijk naar Zurig de verandering die door de lijn  $b c'$



Figuur 47.

is aangewezen; van den weg  $c d$  wordt het stuk  $c c'$  afgesneden en van de geul langs den afsluitdijk wordt in de breedte een deel weggenomen. Evenals vroeger in het schema de weg langs den dijk door  $b c$  werd aangeduid, zal hij nu  $b c'$  worden genoemd.

De verkorting van  $c d$  werd op 6 km gesteld en daar de breedte van  $b c$  aan het oostelijke einde met dit bedrag wordt verminderd, terwijl zij aan het westelijke einde onveranderd blijft, werd met een vermindering der breedte van 3 km over de volle lengte gerekend. Met deze gegevens kon de in § 94 genoemde grootheid  $\Omega$  voor  $b c'$  en  $c' d$  bepaald worden.

De gemiddelde diepte op den weg  $b c'$  kan gelijk gesteld worden aan die op den weg  $b c c'$ . Daarom werd, overeenkomstig een aan het slot van § 87 gemaakte opmerking, aangenomen, dat de door den eersten term in (45) voorgestelde opwaaiing voor beide wegen even groot is en dat zij dus ook na de nieuwe afsluiting voor den kring  $a b c' d e$  even groot is als vóór de afsluiting in den kring  $a b c d e$ . Voor elk der kringen die niet zijn veranderd, blijft de opwaaiing eveneens hetzelfde en men mag dus besluiten dat de stroomvervallen in de kringen bij den toestand  $A'$  de waarden hebben, die uit de berekening van den toestand  $A$  bekend zijn. Dit is voldoende om de stroomen in  $A'$  te bepalen en vervolgens door toepassing der herhaaldelijk gebezigde grondvergelijking de hoogteverschillen  $h_{A'} - h_A$  te leeren kennen.

Voor geval  $P$  werden de uitkomsten als volgt:

TABEL 39.

Geval  $P$ .

| Geul   | $ap$   | $pq$   | $qb$   | $bc$   | $cc'$  | $bc'$  | $dc$  | $dc'$ | $rd$ | $er$ | $fd$  | $gf$  | $fh$   | $hd$ | $ih$ | $ki$  | $li$   | $ml$ |               |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------|------|------|-------|--------|------|---------------|
| $s$    | -44,00 | -44,00 | -44,00 | -44,00 | -44,00 | —      | 44,00 | 44,00 | 3,92 | 3,92 | 33,70 | 32,66 | - 1,04 | 6,38 | 7,42 | 13,75 | - 6,33 | 5,67 | $\times 10^9$ |
| $h_s$  | - 5,03 | - 5,23 | -10,65 | -19,17 | - 4,72 | -23,89 | 12,58 | 7,86  | 0,39 | 0,68 | 16,01 | 1,92  | - 0,02 | 2,40 | 0,89 | 4,31  | - 2,57 | 0,49 | cm            |
| $s'$   | -41,83 | -41,83 | -41,83 | —      | —      | -41,83 | —     | 41,83 | 2,79 | 2,79 | 33,25 | 31,71 | - 1,54 | 5,79 | 7,33 | 13,55 | - 6,22 | 5,78 | $\times 10^9$ |
| $h'_s$ | - 4,55 | - 4,72 | - 9,63 | —      | —      | -27,12 | —     | 7,17  | 0,20 | 0,34 | 15,59 | 1,81  | - 0,05 | 1,98 | 0,87 | 4,19  | - 2,48 | 0,51 | cm            |

TABEL 40.

Extra verhooging bij afsluiting naar Zurig; geval  $P$ .

| $p$    | $q$    | $b$    | $c'$ | $d$  | $r$  | $f$  | $h$  | $i$  | $l$ |    |
|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|-----|----|
| - 0,48 | - 0,99 | - 2,01 | 1,22 | 0,53 | 0,34 | 0,11 | 0,14 | 0,10 | —   | cm |

In geval  $R$  blijven de vroeger gevonden hoogten onveranderd, een gevolg hiervan, dat in dit geval in den toestand  $A$  geen stroom in  $abcd$  loopt, zoodat het afsnijden van het gebied  $bcc'$  geen invloed heeft. In geval  $Q$  eindelijk hebben de stroomen na de afsluiting naar Piaam tegengestelde richting maar nagenoeg dezelfde sterkte als in geval  $P$ ; dit brengt mede dat de veranderingen  $h_{A'} - h_A$  dan het tegengestelde teeken, maar vrijwel dezelfde grootte hebben als in geval  $P$ .

De voornaamste bron van onzekerheid bij de nu besproken berekeningen is deze, dat het moeilijk is te zeggen hoeveel de breedte van  $bc$  moet worden verkleind. Naar een gemaakte schatting zou men voor de verschillen  $h_{A'} - h_A$  nog niet de helft van de gevonden waarden krijgen als de vermindering der breedte op 2 in plaats van op 3 km werd gesteld, en zou men tot tweemaal zoo groote waarden komen als voor die vermindering 4 km werd genomen. Men ziet intusschen dat wel in geen geval in eenig punt der overblijvende Waddenzee de verlegging van den afsluitdijk van Piaam naar Zurig een verandering van meer dan 5 cm zal teweegbrengen.

Het is dan ook eigenlijk ten overvloede dat in tabel 42 in kolom 13 de waarden van  $h_{A'} - h_A$  zijn opgenomen, en wel de waarden berekend voor geval  $P$ , omdat dit aan den toestand in 1894 beantwoordt.

Door deze waarden bij de getallen van kolom 8 op te tellen krijgt men kolom 14, die, als de dijk naar Zurig gelegd wordt, in plaats van 8 komt. Evenzoo moeten dan de kolommen 9, 10 en 12 door 15, 16 en 17 worden vervangen, terwijl natuurlijk kolom 11 blijft gelden.

De getallen van kolommen 16 en 17 verschillen weinig van de overeenkomstige waarden in de kolommen 10 en 12. Waar verschil bestaat zijn 16 en 17 lager. Men zal opmerken dat in alle gevallen waar dit zich voordoet, een  $c$  staat. Dan is het de storm van 1894 die den hoogsten stand na de afsluiting bepaalt en moet de in tabel 40 aangegeven correctie, die juist voor de nu bedoelde plaatsen negatief is, worden aangebracht. Anders is het als in kolom 12 een  $b$  wordt gevonden, zooals bij Harlingen. De in kolom 13 staande correctie moet nu niet in rekening worden gebracht omdat het niet op den storm waarvoor deze werd berekend aankomt. Men had nu de correctie voor 1877 moeten invoeren, die in dit geval negatief is, maar daar zij nog minder bedraagt dan het cijfer voor 1894 is in kolom 17 hetzelfde getal geschreven als in 12.

Het zal opvallen dat voor den Oever in kolom 17 een  $b$  staat en niet  $c$  zooals in 12. Dit hangt hiermede samen dat voor deze plaats de kleine verandering met - 2 (kolom 13) voldoende is om de maximale hoogte na de afsluiting voor den storm 1894 beneden die voor 1877 te brengen. Maar natuurlijk hebben de kleine verschillen waarvan hier sprake is geen waarde.

De einduitkomst is dat, practisch gesproken, in alle plaatsen benoorden de lijn den Oever—Zurig de hoogten dezelfde zullen worden, onverschillig

of de afsluiting langs die lijn of langs de lijn den Oever—Piaam geschiedt.

Voor zoover de stormvloedden aangaat, bestaat de groote beteekenis van eerstgenoemde dijkrichting in het binnendijken van het kustgedeelte Zurig—Piaam, waar de grootste waarden van de verhooging voorkomen.

Dat de verhooging zoo snel van Zurig in zuidwaartsche richting toeneemt (kolom 8), staat in verband met den sterken stroom die bij open Zuiderzee in dit gebied van betrekkelijk kleine diepte langs de Friesche kust trekt (figuur 40).

§ 114. *Mate van zekerheid der uitkomsten.* De voor de verhooging gevonden getallen berusten deels op de aangenomen getalwaarden, zooals de afmetingen van de dwarsprofielen der geulen, de sterkte van den stroom naar de Zuiderzee, de constante van EYTELWEIN, en den exponent in de weerstandswet, deels op de gebezigde theoretische beschouwingen. Het is nu van belang na te gaan, vooreerst of er wellicht in deze grondslagen iets is, dat de strekking heeft de uitkomsten te hoog of te laag te doen zijn, zoodat men, om de meest waarschijnlijke waarden te vinden, nog een correctie zou moeten aanbrengen, en ten tweede, welke afwijkingen van die meest waarschijnlijke waarden verwacht of mogelijk geacht moeten worden. Bij de volgende hierop betrekking hebbende overwegingen zullen de veranderingen of afwijkingen steeds in procenten van de gevonden verhoogingen worden uitgedrukt.

Wat de eerste vraag betreft, is het duidelijk dat, wanneer men reden heeft te denken dat fouten of onjuiste opvattingen in verschillende grondslagen de uitkomst een weinig, stel  $p$ ,  $p'$ ,  $p''$ , enz.  $\%$ , van de werkelijkheid hebben doen afwijken, telkens in een bepaalde door het teeken van het getal aangewezen richting, de correctie die men moet aanbrengen om de waarschijnlijkste waarde te vinden door de algebraïsche som  $p + p' + p'' +$  enz. bepaald wordt. Maar het is anders gesteld met de invloeden of onzekerheden die zoowel naar den eenen als naar den anderen kant kunnen gaan. Geeft, wat den eersten grondslag betreft, het (positief genomen) getal  $f$  aan hoeveel de uitkomst naar boven of beneden van de waarschijnlijkste waarde kan afwijken, en wordt op dezelfde wijze, wat de andere grondslagen aangaat, de mate van onzekerheid door de getallen  $f'$ ,  $f''$ , enz. aangewezen, dan zou men te ongunstig over de waarde der uitkomst oordeelen als men zich op positieve of negatieve afwijkingen van de absolute grootte  $f + f' + f'' +$  enz. voorbereidde. Men moet nl. rekening houden met de mogelijkheid en zelfs de waarschijnlijkheid van een compensatie; de uitkomst kan, wat één grondslag aangaat te groot, en wat een anderen betreft te klein zijn uitgevallen. Het is alsof men met van elkaar onafhankelijke toevallige waarnemingsfouten te doen had. Deze analogie leidt er toe, bij gebrek aan beter en om eenigszins een quantitative beoordeeling van de beteekenis der uitkomsten te krijgen, de grootheid

$$\sqrt{f^2 + f'^2 + f''^2 + \text{enz.}} \quad (69)$$

als maat voor de overgebleven onzekerheid te beschouwen.

Hierbij moge nog worden opgemerkt dat, wanneer in het geval van waarnemingsfouten  $f$ ,  $f'$ ,  $f''$ , ... middelbare fouten voorstellen, de grootheid (69) de *middelbare* resulterende fout is. Men kan echter ook onder  $f$ ,  $f'$ ,  $f''$ , zoodanig veelvoud van de middelbare fout verstaan, stel b.v. het drievoud, dat afwijkingen boven die veelvouden redelijkerwijze geacht kunnen worden zoo goed als niet voor te komen; dan is de wortelgrootheid hetzelfde veelvoud van de resulterende middelbare fout en heeft dus een dergelijke beteekenis als  $f$ ,  $f'$ ,  $f''$  ... elk afzonderlijk.

In de volgende beschouwingen zullen op overeenkomstige wijze de grootheden  $f$ ,  $f'$ ,  $f''$ , ... en ook de uitdrukking (69) de grootste afwijkingen die te verwachten zijn voorstellen.

Thans zal worden nagegaan welke waarden, wat de verschillende grondslagen betreft, aan  $f$ , en eventueel aan  $p$ , kunnen worden toegeschreven.

Het behoeft nauwelijks gezegd te worden dat hier slechts van betrekkelijk ruwe schattingen sprake is, schattingen die veelal berusten op den indruk dien men krijgt als men de berekeningen uitvoert en met verschillende gegevens of onderstellingen herhaalt.

a. Bij de berekeningen werd aan elke geul over zijn volle lengte dezelfde breedte en diepte toegekend, en deze werden zoo gekozen dat het watervolume overeenkwam met dat van het zeegebied dat door de geschematiseerde geul wordt voorgesteld. Dit laatste is herhaaldelijk gecontroleerd en aan elke geul is dus wel het behoorlijke gemiddelde profiel, wat de waterberging betreft, gegeven. Maar bij een geul waarvan het profiel niet overal even groot is begaat men, wat den weerstand betreft, een fout als men met het zoeven bedoelde gemiddelde profiel rekent; men schat dan den weerstand te klein. Om den invloed daarvan op de gevonden verhoogingen na te gaan kan men opmerken dat, ruw genomen, de hoogteverschillen die na de afsluiting meer dan vroeger zullen bestaan gelijk zijn aan die welke een gegeven stroom teweeg kunnen brengen; dit volgt uit de in § 81 medegedeelde beschouwingen. Rekent men met te groote weerstanden, dan vindt men ook de hoogteveranderingen te groot.

De afwijkingen der dwarsprofielen van het gemiddelde kunnen tot 20 % bedragen en dientengevolge kunnen de verhoogingen b. v. 3 % te klein zijn uitgevallen.

Van meer belang is echter nog de onzekerheid in de grootte der gemiddelde doorsneden. Deze kan in de eene of andere richting 5 % bedragen, waaraan in de einduitkomst een onzekerheid van 10 % beantwoordt.

b. Er zijn geen pogingen gedaan (met uitzondering van wat in § 48 gezegd werd) om de veranderingen in diepte die na de afsluiting door uitschuren en aanslibben ontstaan zullen, in rekening te brengen. Redenen om hiervan een invloed in bepaalde richting op de verhoogingen te verwachten schijnen er niet te zijn, maar wel vergrooten deze veranderingen de onzekerheid der uitkomsten.

Men heeft gemeend op dezen grond een onzekerheid van 5 % in rekening te moeten brengen.

c. Zooals reeds in § 93 gezegd werd, mag men verwachten dat bij het daar besproken vereffenen de aansluiting aan de werkelijkheid in het algemeen beter zal worden. Maar de vraag rijst welke onzekerheid in de waterhoogten wordt ingevoerd als men zoo goed mogelijk figuur 43 teekent en daaraan de hoogten ontleent.

Het is gebleken dat, wanneer eenmaal de stroomsnelheden in de kaartjes van fig. 40 en 41 zijn gegeven, over het algemeen aan de uitkomsten voor de verhooging in figuur 43 weinig valt te veranderen.

Met name is het niet mogelijk bij den afsluitdijk de cijfers meer dan een enkelen centimeter lager of hooger te krijgen.

Er zijn echter ook plaatsen waar het anders is, in het bijzonder Harlingen en de binnenzijde van Vlieland. Wat deze laatste betreft, geeft de aanwezigheid van den Vliehors moeilijkheden. Wel ligt deze zandvlakte  $1\frac{1}{2}$  meter onder stormvloedpeil, maar zelfs bij de hoogste waterstanden is bij den zeer sterken golfslag (de volle Noordzeebranding langs den buitenrand) aan een stroom met de gebezigde formules overeenkomende nauwelijks te denken. Hiermede is wel rekening gehouden door voor  $C$  een veel kleinere waarde dan elders in te voeren (grootte weerstand), maar of men nu  $C^2 = 100\,000$  of  $200\,000$  moet nemen, is niet te zeggen.

De toestand in het ten zuidwesten van Vlieland liggende, eveneens ondiepe, gebied is afhankelijk van wat er op den Vliehors gebeurt, zoodat daar een onzekerheid bestaat, die bij de haven nog niet groot is, maar meer naar het Eierlandsche zeevat zeker een tiental centimeters zal bedragen.

Wat Harlingen betreft moet worden opgemerkt, dat de verhooging in een of ander punt in het kaartje van figuur 43 alleen dan met redelijke zekerheid kan worden bepaald als men dat punt kan bereiken langs een lijn voor welke

het stroomverval aan de gegevens van de kaartjes fig. 40 en 41 tamelijk nauwkeurig kan worden ontleend. In deze gunstige omstandigheden bevindt men zich waar de diepe geulen dicht onder de kust komen, zooals bij Zurig en verder zuidwaarts. Maar Harlingen kan men slechts bereiken langs een weg die de stroombanen onder grooten hoek snijdt, zoodat een fout in dien hoek een grooten invloed op het stroomverval heeft, of langs de kust gaande, waar het onzeker is hoe het stroomverval over de verschillende deelen der lijn is verdeeld. Men kan dan ook zonder in onwaarschijnlijkheden te vervallen, zoodanige stroomverdeelingen bedenken (b.v. een sterkere of zwakkere circulatie om Griend) dat de verhooging te Harlingen in figuur 43 5 à 10 cm verandert.

Alles samengenomen heeft men gemeend de onzekerheid die bij het vereffenen ontstaat op 5 % te kunnen schatten.

*d.* Een redeneering, zooals boven onder *a* werd gebezigd, leert dat de verhoogingen ten naaste bij evenredig zijn met de tweede macht van den stroom *S* naar de Zuiderzee, en dat dus een fout of een onzekerheid in dezen zich in verdubbelde mate in de verhoogingen doet gevoelen. Nu is bij nauwkeurige planimetreering gebleken dat de oppervlakte ten zuiden der lijn Wieringen–Piaam niet, zooals eerst was aangenomen, 3600 km<sup>2</sup>, maar 3420 km<sup>2</sup>, dus 5 % minder bedraagt. De uit de aanwijzingen der peilschalen rondom dit gebied afgeleide stroom *S* wordt daardoor eveneens 5 % zwakker; de waarschijnlijke verhooging wordt om deze reden 10 % kleiner dan de berekende.

Dat de stroom te sterk ondersteld is wordt eenigszins hierdoor bevestigd, dat uit de berekeningen zoowel voor den stationairen als voor den niet-stationairen toestand bleek dat men tot vrij hoge Noordzeestanden en een lagen stand bij Vrouwenzand moet komen om bij den gegeven wind in het gegeven geulennet een stroom van 210 000 m<sup>3</sup> per seconde naar de Zuiderzee te laten gaan. Een sterkere stroom zou niet goed mogelijk zijn geweest, een zwakkere wel.

Over de fouten die bij het afleiden van de stroomen uit de aanwijzingen van een beperkt aantal peilschalen kunnen worden gemaakt werd reeds in §§ 17 en 24 gesproken. Ofschoon zij bij het tegenwoordig aantal peilschalen betrekkelijk gering zijn, moest toch de hieruit voortvloeiende onzekerheid in de uitkomsten op 10 % worden gesteld. Dat dit gelijk is aan het bedrag, waarmede de uitkomst waarschijnlijk moet worden verminderd, wil zeggen dat de stroom waarmede werd gerekend, wel de sterkste is dien men kan aannemen.

*e.* De ervaring bij de herhaalde berekeningen over de niet-stationaire toestanden (§§ 100 en 101) heeft er toe geleid, de onzekerheid die uit onvolgende kennis van den coëfficiënt  $\chi$  voortvloeit, op 8 % te schatten.

*f.* De uitkomsten blijven altijd eenigszins afhankelijk van de bijzonderheden in de waterbeweging vóór de afsluiting of, kan men ook zeggen, van de stroomen die na de afsluiting blijven bestaan. Intusschen heeft men op grond van de berekeningen voor de gevallen *P*, *Q* en *R* (§ 95), die in dit opzicht zeer uiteenloopen, gemeend dat in verband hiermede niet meer dan 3 % onzekerheid bestaat.

*g.* Omtrent het bedrag der correcties voor de aardrotatie, de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI blijft vrij groote twijfel bestaan. De eerste, de grootste van alle, is nog redelijk te bepalen, maar in de uitwerking der centrifugaalkracht b.v. blijft een onzekerheid bestaan bijna even groot als die uitwerking zelf. Voor de algebraïsche som der drie correcties mag wel op een onzekerheid van 25 % van het bedrag zelf gerekend worden.

Gelukking zijn de correcties niet groot; zij bedragen gemiddeld 15 % van de verhooging, zoodat de onzekerheid in deze laatste 4 % wordt.

*h.* Van veel belang is de grootte der constante van EYTELWEIN *C*. Voor normaal getij met matigen wind en vrij zwakke golfbeweging is waarschijnlijk de waarde 530 nog een weinig te laag (§ 14 en bijlage 4).

Maar bij een storm worden wegens de heftiger turbulentie de weerstanden grooter; dan is 530 wel de grootste waarde die kan worden aangenomen.

Een onderste grens hebben berekeningen over de beweging in de zee-gaten bij den storm van 6/7 November 1921 geleverd. Uit de water-standen binnen en buiten is met verschillende waarden van  $C$  de vulling van Waddenzee en Zuiderzee afgeleid. Het best slaagde men met  $C = 480$  à  $485$  (§ 21).

Bij den storm van 1894 zal de coëfficiënt zelfs in de zeegaten wat grooter zijn geweest, want de wind was niet zoo sterk en het water stond hooger, wat beide strekt om den weerstand kleiner te maken.

De meest aannemelijke waarde van  $C$  zal niet ver van 500 liggen, zooals werd aangenomen. Waarschijnlijk ligt zij iets hooger. Neemt men 508 of 510 aan, dan worden de verhoogingen 3 à 4 % kleiner. Rekent men verder met 530 en 485 als uiterste waarden van  $C$ , welke waarden van het gemiddelde 508 met 4 % afwijken, dan komt men tot een onzekerheid in de verhoogingen van 8 %. Dit blijkt uit tabel 37 van § 109.

*i.* Alle metingen van den laatsten tijd wijzen er op, dat de exponent in de weerstandswet kleiner dan 2 is, maar, althans in niet zeer gladde waterleidingen, *niet veel* kleiner. Getijberekeningen met een weerstand evenredig aan  $v^{1,75}$  (bijlage 9) geven even goede uitkomsten als die met een weerstand evenredig aan  $v^2$ . Beschouwt men 2 en 1,75 als uiterste waarden van den exponent en het gemiddelde 1,875 als de meest waarschijnlijke waarde, dan vindt men, gebruik makende van het in § 109, *d* gezegde, dat de gevonden verhoogingen met 3 % verkleind kunnen worden en dat de onzekerheid 3 % bedraagt.

In de volgende tabel 41 zijn, met een korte aanwijzing der verschillende grondslagen, de waarden van  $p$  en  $f$  vereenigd. Een positieve waarde van  $p$  wil zeggen dat de gevonden verhooging vergroot moet worden.

TABEL 41.

|           |   | $p$  | $f$ | $f^2$ |
|-----------|---|------|-----|-------|
| <i>a.</i> | Dwarsprofielen der geulen . . . . .           | 3    | 10  | 100   |
| <i>b.</i> | Verandering der geulen na de afsluiting . .   |      | 5   | 25    |
| <i>c.</i> | Vereffening . . . . .                         |      | 5   | 25    |
| <i>d.</i> | Stroom naar de Zuiderzee . . . . .            | — 10 | 10  | 100   |
| <i>e.</i> | Correctie voor het niet-stationair zijn . . . |      | 8   | 64    |
| <i>f.</i> | Overblijvende stroomen . . . . .              |      | 3   | 9     |
| <i>g.</i> | Aardrotatie enz. . . . .                      |      | 4   | 16    |
| <i>h.</i> | Constante van EYTELWEIN . . . . .             | — 3  | 8   | 64    |
| <i>i.</i> | Exponent in de weerstandswet . . . . .        | — 3  | 3   | 9     |
|           |   | — 13 |     | 412   |

Volgens deze schattingen zal de berekende  $\Delta h$  dus met 13 % verlaagd mogen worden, waardoor men op 0,87  $\Delta h$  als meest waarschijnlijke waarde komt.

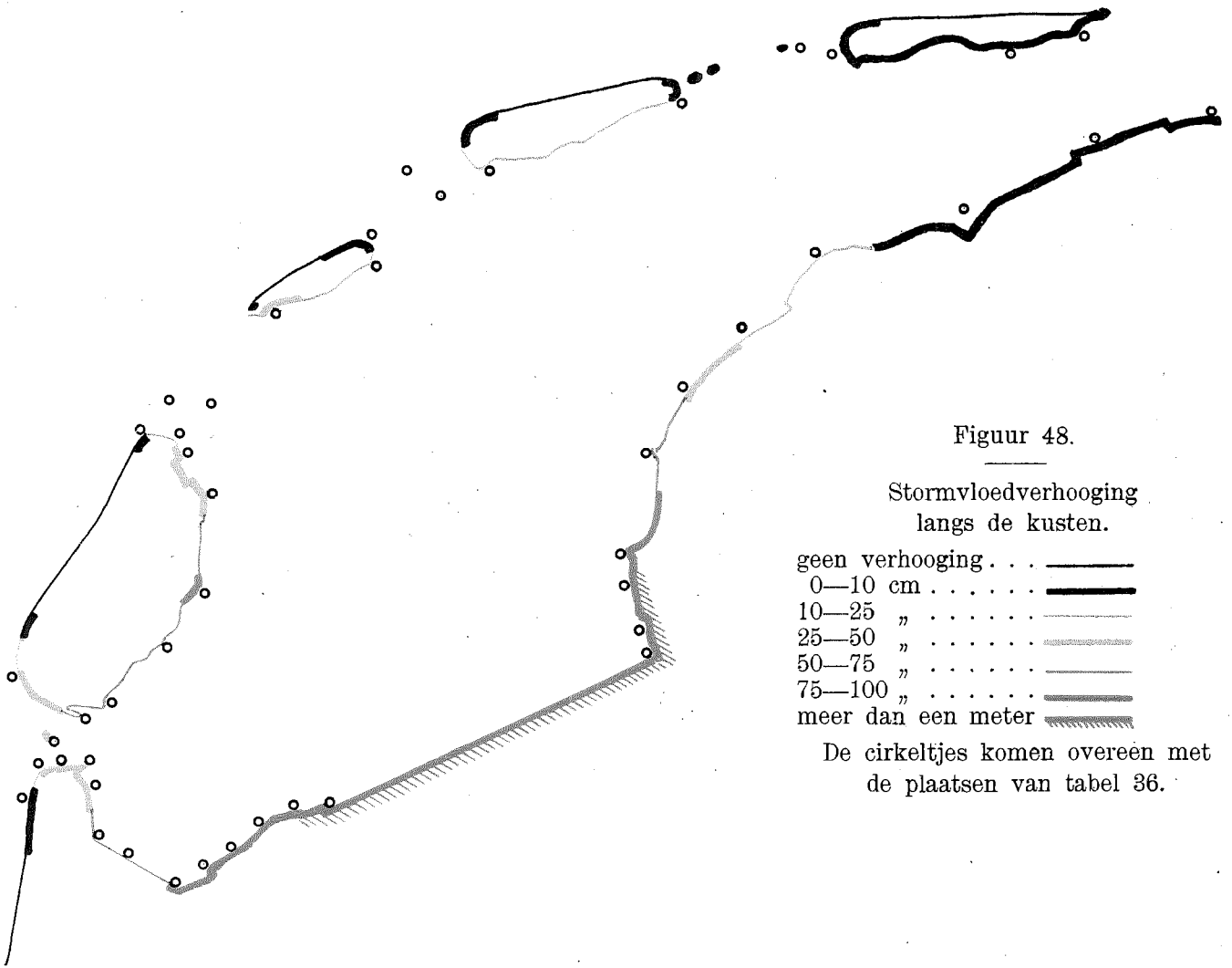
Verder is  $\sqrt{\sum f^2} = 20$ , en de afwijkingen van 0,87  $\Delta h$  zullen dus op 20 % daarvan naar den eenen of den anderen kant kunnen gesteld worden. Dit geeft als uiterste waarden

$$0,70 \Delta h \text{ en } 1,04 \Delta h.$$

Met het oog hierop zijn de getallen van kolom 16 in tabel 42 nu nog met 5 % verhoogd, waardoor kolom 18 verkregen is. Ter wille van de uniformiteit is hiermede voor de geheele tabel een zelfde correctie aangebracht, en zal ook voortaan gewoonlijk van de getallen, zooals zij daardoor worden, sprake zijn. *Intusschen met het oog op het in deze § onder c besprokene is het raadzaam het maximum voor Harlingen nog 5 à 10 cm hooger te stellen.*

TABEL 42.

|                       | PLAATS.                               | Stationair. | Factor $\alpha$ niet-stationair. | Niet-stationair. | Aardrotatie (CORIOLIS). | Centrifugaal-krachten. | Snelheidshoogte (BERNOULLI). | Windwrijving oppervlaktekracht. | Verhooging stormvloed 1894; dijk naar Piaam. | Correctie met het oog op andere stormvloeden. | Gecorrigeerde verhooging; dijk naar Piaam. | Hoogste stand open Zuideerzee. | Hoogste stand af-gesloten Zuideerzee; dijk naar Piaam. | Correctie verleggen van den dijk naar Zuring; 1894. | Verhooging stormvloed 1894; dijk naar Zuring. | Correctie met het oog op andere stormvloeden. | Gecorrigeerde verhooging; dijk naar Zuring. | Hoogste stand af-gesloten Zuideerzee; dijk naar Zuring. | Verhooging vermeerderd met ongeveer 5 %. | Diepte onder N.A.P. (cm). |                  | PLAATS.             |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|---|--|--------------------------------|--|---|---|---|---|---|--|---------------------------|------------------|---------------------|
|                       |                                       | 1           | 2                                | 3                | 4                       | 5                      | 6                            | 7                               | 8  | 9   | 10   | 11                             | 12   | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18                                       | 19                        | 20               |                     |
| Ameland.              | Oerd . . . . .                        | 2           | 1,50                             | 3                | 0                       | 0                      | 0                            | 0                               | 3  | 0   | 3  | 370a                           | 373a   | 0   | 3   | 0   | 3   | 373a  | 3  | strand.                   |                  | Oerd.               |
|                       | Nes . . . . .                         | 3           | 1,45                             | 4                | 0                       | 0                      | 0                            | 0                               | 4  | 0   | 4  | 360a                           | 364a   | 0   | 4   | 0   | 4   | 364a  | 4  | 50 0                      |                  | Nes.                |
|                       | Strandpaal I . . . .                  | 3           | 1,42                             | 4                | 1                       | 0                      | 1                            | 0                               | 6  | 0   | 6  | 365a                           | 371a   | 0   | 6   | 0   | 6   | 371a  | 6  | strand.                   |                  | Strandpaal I.       |
| Ter-schelling.        | Strandpaal XXX . . .                  | 3           | 1,42                             | 4                | -1                      | 0                      | 1                            | 0                               | 4  | 0   | 4  | 365a                           | 369a   | 0   | 4   | 0   | 4   | 369a  | 4  | strand.                   |                  | Strandpaal XXX.     |
|                       | Grie . . . . .                        | 9           | 1,40                             | 13               | 2                       | -1                     | 0                            | 0                               | 14   | -2  | 12   | 330a                           | 342a   | 0   | 14  | -2  | 12  | 342a  | 13                                       | 0 0                       |                  | Grie.               |
|                       | Haven . . . . .                       | 8           | 1,40                             | 11               | 4                       | -2                     | 0                            | 0                               | 13   | -3  | 10   | 290a                           | 300a   | 0   | 13  | -3  | 10  | 300a  | 11                                       | 800 0                     |                  | Haven.              |
|                       | Spathoek . . . . .                    | 7           | 1,40                             | 10               | 4                       | -1                     | 1                            | 0                               | 14   | -3  | 11   | 305a                           | 316a   | 0   | 14  | -3  | 11  | 316a  | 12                                       | strand.                   |                  | Spathoek.           |
|                       | Strandpaal II 3400 . .                | 5           | 1,42                             | 7                | 3                       | 0                      | 3                            | 0                               | 13   | -1  | 12   | 315a                           | 327c   | 0   | 13  | -1  | 12  | 327c  | 13                                       | strand.                   |                  | Strandpaal II 3400. |
| Vlieland.             | Strandhoofd 62. . . .                 | 6           | 1,42                             | 9                | -3                      | 0                      | 3                            | 0                               | 9  | 0   | 9  | 315c                           | 324c   | 0   | 9   | 0   | 9   | 324c  | 9  | strand.                   |                  | Strandhoofd 62.     |
|                       | Haven . . . . .                       | 10          | 1,40                             | 14               | -2                      | 1                      | 2                            | 0                               | 15   | 0   | 15   | 287c                           | 302c   | 0   | 15  | 0   | 15  | 302c  | 16                                       | 300 0                     |                  | Haven.              |
|                       | Posthuis . . . . .                    | 20          | 1,40                             | 28               | 0                       | 1                      | 1                            | 0                               | 30   | 0   | 30   | 260c                           | 290c   | 0   | 30  | 0   | 30  | 290c  | 32                                       | 0 10                      |                  | Posthuis.           |
|                       | Strandpaal M . . . .                  | 20          | 1,40                             | 28               | 0                       | 0                      | 2                            | 1                               | 31   | 0   | 31   | 265c                           | 296c   | 0   | 31  | 0   | 31  | 296c  | 33                                       | strand.                   |                  | Strandpaal M.       |
|                       | Strandpaal 34 . . . .                 | 8           | 1,42                             | 11               | 1                       | 0                      | 1                            | 0                               | 13   | 0   | 13   | 295c                           | 308c   | 0   | 13  | 0   | 13  | 308c  | 14                                       | strand.                   |                  | Strandpaal 34.      |
| Texel.                | Strandpaal 30 . . . .                 | 8           | 1,42                             | 11               | -1                      | 0                      | 1                            | 0                               | 11   | 0   | 11   | 295c                           | 306c   | 0   | 11  | 0   | 11  | 306c  | 12                                       | strand.                   |                  | Strandpaal 30.      |
|                       | Strandpaal 32 . . . .                 | 15          | 1,39                             | 21               | -1                      | 0                      | 2                            | 1                               | 23   | 0   | 23   | 285c                           | 308c   | 0   | 23  | 0   | 23  | 308c  | 24                                       | strand.                   |                  | Strandpaal 32.      |
|                       | Volharding . . . . .                  | 20          | 1,37                             | 27               | 0                       | 0                      | 2                            | 1                               | 30   | 0   | 30   | 275c                           | 305c   | 0   | 30  | 0   | 30  | 305c  | 32                                       | 1000 0                    |                  | Volharding.         |
|                       | Eendracht . . . . .                   | 30          | 1,34                             | 40               | 1                       | -1                     | 1                            | 0                               | 41   | 0   | 41   | 265c                           | 306c   | 0   | 41  | 0   | 41  | 306c  | 43                                       | 0 10                      |                  | Eendracht.          |
|                       | Oostkaap . . . . .                    | 58          | 1,29                             | 75               | 2                       | -2                     | 1                            | 0                               | 76   | 0   | 76   | 245c                           | 321c   | -1  | 75  | 0   | 75  | 320c  | 79                                       | 250 10                    |                  | Oostkaap.           |
|                       | Oude Schild . . . . .                 | 47          | 1,28                             | 60               | 2                       | -1                     | 2                            | 0                               | 63   | 0   | 63   | 254c                           | 317c   | -1  | 62  | 0   | 62  | 316c  | 65                                       | 150 10                    |                  | Oude Schild.        |
|                       | Horntje . . . . .                     | 38          | 1,30                             | 49               | 1                       | -1                     | 5                            | 0                               | 54   | 0   | 54   | 250c                           | 304c   | 0   | 54  | 0   | 54  | 304c  | 57                                       | 2000 0                    |                  | Horntje.            |
|                       | Stuifdijk . . . . .                   | 33          | 1,30                             | 43               | 0                       | -1                     | 8                            | 0                               | 50   | 0   | 50   | 245c                           | 295c   | 0   | 50  | 0   | 50  | 295c  | 52                                       | 2000 0                    |                  | Stuifdijk.          |
|                       | Onrust . . . . .                      | 28          | 1,31                             | 37               | 1                       | 0                      | 10                           | 0                               | 48   | 0   | 48   | 240c                           | 288c   | 0   | 48  | 0   | 48  | 288c  | 50                                       | strand.                   |                  | Onrust.             |
|                       | Strandpaal 13 . . . .                 | 10          | 1,33                             | 13               | 8                       | 2                      | 5                            | 0                               | 28   | 0   | 28   | 280c                           | 308c   | 0   | 28  | 0   | 28  | 308c  | 29                                       | strand.                   |                  | Strandpaal 13.      |
| Noordholland.         | Huisduinen . . . . .                  | 10          | 1,33                             | 13               | -8                      | -2                     | 5                            | 0                               | 8  | 0   | 8  | 295c                           | 303c   | 0   | 8   | 0   | 8   | 303c  | 8  | strand.                   |                  | Huisduinen.         |
|                       | Kaaphoofd . . . . .                   | 26          | 1,32                             | 34               | -3                      | 0                      | 10                           | 0                               | 41   | 0   | 41   | 250c                           | 291c   | 0   | 41  | 0   | 41  | 291c  | 43                                       | 4000 0                    |                  | Kaaphoofd.          |
|                       | Helder (p. s.) . . . .                | 28          | 1,31                             | 37               | -5                      | 0                      | 10                           | 0                               | 42   | 0   | 42   | 248c                           | 290c   | 0   | 42  | 0   | 42  | 290c  | 44                                       | 3000 0                    |                  | Helder (p. s.).     |
|                       | Wierhoofd . . . . .                   | 32          | 1,30                             | 42               | -6                      | 1                      | 4                            | 0                               | 41   | 0   | 41   | 260c                           | 301c   | 0   | 41  | 0   | 41  | 301c  | 43                                       | 2500 0                    |                  | Wierhoofd.          |
|                       | Oostoever . . . . .                   | 38          | 1,29                             | 49               | -8                      | 1                      | 4                            | 0                               | 46   | 0   | 46   | 260c                           | 306c   | 0   | 46  | 0   | 46  | 306c  | 48                                       | 0 15                      |                  | Oostoever.          |
|                       | de Kooi . . . . .                     | 45          | 1,28                             | 58               | -12                     | 2                      | 3                            | 0                               | 51   | 0   | 51   | 265c                           | 316c   | 0   | 51  | 0   | 51  | 316c  | 54                                       | 0 15                      |                  | de Kooi.            |
|                       | Balgdijk midden van Ewijcksluis . . . | 56          | 1,26                             | 71               | -16                     | 3                      | 4                            | 0                               | 62   | 0   | 62   | 260c                           | 322c   | -1  | 61  | 0   | 61  | 321c  | 64                                       | 0 15                      |                  | Balgdijk midden.    |
| van Ewijcksluis . . . | 67                                    | 1,25        | 84                               | -19              | 3                       | 8                      | 0                            | 76                              | 0  | 76  | 247c                                       | 323c                           | -1   | 75  | 0   | 75  | 322c  | 79  | 50 20                                    |                           | van Ewijcksluis. |                     |
| Wieringen.            | Quarantaine . . . . .                 | 67          | 1,23                             | 82               | -18                     | 3                      | 8                            | 0                               | 75   | 0   | 75   | 245c                           | 320c   | -1  | 74  | 0   | 74  | 319c  | 78                                       | 300                       |                  | Quarantaine.        |
|                       | Normerven . . . . .                   | 75          | 1,21                             | 91               | -17                     | 2                      | 3                            | 0                               | 79   | 0   | 79   | 250c                           | 329c   | -1  | 78  | 0   | 78  | 328c  | 82                                       | 50 30                     |                  | Normerven.          |
|                       | Rinkewielsdijk . . . .                | 82          | 1,19                             | 98               | -16                     | 1                      | 1                            | -1                              | 83   | -1  | 82   | 250a                           | 332c   | -2  | 82  | -1  | 81  | 331c  | 85                                       | 0 35                      |                  | Rinkewielsdijk.     |
|                       | Bierdijk . . . . .                    | 90          | 1,17                             | 105              | -15                     | 2                      | 2                            | -1                              | 93   | -1  | 92   | 245a                           | 337c   | -2  | 92  | -1  | 91  | 336c  | 96                                       | 100 30                    |                  | Bierdijk.           |
|                       | den Oever . . . . .                   | 101         | 1,15                             | 116              | -14                     | 3                      | 6                            | -1                              | 110  | -2  | 108  | 235a                           | 343c   | -2  | 108   | 0   | 108   | 343b  | 113                                      | 200 25                    |                  | den Oever.          |
| Friesland.            | Piaam . . . . .                       | 127         | 1,06                             | 135              | 18                      | -1                     | 3                            | -1                              | 154  | -30   | 124  | 275a                           | 399c   | -   | -   | -   | -   | -   | (130)                                    | 0                         |                  | Piaam.              |
|                       | Makkum . . . . .                      | 115         | 1,08                             | 124              | 17                      | -1                     | 3                            | -1                              | 142  | -29   | 113  | 280a                           | 393b c   | -   | -   | -   | -   | -   | (119)                                    | 0                         |                  | Makkum.             |
|                       | Kornwerd . . . . .                    | 95          | 1,11                             | 105              | 16                      | -1                     | 3                            | -1                              | 122  | -23   | 99   | 285a                           | 384b   | -   | -   | -   | -   | -   | (104)                                    | 50                        |                  | Kornwerd.           |
|                       | Zurig . . . . .                       | 80          | 1,15                             | 92               | 14                      | 0                      | 3                            | -1                              | 108  | -18   | 90   | 290a                           | 380b   | 2   | 110   | -20   | 90  | 380b  | 94                                       | 200                       |                  | Zurig.              |
|                       | Harlingen . . . . .                   | 40          | 1,25                             | 50               | 12                      | -1                     | 3                            | -1                              | 63   | -6  | 57   | 293a                           | 350b   | 1   | 64  | -7  | 57  | 350b  | 60                                       | 500                       |                  | Harlingen.          |
|                       | Roptazijl . . . . .                   | 30          | 1,27                             | 38               | 8                       | -1                     | 2                            | 0                               | 47   | -1  | 46   | 325a b                         | 371b   | 0   | 47  | -1  | 46  | 371b  | 48                                       | 350                       |                  | Roptazijl.          |
|                       | Oosterbierum . . . . .                | 13          | 1,30                             | 17               | 3                       | 0                      | 1                            | 0                               | 21   | 0   | 21   | 360b                           | 381b   | 0   | 21  | 0   | 21  | 381b  | 22                                       | 200                       |                  | Oosterbierum.       |
|                       | Nieuw Bildt . . . . .                 | 8           | 1,33                             | 11               | 1                       | 0                      | 0                            | 0                               | 12   | 0   | 12   | 391b                           | 403b   | 0   | 12  | 0   | 12  | 403b  | 13                                       | 150                       |                  | Nieuw Bildt.        |
|                       | Hallum . . . . .                      | 5           | 1,38                             | 7                | 0                       | 0                      | 0                            | 0                               | 7  | 0   | 7  | 395a                           | 402b   | 0   | 7   | 0   | 7   | 402b  | 7  | 0                         |                  | Hallum.             |
|                       | Holwerd . . . . .                     | 3           | 1,45                             | 4                | 0                       | 0                      | 0                            | 0                               | 4  | 0   | 4  | 395c                           | 399b   | 0   | 4   | 0   | 4   | 399b  | 4  | 0                         |                  | Holwerd.            |
|                       | Wierum . . . . .                      | 1           | 1,50                             | 2                | 0                       | 0                      | 0                            | 0                               | 2  | 0   | 2  | 400a                           | 402a   | 0   | 2   | 0   | 2   | 402a  | 2  | 0                         |                  | Wierum.             |
|                       |                                       |             | 1                                | 2                | 3                       | 4                      | 5                            | 6                               | 7  | 8   | 9  | 10                             | 11   | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17                                       | 18                        | 19               | 20                  |



Figuur 48.

Stormvloedverhooging  
langs de kusten.

- geen verhooging . . . ———
- 0—10 cm . . . . . ———
- 10—25 " . . . . . - - - -
- 25—50 " . . . . . . . . .
- 50—75 " . . . . . ———
- 75—100 " . . . . . ———
- meer dan een meter ———

De cirkeltjes komen overeen met  
de plaatsen van tabel 36.

Voorloopig nog afziende van den golfoploop kan men, wat de derde methode betreft, de cijfers van kolom 18 als de definitieve uitkomsten beschouwen.

De vraag kan rijzen of, nu de overblijvende onzekerheid zoo groot is, de medegedeelde beschouwingen, waarvan de uitkomsten in tabel 42 zijn weergegeven, niet al te zeer in bijzonderheden zijn afgedaald. Inderdaad hadden eenige der aangebrachte correcties geheel achterwege kunnen blijven. Men houde echter in het oog dat alleen de berekening met eenige zekerheid kan leeren wat wel en wat niet in aanmerking moet worden genomen, en dat men in elk geval over de uitkomsten des te beter kan oordeelen, naarmate men meer getracht heeft in de bijzonderheden der verschijnselen door te dringen.

§ 115. *Overzicht van de grootste verhoogingen die verwacht kunnen worden.*

De belangrijkste verhoogingen komen voor:

|  |        |    |
|--|--------|----|
| langs den Balgdijk van den Anna Paulownapolder . . . . .           | 54—79  | cm |
| langs de noordkust van Wieringen . . . . .                         | 78—113 | „  |
| langs de Friesche kust tusschen (Piaam) Zurig en Roptazijl . (130) | 94—48  | „  |
| en aan de binnenzijde van Texel tot . . . . .                      | 79     | „  |

Verder komt een verhooging van meer dan 10 à 12 cm voor:

|   |       |    |
|---|-------|----|
| aan den binnenkant van Vlieland tot . . . . .             | 33    | cm |
| aan de oost- en zuidpunt van Texel . . . . .              | 10—52 | „  |
| langs de Heldersche zeevering . . . . .                   | 43—44 | „  |
| langs het Nieuwediep en den Koegraszeedijk . . . . .      | 43—54 | „  |
| en aan de Friesche kust van Roptazijl tot Nieuw Bildt . . | 48—13 | „  |

Men vindt deze uitkomsten aanschouwelijk voorgesteld op het kaartje, figuur 48.

## F. SLOTBESCHOUWINGEN.

§ 116. *Vergelijking der uitkomsten waartoe de tweede en de derde methode geleid hebben.* Van de wegen langs welke men getracht heeft een oplossing van het vraagstuk te vinden, loopen de tweede, de door Dr. C. W. LELY gevolgde, en de derde, waaraan §§ 81—115 en 147—158 gewijd zijn, het meest uiteen. De statistische methode van den heer LELY kan met het uitgebreide waarnemingsmateriaal dat bij een groot aantal stormen werd verkregen, rekening houden, terwijl men zich bij de andere methode wegens den grooten omvang der berekeningen in meerdere mate tot enkele uitgezochte gevallen moet beperken.

Het geeft een zekere bevrediging dat de beide beschouwingswijzen, hoe verschillend dan ook, in enkele opzichten tot overeenkomstige gevolgtrekkingen leiden. De verhouding in welke de verhoogingen langs de Friesche kust van Piaam af naar het Noorden afnemen, is in beide gevallen vrijwel dezelfde, en bij beide methoden komt de invloed der windrichting te voorschijn. Men ziet in tabel 24 (§ 95) dat de verhoogingen langs de Friesche kust in geval *P*, d. i. bij noordwestelijken wind, grooter zijn dan bij andere windrichtingen, en in overeenstemming hiermede vindt Dr. LELY dat zijn coëfficiënt *a*, die de verhooging bepaalt, bij noordwestelijken wind iets grooter is dan in andere gevallen. Leidt men nl. de waarden van *a* alleen af uit de derde groep van tabel 16 (§ 72) dan vindt men voor Harlingen, Hindeloopen en Stavoren resp. 0,07, 0,55 en 0,78, terwijl de gemiddelde waarden 0,004, 0,47 en 0,69 bedragen.

Intusschen zijn de uitkomsten waartoe hij geraakt aanmerkelijk lager dan de naar de derde methode berekende.

Om dit te doen zien mogen de uitkomsten naar de beide methodes verkregen met elkander worden vergeleken en wel voor een bepaalden storm; trouwens elk der beide berekeningswijzen geldt voor een bepaalden storm in het bijzonder. Hierbij is gekozen de storm van 1894, op welken

de berekeningen naar de derde methode in de eerste plaats betrekking hebben, en die tot de gevallen behoort die Dr. LELY in het bijzonder onderzocht heeft. Bij de derde methode is nu van de correctie voor andere stormen (kolom 9) geen sprake.

Er moge aan herinnerd worden dat de, in § 79 vermelde, op de wijze van Dr. LELY berekende verhoogingen uit drie deelen zijn samengesteld, nl. 1 een deel dat verkregen wordt door de grootheid  $V_s + V_w + 6$ , die aangeeft hoe ver men, wat het hoogteverschil tusschen Waddenzee en Zuiderzee betreft, nog van den evenwichtsstand is verwijderd, met den coëfficiënt  $\alpha$  te vermenigvuldigen; 2 de verhooging in Vlieland, en 3 een bedrag dat aangeeft hoeveel de verhooging van het getij op de beschouwde plaats meer bedraagt dan reeds in het eerstgenoemde deel begrepen is.

Het eerste deel heeft nu de waarden die men vindt in de eerste kolom der op blz. 147 voorkomende tabel. Men zou deze getallen wellicht met het oog op de windrichting in 1894 iets kunnen verhoogen door b.v. den coëfficiënt  $\alpha$  voor Harlingen, Zurig, Makkum en Piaam te stellen op 0,07, 0,15, 0,23 en 0,28, iets hooger dan de gemiddelde waarden van  $\alpha$  die Dr. LELY voor deze plaatsen heeft gevonden, maar daar hij reeds met de hoogste waarden heeft gerekend (nl. 0,10, 0,15, 0,25 en 0,30) kan deze verandering achterwege blijven.

Het tweede van de bovengenoemde deelen is, zooals ook in § 75 werd aangenomen, op 15 cm te stellen. Wat het derde deel betreft, dit kan, daar men bepaaldelijk den storm van 1894 beschouwt, wat lager gesteld worden dan vroeger in § 79 met het oog op een zeer hoog springtij werd gedaan. Op grond van de getijberekeningen worden genomen resp. 19, 21, 26 en 29 cm.

Men komt aldus voor de vier plaatsen tot de getallen van tabel 43, achter welke ter vergelijking de uiterste waarden die men volgens de derde methode vindt geplaatst zijn. Deze zijn verkregen door de getallen van kolom 8 van tabel 42 te vermenigvuldigen met 0,70 en 1,04 (verg. § 114).

TABEL 43.

|                    | Verhoogingen volgens |              |
|--------------------|----------------------|--------------|
|                    | methode II.          | methode III. |
| Harlingen. . . . . | 18 + 15 + 19 = 52    | 44 tot 66    |
| Zurig . . . . .    | 27 + 15 + 21 = 63    | 75 „ 112     |
| Makkum . . . . .   | 45 + 15 + 26 = 86    | 100 „ 148    |
| Piaam . . . . .    | 54 + 15 + 29 = 98    | 108 „ 160    |

Hieruit blijkt dat de door Dr. LELY berekende verhoogingen in den regel nog iets beneden de kleinste waarden liggen, die naar de derde methode worden gevonden.

§ 117. *Vergelijking van de eerste methode met de derde.* Bij de berekening der verhoogingen naar de methode van den heer GALLÉ, waarmede in dit verslag werd begonnen (§§ 64—67), is het vraagstuk in tweeën gesplitst. De aandacht werd in de eerste plaats gevestigd op het hoogteverschil tusschen het beschouwde punt  $R$  aan de Friesche kust en een punt  $Q$  aan de binnenzijde van een der zeegaten, en in de tweede plaats op het hoogteverschil tusschen  $Q$  en een punt  $P$  even buiten datzelfde zeegat. Op den weg van  $P$  naar  $Q$  werden nu, in de onderstelling van een stationairen toestand, dezelfde beschouwingen toegepast die later bij geulen in het algemeen gediend hebben. Men komt tot (28) van § 64 als men de betrekking (49) van § 90 viermaal op den weg  $PQ$  toepast, nl. eens voor het geval van open en eens voor

dat van afgesloten Zuiderzee, telkens zoowel met als zonder wind, en de verkregen vergelijkingen op geschikte wijze met elkander combineert. De vier termen in (28) stellen de waarden van het stroomverval voor de vier gevallen voor en de coëfficiënt  $m$  is de grootheid waarmede in (49)  $|s|s$  is vermenigvuldigd.

Wat echter het gebied tusschen  $Q$  en  $R$  betreft, loopen de eerste en de derde weg, ofschoon er wel punten van overeenstemming zijn, uiteen. De heer GALLÉ komt tot de hoogte in  $R$  door de opwaaiing van  $Q$  naar  $R$  en het getij in  $R$ , zooals het door de afsluiting zal worden gewijzigd, in het oog te vatten, terwijl bij de derde methode aansluiting tusschen de bij open en gesloten Zuiderzee bestaande stroomen gezocht werd, en dus gebruik werd gemaakt, overeenkomstig het denkbeeld van den heer KOOPER, van hetgeen omtrent de waterbeweging naar de Zuiderzee bekend is. Dat de cijfers voor de verhoogingen niet lager zijn uitgevallen is te wijten aan de noodzakelijkheid om met het niet-stationair zijn der toestanden rekening te houden. Wat de methode van den heer GALLÉ betreft, moge er aan herinnerd worden dat hij ondersteld heeft dat het hoogste windeffect met het hoogste getij samenvalt.

Vergelijkt men de op beide wijzen verkregen cijfers, dan moet men ditmaal, in tegenstelling met zoeven, voor de derde methode de correctie voor andere stormvloeden wèl aanbrengen. De methode van den heer GALLÉ vergelijkt namelijk eveneens de hoogste standen die bij open en afgesloten Zuiderzee, al dan niet bij denzelfden stormvloed, zijn voorgekomen.

Daarom zijn in tabel 44 voor de derde methode gegeven de uitkomsten die men verkrijgt door de getallen van kolom 10 van tabel 42 met 0,70 en 1,04 te vermenigvuldigen.

Men ziet dat de verhooging welke de eerste methode oplevert goed tusschen de beide grenzen, die men naar de derde methode vindt, ligt. De uitkomsten zijn nl.:

TABEL 44.

|                     | eerste methode. | derde methode. |
|---------------------|-----------------|----------------|
| Harlingen . . . . . | 55              | 40—60          |
| Zurig. . . . .      | 70              | 63—94          |
| Piaam . . . . .     | 115             | 87—129         |
| den Oever . . . . . | 101             | 75—113         |

In het bijzonder moge hier nog iets van den storm van Januari 1877 (§ 26) gezegd worden, die in § 65, *d* bij de berekeningen naar de eerste methode buiten beschouwing werd gelaten. Daar werd er reeds op gewezen dat dit hoogstwaarschijnlijk een geval van bijzonder groote windsterkte boven de Waddenzee is geweest. Die kon alleen voorkomen (verg. § 26) bij een luchtdrukverdeeling die een zeer groot windeffect op onze *Noordzeekust* onmogelijk maakt. De stuwingen op die kust zijn dan ook ongetwijfeld geringer geweest dan in 1894.

Gelukkig kan men uit de peilschaalwaarnemingen voldoende gegevens omtrent den stroom naar de Zuiderzee verkrijgen, en dit maakte het mogelijk, zooals in § 112 werd uiteengezet, een oordeel over de verhoogingen en de bereikte standen te vormen.

Daarentegen is het moeilijk, de berekening voor 1877 naar de methode van den heer GALLÉ uit te voeren. Wel kan men zich voorstellen dat de groote opwaaiing van  $Q$  naar  $R$  (§ 64), gevolg van den hevigen wind, door de lage Noordzeestanden gedeeltelijk gecompenseerd wordt. Die opwaaiing kan zeer goed tweemaal zoo groot zijn geweest als in 1894 — toen zij (§ 65) voor Harlingen 50, voor Zurig 55 en voor Piaam 75 cm bedroeg — maar het getal 235 voor de stuwing bij afgesloten zee bij Vlieland moet zeker door een aanmerkelijk kleiner worden vervangen. Tijdens de periode

van den sterksten wind schijnt een waarde van 190 cm hiervoor niet onaannemelijk, wat een verlaging van de standen, ook langs de Friesche kust, ten gevolge heeft, die van dezelfde orde van grootte is als de verhooging door de bijzonder groote plaatselijke stuwung.

Toch is het niet onmogelijk, ja zelfs waarschijnlijk, dat de zoeven genoemde compensatie niet volledig is en dat, wanneer de opwaaiing maar met voldoende nauwkeurigheid zou zijn te berekenen, het stormtype van 1877 langs de Friesche kust bij afgesloten Zuiderzee volgens de eerste methode tot nog hoogere waterstanden zou leiden dan het type 1894. Hierin zou dan deze methode met de derde overeenkomen; immers in kolom 12 van tabel 42 komt op dit kustgedeelte een *b* voor, wat er op wijst dat het stormtype van 1877 daar de hoogste standen geeft.

Een en ander maakt dat, wanneer men ook met den storm van 1877 rekening houdt, de verhooging volgens de eerste methode grooter wordt dan vroeger is becijferd. Zij nadert daardoor de bovenste grens volgens de derde methode, maar het is niet waarschijnlijk dat, tenminste voor Zurig en Piaam, die grens wordt overschreden.

§ 118. *Kunnen bij toekomstige stormen hoogere waterstanden verwacht worden?* Bij de voorgaande beschouwingen is rekening gehouden met alle stormen die in de laatste eeuw zijn voorgekomen en men zou zich tot de gevonden uitkomsten kunnen bepalen als men mocht aannemen dat zich in de toekomst geen ongunstiger omstandigheden dan bij die stormen zullen voordoen. Mag men daarop niet vertrouwen, dan moet de mogelijkheid van hoogere waterstanden onder het oog worden gezien. Daarbij moet echter op den voorgrond worden gesteld, dat de nu bedoelde verhoogingen, die ter verduidelijking de „toekomstige” kunnen genoemd worden, zoowel bij open als bij afgesloten Zuiderzee zouden voorkomen, en wel in beide gevallen in dezelfde mate; men mag verwachten, dat zij in ieder geval betrekkelijk klein zullen zijn en dan mag van de verandering, die de afsluiting in hun bedrag zou kunnen brengen worden afgezien.

Wanneer hier over de toekomstige verhoogingen een woord gezegd wordt, is het dan ook niet omdat zij van invloed zijn op het verschil in de hoogte, die de dijken bij open en bij afgesloten Zuiderzee moeten hebben; de vraag zou evenzeer van belang zijn als de afsluiting in het geheel niet plaats had.

Ongelukkigerwijze is het bij de onzekerheid die omtrent vele der in het spel komende factoren bestaat, uiterst moeilijk de toekomstige verhoogingen te schatten. Men zou kunnen trachten het te doen door naar de methode GALLÉ de hoogste stuwung met het hoogste getij te doen samenvallen. Daardoor vindt men de hoogten die in de kolommen 1 en 4 van tabel 45 zijn opgenomen, waarbij de getallen voor de afgesloten Zuiderzee een weinig verhoogd zijn om rekening te houden met den storm van 1877 (§ 117).

TABEL 45.

|                 | Open Zuiderzee.           |  |              | Afgesloten Zuiderzee.     |   |              |
|-----------------|---------------------------|--|--------------|---------------------------|---|--------------|
|                 | hoogst mogelijk<br>(§ 65) | hoogst bekend<br>(tabel 42,<br>kolom 11) | verschil 1—2 | hoogst mogelijk<br>(§ 65) | hoogst bekende<br>storm (tabel 42,<br>kolom 12) | verschil 4—5 |
|                 | 1                         | 2  | 3            | 4                         | 5   | 6            |
| Harlingen . .   | 341                       | 293                                      | 48           | 400                       | 350   | 50           |
| Zurig . . . . . | 328                       | 290                                      | 38           | 410                       | 380   | 30           |
| Piaam . . . . . | 297                       | 275                                      | 22           | 425                       | 399   | 26           |
| den Oever . .   | 253                       | 235                                      | 18           | 354                       | 343   | 11           |

Daarnaast zijn in de tweede en vijfde kolom de hoogste *bekende* standen opgenomen, nl. wat het geval *Z* betreft, het hoogste uit de waarneming bekende getal, aan kolom 11 van tabel 42 te ontleenen, en wat *A* aangaat

de hoogste standen die bij een der vroeger voorgekomen stormen behooren; het zijn de standen uit kolom 12 van tabel 42.

De toekomstige verhoogingen zouden nu door de verschillen tusschen kolom 1 en 2, respectievelijk kolom 4 en 5 gegeven worden; zij zouden voor de vier plaatsen in geval *Z* 48, 38, 22 en 18 cm bedragen en in geval *A* 50, 30, 26 en 11 cm. Zooals men ziet bestaat er tusschen *A* en *Z* weinig verschil.

Intusschen lijdt het geen twijfel dat in werkelijkheid de toekomstige verhoogingen vrij wat lager zullen zijn, en wel omdat men met gerustheid de allergevaarlijkste coincidenties van verschillenden aard kan uitsluiten. Zij zijn op zich zelf reeds weinig waarschijnlijk en in sommige gevallen onmogelijk te achten. Zoo zijn er (verg. § 67) redenen waarom een superpositie van groote waterverheffingen, elk tot hun volle bedrag, niet aannemelijk is.

De Staatscommissie is dan ook van meening, dat toekomstige verhoogingen zoo groot als uit tabel 45 zouden volgen niet verwacht kunnen worden; het bedrag dier verhoogingen zal aanmerkelijk lager kunnen worden gesteld, b.v. op 10 à 20 centimeter.

Tot toelichting van deze getallen moge nog de uitkomst van een berekening voor het getij tijdens den stormvloed van Februari 1825 vermeld worden. De berekening werd uitgevoerd volgens bijlage 3; een groot aantal componenten werd er bij in aanmerking genomen en de uitkomst was dat er wel een hoog springtij is geweest, maar toch niet het allerhoogste getij dat denkbaar is. Dit laatste zou ongeveer 13 cm hooger kunnen zijn en kon de toekomst een storm brengen waarbij dit allerhoogste getij met de in 1825 waargenomen stuwung samenviel, dan zou dat tot een toekomstige verhooging van 13 cm leiden.

§ 119. *Besluit.* Alles samengenomen is de Staatscommissie van oordeel dat *verhoogingen* grooter dan de in kolom 18 van tabel 42 genoemde niet behoeven geducht te worden en dat, als de dijken overeenkomstig de verkregen uitkomsten zullen zijn verhoogd, men de toekomst zeker met dezelfde gerustheid zal kunnen tegemoet gaan als wanneer de zee niet werd afgesloten en de dijken op hun tegenwoordige hoogte waren gelaten.

Intusschen, met volstrekte zekerheid kan hier niet worden gesproken. De Staatscommissie moet dan ook, aan het einde van deze overwegingen gekomen, met nadruk verklaren, dat met dit rapport het laatste woord niet gezegd moet zijn. Zij acht het van groot belang, dat na haar ontbinding gedurende de constructie van den afsluitdijk voortdurend de verschijnselen worden waargenomen en met de theorie, die wellicht nog verder ontwikkeld zal kunnen worden, vergeleken. De ervaring bij de afsluiting van het Amsteldiep heeft geleerd dat reeds eenigen tijd voordat de dijk zijn voltooiing naderde, zijn invloed op de waterhoogten merkbaar was. Evenzoo zal men in de laatste jaren vóór de volledige afsluiting in de waterstanden en stroomen de aankondiging zien van wat later zal gebeuren. Pogingen om zich voortdurend zoo goed mogelijk rekenschap van de verschijnselen te geven zullen het beste middel zijn om te beoordeelen of wellicht aan de nu voorloopig vast te stellen dijkhoogten nog iets kan worden veranderd.

Met het oog op de verandering die de configuratie der Waddenzee naderhand door de gewijzigde getijstroomen zal ondergaan, zal het wenschelijk zijn de onderzoekingen ook na de afsluiting voort te zetten.

§ 120. *Naschrift.* *Waarnemingen bij storm na de afsluiting van het Amsteldiep. Vergelijking met de theoretische verwachtingen.* In § 52 is vermeld dat de verandering welke de afsluiting van het Amsteldiep in de *getijbeweging* heeft gebracht goed in overeenstemming is met wat daarvoor was berekend. Gedurende den winter van 1925 op 1926 is er gelegenheid geweest ook in de verschijnselen bij *stormvloed* den invloed van de sluiting duidelijk waar te nemen.

In dit verband is vooral de storm van 9 op 10 Maart 1926 van belang. De (in tabel 4, blz. 68*a*, opgenomen) waterstanden bij dien storm vertoonen, zooals in § 25 is opgemerkt, veel overeenkomst met die van den, eveneens in de tabel opgenomen, stormvloed van 6 op 7 November 1921. In het overgangsg gebied loopen de maximum waterstanden slechts enkele centimeters uiteen; alleen te Westerland is de storm van 1926 37 cm hooger. Dit verschil kan door niets anders worden verklaard dan door de, tusschen de beide stormen tot stand gekomen, afsluiting van het Amsteldiep: het kan dus worden beschouwd als een maat van de door de afsluiting te Westerland veroorzaakte stormvloedverhooging.

Dit cijfer wordt bevestigd wanneer men niet alleen dezen éénen, maar alle stormvloeden die na Juli 1924 zijn voorgekomen (een twaalfstal) in aanmerking neemt. Door de waterhoogten tijdens die stormen te vergelijken met die welke bij open Amsteldiep zijn waargenomen, vindt men dat de waterstand te Westerland ten opzichte van dien te Helder met gemiddeld 32 cm is verhoogd.

Reeds in het jaar 1922, toen de plannen voor de afsluiting van het Amsteldiep werden opgemaakt, zijn enkele berekeningen uitgevoerd om den invloed van deze afsluiting bij stormvloeden te leeren kennen. Daarbij bleek dat het in principe mogelijk was alle drie in § 28 genoemde methoden toe te passen.

Voor de eerste (methode GALLÉ) kan men aannemen dat de waterstanden te Helder en den Oever nagenoeg niet veranderen. In den driehoek Helder—Westerland—den Oever is dan de opwaaiing te berekenen; brengt men op grond van de in § 52 genoemde getijberekeningen nog de verhooging van de astronomische standen in rekening, dan kan men de gezochte stormvloedverhooging bepalen.

Bij de methode van Dr. LELY doet zich de schaarschte aan waarnemingen gevoelen; toch kan zij tot een inzicht in de orde van grootte der verhooging leiden.

De moeilijkheid bij de toepassing van de derde methode is de onbekendheid met den stroom die vroeger bij stormvloed door het Amsteldiep ging. Intusschen zijn er eenige waarnemingen verricht, die althans een schatting van dien stroom mogelijk maken. Bepaalt men zich tot den stationairen toestand (§§ 85—95), dan levert de verdere berekening geen ernstige bezwaren meer op.

Het is geruststellend dat de waarnemingen in volkomen overeenstemming zijn met het resultaat van de berekeningen, die een verhooging van 30 à 35 cm deden verwachten.

## VII. THEORETISCHE GRONDSLAGEN EN METHODEN VAN BEREKENING <sup>1)</sup>.

§ 121. *Grondformules der hydrodynamica.* De bewegingsvergelijkingen voor een vloeistof, zooals men die in de leerboeken der hydrodynamica vindt, drukken het verband uit, dat er tusschen de versnellingen der deeltjes en de daarop werkende krachten bestaat. Laat er op den tijd  $t$ , in een punt met de coördinaten  $x, y, z$ , een snelheid  $v$  met de componenten  $v_x, v_y, v_z$  zijn; deze grootheden zijn in het algemeen functiën van  $x, y, z, t$ . Gedurende den oneindig kleinen tijd  $dt$  veranderen de coördinaten van een vloeistofdeeltje met  $v_x dt, v_y dt, v_z dt$ , en de eerste component van zijn snelheid met

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} dt + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} dt + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} dt + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} dt.$$

De eerste component der versnelling is dus

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z},$$

en evenzoo zijn de beide andere componenten

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z},$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}.$$

De producten dezer drie uitdrukkingen met de dichtheid  $\rho$  der vloeistof moeten gelijk zijn aan de componenten der per volume-eenheid werkende kracht.

Is  $p$  de druk per vlakke-eenheid dan vloeit uit de verandering daarvan van punt tot punt een kracht voort, waarvan de componenten per volume-eenheid bedragen

$$-\frac{\partial p}{\partial x}, -\frac{\partial p}{\partial y}, -\frac{\partial p}{\partial z}.$$

Men kan nl. de drukkingen beschouwen, die een oneindig klein parallelipedum met de ribben  $dx, dy, dz$  in de richtingen der coördinaatassen van de omringende vloeistof ondervindt. Zijn  $a$  en  $b$  twee punten in de zijvlakken loodrecht op de  $X$ -as, zoo gelegen dat  $y$  en  $z$  voor het eene even groot zijn als voor het andere, terwijl de  $x$  voor het tweede punt  $dx$  grooter is dan voor het eerste, dan is het drukverschil

$$p_a - p_b = -\frac{\partial p}{\partial x} dx.$$

Door vermenigvuldiging hiervan met de grootte  $dy dz$  van elk der twee zijvlakken vindt men voor de resulterende kracht in de richting der  $X$ -as

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz,$$

d. i.

$$-\frac{\partial p}{\partial x}$$

<sup>1)</sup> Om dit hoofdstuk een samenhangend geheel te doen zijn, zijn hier niet alleen de bijzondere beschouwingen opgenomen, waartoe het vraagstuk aanleiding gaf, maar ook eenige van meer algemeen aard, voor welke naar de leerboeken der hydrodynamica, b.v. LAMB, literatuuropgave n<sup>o</sup>. 55, had kunnen worden verwezen.

per volume-eenheid. De uitkomst geldt ook voor een volume-element van willekeurigen vorm.

Zijn verder  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  de componenten van de resultante van alle overige op de volume-eenheid werkende krachten, dan zijn de bewegingsvergelijkingen

$$\left. \begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + X, \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + Y, \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + Z. \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

§ 122. *Stroomlijnen en stroombuizen.* Men kan, de beweging op een bepaald oogenblik in het oog vattende, lijnen trekken, die overal de richting der snelheid aangeven. Dit zijn de „stroomlijnen”.

Een buisvormig oppervlak, bepaald door de stroomlijnen die door de punten van een of andere gesloten lijn gaan, is een „stroombuis”. Voor een onsamendrukbare vloeistof, als hoedanig het water hier kan beschouwd worden, geldt de regel dat door alle doorsneden van een stroombuis evenveel vloeistof gaat. Is de buis oneindig nauw, dan verandert, als men op een zelfde oogenblik van het eene punt der buis naar het andere overgaat, de snelheid omgekeerd evenredig met de normale doorsnede der buis.

Dit is de zoogenaamde „continuïteitsvoorwaarde”, de conditie dat nergens vloeistof ontstaat of verdwijnt. Voor een punt in het binnenste der vloeistof wordt die ook uitgedrukt door de vergelijking

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

die zegt dat door de zijvlakken van een oneindig klein parallelepipedum met de ribben evenwijdig aan de coördinaatassen evenveel vloeistof naar binnen als naar buiten gaat.

De bewegingstoestand is „stationair” als in een willekeurig gekozen punt der ruimte op elk oogenblik alles hetzelfde is, als dus  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ,  $p$  onafhankelijk van  $t$  zijn en alleen met  $x$ ,  $y$ ,  $z$  veranderen. Dan verdwijnen de differentiaalquotienten  $\frac{\partial v_x}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial v_y}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial v_z}{\partial t}$ .

Bij een stationairen toestand zullen de lijnen die op één oogenblik stroomlijnen zijn dat voortdurend blijven; zij wijzen tevens de banen der deeltjes aan. Bij een niet-stationairen toestand veranderen de stroomlijnen van oogenblik tot oogenblik en vallen zij niet met de banen der deeltjes samen.

§ 123. *Krachten van de tweede orde.* Men kan de bewegingsvergelijkingen (70) ook schrijven in den vorm

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + X - \rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right),$$

enz.

Men kan dus bij het opmaken der versnelling zich bepalen tot de verandering der snelheid in een vastgehouden punt der ruimte, welke verandering door

$$\frac{\partial v_x}{\partial t}, \frac{\partial v_y}{\partial t}, \frac{\partial v_z}{\partial t}$$

wordt gegeven, als men maar aan de per volume-eenheid werkende kracht met de componenten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  nog een kracht toevoegt met de componenten

$$F_x = -\left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \text{ enz.} \quad (71)$$

per massa-eenheid.

Dit zijn de in § 34 genoemde krachten; men kan ze krachten van de tweede orde noemen omdat zij evenredig zijn met de tweede machten der snelheden.

Uit het voorgaande volgt dat de voorwaarde voor een stationairen bewegingstoestand, waarbij in een vast punt der ruimte steeds dezelfde snelheid wordt gevonden, deze is, dat de werkende krachten, met inbegrip van de krachten der tweede orde  $F_x, F_y, F_z$ , elkaar opheffen.

§ 124. *Bewijs dat de krachten der tweede orde bestaan in de centrifugaalkracht en de kracht van Bernoulli.* Vat, op een bepaald oogenblik, een stroomlijn in het oog. Laat in een punt  $P$  daarvan de snelheidscomponenten zijn  $v_x, v_y, v_z$  en de grootte der snelheid  $v$ . Dan zijn de cosinussen der hoeken die de lijn met de coördinaatassen maakt, de „richtingsconstanten”

$$\frac{v_x}{v}, \frac{v_y}{v}, \frac{v_z}{v}.$$

Zoowel  $v_x, v_y, v_z$  als  $v$  veranderen, op het beschouwde oogenblik, met de coördinaten.

Zij  $Q$  een tweede punt, dat men bereikt door van  $P$  uit in de richting der beweging over een oneindig kleinen afstand  $dl$  voort te gaan. De verandering die een of andere van de coördinaten afhankelijkke grootte  $\varphi$  daarbij ondergaat worde door  $d\varphi$  aangewezen.

Men heeft

$$dx = \frac{v_x}{v} dl, \quad dy = \frac{v_y}{v} dl, \quad dz = \frac{v_z}{v} dl,$$

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x} dx + \frac{\partial\varphi}{\partial y} dy + \frac{\partial\varphi}{\partial z} dz = \left( v_x \frac{\partial\varphi}{\partial x} + v_y \frac{\partial\varphi}{\partial y} + v_z \frac{\partial\varphi}{\partial z} \right) \frac{1}{v} dl. \quad (72)$$

De veranderingen der richtingsconstanten van de stroomlijn bij den overgang van  $P$  naar  $Q$  zijn

$$d\left(\frac{v_x}{v}\right) = \frac{1}{v} dv_x - \frac{v_x}{v^2} dv, \quad d\left(\frac{v_y}{v}\right) = \frac{1}{v} dv_y - \frac{v_y}{v^2} dv,$$

$$d\left(\frac{v_z}{v}\right) = \frac{1}{v} dv_z - \frac{v_z}{v^2} dv.$$

Dit zijn de componenten van de „richtingsverandering langs het deel  $PQ$ ”; deelt men ze door de lengte  $dl$  daarvan, dan krijgt men de componenten van de richtingsverandering per lengte-eenheid, d. w. z. van hetgeen men de „kromming” van de stroomlijn noemt.

Deze zijn derhalve

$$c_x = \frac{1}{v} \frac{dv_x}{dl} - \frac{v_x}{v^2} \frac{dv}{dl}, \quad c_y = \frac{1}{v} \frac{dv_y}{dl} - \frac{v_y}{v^2} \frac{dv}{dl},$$

$$c_z = \frac{1}{v} \frac{dv_z}{dl} - \frac{v_z}{v^2} \frac{dv}{dl}. \quad (73)$$

De kromming  $\mathbf{c}$  zelf is een gerichte grootte of vector, die men krijgt door  $c_x, c_y, c_z$ , in de richtingen der coördinaatassen uitgezet, met elkaar samen te stellen.

De kromtestraal  $\mathbf{r}$  is een vector in de richting van  $\mathbf{c}$ , waarvan de grootte het omgekeerde van die van  $\mathbf{c}$  is,

$$|\mathbf{r}| = \frac{1}{|\mathbf{c}|}.$$

Zooals bekend is wordt voor een stoffelijk punt met de massa  $m$ , dat zich langs een kromme lijn beweegt, en op zeker oogenblik de snelheid  $v$  heeft, de centrifugaalkracht bepaald door

$$m \frac{v^2}{|\mathbf{r}|},$$

als  $\mathbf{r}$  de kromtestraal van de baan is. De centrifugaalkracht is tegengesteld aan  $\mathbf{r}$  gericht.

Men kan zich, analoog hieraan, een op de vloeistof werkende kracht  $F_1$  voorstellen, die per massa-eenheid bedraagt

$$\frac{v^2}{|\mathbf{r}|}$$

en tegengesteld aan den kromtestraal  $\mathbf{r}$  van de stroomlijn gericht is. Men kan hiervoor ook schrijven

$$v^2 |\mathbf{c}|$$

en daar de kracht ook aan de kromming  $\mathbf{c}$  tegengesteld is, vindt men haar componenten door die van  $\mathbf{c}$ , nl. de uitdrukkingen (73), met  $-v^2$  te vermenigvuldigen. Dit geeft

$$F_{1x} = -v \frac{dv_x}{dl} + v_x \frac{dv}{dl}, \quad F_{1y} = -v \frac{dv_y}{dl} + v_y \frac{dv}{dl},$$

$$F_{1z} = -v \frac{dv_z}{dl} + v_z \frac{dv}{dl}. \quad (74)$$

De eerste termen in de tweede leden dezer vergelijkingen zijn juist de door (71) bepaalde componenten  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  van de kracht der tweede orde. Dit volgt uit formule (72), die b.v., als voor  $\varphi$  de snelheidscomponent  $v_x$  wordt genomen, geeft

$$-v \frac{dv_x}{dl} = - \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right).$$

Stelt men nog

$$F_{2x} = -v_x \frac{dv}{dl}, \quad F_{2y} = -v_y \frac{dv}{dl}, \quad F_{2z} = -v_z \frac{dv}{dl}, \quad (75)$$

dan kan men voor (71) schrijven

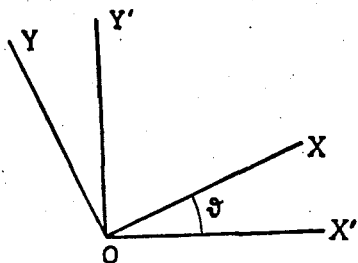
$$F_x = F_{1x} + F_{2x}, \quad F_y = F_{1y} + F_{2y}, \quad F_z = F_{1z} + F_{2z}.$$

De kracht van de tweede orde  $F$  bestaat dus uit de centrifugaalkracht  $F_1$  en de kracht  $F_2$  met de componenten (75). Deze laatste is nu juist de in § 34 genoemde kracht van BERNOULLI. Uit de omstandigheid dat de drie componenten (75) evenredig met de snelheidscomponenten  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  zijn volgt nl. dat de kracht langs de stroomlijn is gericht en in grootte gevonden wordt door in de eerste der uitdrukkingen (75)  $v_x$  door  $v$  te vervangen. De uitkomst is

$$-v \frac{dv}{dl} = - \frac{d(\frac{1}{2}v^2)}{dl}.$$

Heeft dit het positieve teeken dan wil dat zeggen dat de kracht dezelfde richting als  $v$  heeft d. w. z., van het punt  $P$ , waarvan in het begin dezer § sprake was, naar het punt  $Q$ . Het blijkt dus dat de kracht naar  $Q$  is gericht als daar de snelheid kleiner is dan in  $P$ , en andersom als de snelheid van  $P$  naar  $Q$  toeneemt. Dit leidt wat de richting der kracht betreft tot den in § 34 gegeven regel en ook wat de grootte der kracht aangaat, bestaat er overeenstemming met hetgeen in die § gezegd werd <sup>1)</sup>.

In de gevallen die in het rapport ter sprake komen zijn de stroomlijnen volkomen of op zeer weinig na horizontaal. Dientengevolge komen ook hun kromtестralen en daarmede de centrifugale krachten in het horizontale vlak te liggen. Zijn de stroomlijnen in een kaart geteekend, dan vindt men den kromtestraal gemakkelijk; het is de straal van een cirkel die zich in het beschouwde punt zoo nauw mogelijk aan de stroomlijn aansluit.



Figuur 49.

§ 125. *De kracht van Coriolis.* Laat  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  onderling loodrechte coördinaatassen zijn, die vast met de aarde zijn verbonden, en waarvan de derde, naar het

<sup>1)</sup> De in den tekst gegeven definitie van de centrifugaalkracht wijkt voor het geval van niet-stationaire bewegingen eenigszins van de gebruikelijke af. Deze laatste maakt nl. de op een vloeistofdeeltje werkende kracht afhankelijk van de kromming der baan van het deeltje, terwijl zij nu afhankelijk werd gesteld van de kromming der stroomlijn. Natuurlijk is er niets tegen dat, ter wille van de korthed van uitdrukking, aan het woord „centrifugaalkracht” een beteekenis wordt gehecht, die van de gewone een weinig verschilt. Het komt er maar op aan dat, als men op de gezegde wijze uit de snelheid en den kromtestraal der stroomlijn een kracht loodrecht op deze lijn afleidt en daar dan nog de kracht van BERNOULLI langs de stroomlijn aan toevoegt, de kracht van de tweede orde behoorlijk in rekening wordt gebracht.

Noorden gericht, met de as der aarde samenvalt, terwijl  $OX$  en  $OY$  zoo zijn gekozen dat een wenteling over  $90^\circ$  van  $OX$  naar  $OY$  in de richting der aardrotatie is. Laat verder  $OX'$  en  $OY'$  twee assen zijn, die niet aan deze wenteling deelnemen en met welke  $OX$  en  $OY$  op zeker oogenblik zijn samengevallen. Is dan  $\vartheta$  de hoek, dien  $OX$  met  $OX'$  maakt, positief gerekend in de richting der aswenteling, dan is

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega$$

de hoeksnelheid der aarde.

Tusschen de coördinaten  $x, y, x', y'$  met betrekking tot de twee assenstelsels bestaan de betrekkingen

$$x' = x \cos \vartheta - y \sin \vartheta, \quad y' = x \sin \vartheta + y \cos \vartheta, \quad (76)$$

terwijl de derde coördinaat  $z$  in beide gevallen hetzelfde is.

Met betrekking tot het stilstaande assenstelsel gelden nu voor een stoffelijk punt met de massa  $m$  de gewone bewegingsvergelijkingen <sup>1)</sup>

$$m\ddot{x}' = X', \quad m\ddot{y}' = Y', \quad m\ddot{z} = Z, \quad (77)$$

waarin  $X', Y', Z$  de componenten volgens  $OX', OY', OZ$  van de op het punt werkende kracht zijn. De componenten van diezelfde kracht volgens  $OX$  en  $OY$  worden gegeven door de met (76) overeenkomende vergelijkingen

$$X = X' \cos \vartheta + Y' \sin \vartheta, \quad Y = -X' \sin \vartheta + Y' \cos \vartheta. \quad (78)$$

Om de bewegingsvergelijkingen met betrekking tot de wentelende assen te vinden moet men uit (76) de waarden van  $\ddot{x}, \ddot{y}$  afleiden. Men heeft eerst

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}' &= \dot{x} \cos \vartheta - \dot{y} \sin \vartheta - (x \sin \vartheta + y \cos \vartheta) \omega \\ \dot{y}' &= \dot{x} \sin \vartheta + \dot{y} \cos \vartheta + (x \cos \vartheta - y \sin \vartheta) \omega \end{aligned} \right\} \quad (79)$$

en vervolgens

$$\ddot{x}' = \ddot{x} \cos \vartheta - \ddot{y} \sin \vartheta - 2(\dot{x} \sin \vartheta + \dot{y} \cos \vartheta) \omega - (x \cos \vartheta - y \sin \vartheta) \omega^2$$

$$\ddot{y}' = \ddot{x} \sin \vartheta + \ddot{y} \cos \vartheta + 2(\dot{x} \cos \vartheta - \dot{y} \sin \vartheta) \omega - (x \sin \vartheta + y \cos \vartheta) \omega^2.$$

Telt men deze vergelijkingen bij elkander op, na de eerste met  $\cos \vartheta$  en de tweede met  $\sin \vartheta$  vermenigvuldigd te hebben, dan komt er, na vermenigvuldiging met  $m$ , als men (77) en (78) in aanmerking neemt,

$$m\ddot{x}' = X + 2m\dot{y}\omega + mx\omega^2$$

en door een dergelijke bewerking vindt men

$$m\ddot{y}' = Y - 2m\dot{x}\omega + my\omega^2,$$

terwijl nog steeds

$$m\ddot{z} = Z$$

is.

Het blijkt dus dat men, als men coördinaatassen invoert, die vast met de aarde verbonden zijn, bewegingsvergelijkingen van den gewonen vorm kan bezigen; alleen moet men, behalve de krachten die men ook bij het gebruik van stilstaande assen in aanmerking moet nemen en die in  $X, Y, Z$  begrepen zijn, nog twee nieuwe krachten in rekening brengen, beide in een vlak loodrecht op de aardas gelegen.

Per massa-eenheid zijn de componenten van de eerste kracht

$$2\dot{y}\omega, \quad -2\dot{x}\omega \quad (80)$$

en die van de tweede

$$x\omega^2, \quad y\omega^2.$$

Uit de omstandigheid dat de laatste uitdrukkingen evenredig zijn met de coördinaten  $x$  en  $y$ , volgt dat de tweede kracht gericht is volgens de op de as neergelaten loodlijn, en wel, zooals uit het teeken blijkt, van de as af. Is  $r$  de afstand tot de as, dan is de kracht

$$r\omega^2.$$

Men herkent hierin de door de aswenteling der aarde teweeggebrachte centrifugaalkracht, waaraan echter om de in § 33 genoemde reden verder niet behoeft gedacht te worden.

<sup>1)</sup> De stippen boven de letters dienen om differentiaties naar den tijd aan te wijzen.

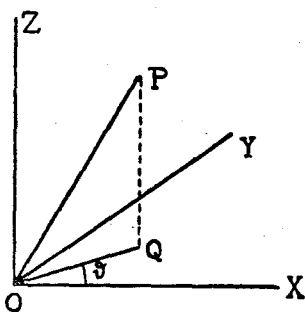
De eerste der beide bovengenoemde krachten, die met de componenten (80), is de kracht van CORIOLIS, die door de hoeksnelheid der aarde en de snelheid waarmede het stoffelijk punt zich ten opzichte van de aarde beweegt, bepaald wordt.

Daar in de uitdrukkingen (80) de coördinaten niet voorkomen, blijven zij gelden als men de assen evenwijdig aan zich zelf verplaatst, zoodat men vrij is den oorsprong van coördinaten op geschikte wijze te kiezen. Zij nu  $OZ$  evenwijdig aan de as der aarde,  $OP$  de snelheid van het stoffelijk punt en  $OQ$  de projectie daarvan op het  $XY$ -vlak. Is dan  $\vartheta$  de hoek dien  $OQ$  met  $OX$  maakt, dan is

$$\dot{x} = OQ \cos \vartheta, \quad \dot{y} = OQ \sin \vartheta.$$

De componenten (80) worden dus

$$2 OQ \cdot \omega \sin \vartheta, \quad -2 OQ \cdot \omega \cos \vartheta,$$



Figuur 50.

of

$$2 OQ \cdot \omega \cos (\vartheta - 90^\circ), \quad 2 OQ \cdot \omega \sin (\vartheta - 90^\circ).$$

De kracht van CORIOLIS staat dus in het  $XY$ -vlak loodrecht op  $OQ$ , en wel heeft zij een richting tegengesteld aan die, waarin het punt  $Q$  zich door een wenteling  $\omega$  om  $OZ$  zou verplaatsen. De grootte der kracht is  $2 OQ \cdot \omega$ .

Men kan uit deze uitkomsten afleiden dat, indien men de snelheid van het stoffelijk punt in twee of meer componenten ontbindt, en de kracht van CORIOLIS opmaakt, waartoe elke component op zich zelf aanleiding geeft, samenstelling der gevonden krachten de kracht van CORIOLIS oplevert, die bij de volle snelheid behoort. Evenzoo kan men, de snelheid van het punt vasthoudende, de wenteling  $\omega$  in componenten om verschillende assen ontbinden, de bij elken component behorende kracht van CORIOLIS in het oog vatten, en ten slotte al de gevonden krachten tot een enkele samenvatten.

Bij de vraagstukken die in het rapport behandeld worden, is de snelheid der vloeistofdeeltjes op weinig na horizontaal gericht, en behoeft men ook slechts op den horizontalen component der kracht van CORIOLIS te letten; dit laatste omdat de diepte der watermassa veel kleiner is dan haar afmetingen in horizontale richtingen. Men krijgt nu een eenvoudige uitkomst als men de aswenteling der aarde ontbindt in een rotatie om een verticale en een om een horizontale as. Deze laatste kan buiten beschouwing blijven, omdat zij tot een verticale kracht van CORIOLIS leidt en de hoeksnelheid van den eersten component, die alleen werkzaam is, bedraagt  $\omega \sin \varphi$ , als  $\varphi$  de geografische breedte is. Men kan zich nu weer van figuur 50 bedienen, het nu zoo opvattende, dat  $OZ$  verticaal is, dat om die lijn een wenteling met de hoeksnelheid  $\omega \sin \varphi$  plaats heeft, en dat  $OQ$  de snelheid is. Men komt dan, wat de richting en de grootte der kracht van CORIOLIS betreft, tot hetgeen in § 33 gezegd werd.

§ 126. *Bewegingen in twee dimensies, in een horizontaal vlak.* Ofschoon in den regel met geulen is gewerkt, is het dienstig tot op zekere hoogte ook het geval van een watermassa te beschouwen, die zich in twee richtingen in een horizontaal vlak uitstrekt, en waarin horizontale stroomen in niet van te voren vastgestelde richtingen kunnen bestaan.

Laat  $x$  en  $y$  rechthoekige coördinaten in het horizontale vlak zijn en zij  $V$  een horizontaal vlak, op zoodanige hoogte gekozen dat de waterspiegel bij de te beschouwen bewegingen slechts weinig van  $V$  afwijkt. Laat  $q$  de diepte van het water zijn als het tot aan het vlak  $V$  reikt, deze grootte zal bij hellenden bodem geleidelijk van punt tot punt veranderen. Laat  $h$  aangeven hoeveel de waterspiegel van  $V$  afwijkt, waarbij een rijzing positief en een daling negatief wordt genoemd. De werkelijke diepte is dan

$$q' = q + h.$$

Verder kan men de als horizontaal te beschouwen snelheden  $v$  in het oog vatten, waarmede gemiddelden over de volle diepte bedoeld worden.

Met de ontbondenen  $v_x$  en  $v_y$  van de snelheid hangen de componenten  $s_x$  en  $s_y$  van den stroom op eenvoudige wijze samen. Als maat voor  $s_x$  wordt nl. het watervolume genomen, dat door een vlak loodrecht op de  $X$ -as per eenheid van tijd en over de volle diepte, maar per eenheid van lengte van een lijn in de richting der  $Y$ -as, stroomt, en wel positief gerekend als het naar den kant der positieve  $x$  gaat. Dus:

$$s_x = q' v_x$$

en evenzoo

$$s_y = q' v_y.$$

Gemakkelijk ziet men ook dat de grootte van  $s$  zelf, nl.  $q' |v|$ , uit  $s_x$  en  $s_y$  samengesteld, op dergelijke wijze de hoeveelheid water bepaalt, die door een vlak loodrecht op de richting van  $s$ , welke laatste met die van  $v$  samenvalt, stroomt, en dat voor een verticaal vlak dat een willekeurigen hoek met de richting van den stroom maakt, de doorstroomende hoeveelheid, steeds per eenheid van tijd en per eenheid van lengte in horizontale richting, bepaald wordt door  $s_n = q' v_n$ , waarin  $v_n$  en  $s_n$  de componenten van de snelheid en den stroom volgens de normaal  $n$  op het vlak zijn.

§ 127. *Continuïteitsvergelijking.* Om deze op te stellen beschouwe men in het horizontale vlak een oneindig kleinen rechthoek met de zijden in de richtingen der coördinaatassen. Eén hoekpunt heeft de coördinaten  $x$  en  $y$ , en het tegenover liggende de coördinaten  $x + dx$ ,  $y + dy$ , waarbij  $dx$  en  $dy$  als positieve grootheden gedacht worden. Verticale vlakken, door de zijden van den rechthoek gaande, begrenzen een prismatische ruimte en men kan nagaan hoeveel water door de zijvlakken daarvan gaat, in het bijzonder wat het verschil is tusschen de naar binnen en de naar buiten gaande hoeveelheden.

Voor elk der zijvlakken die loodrecht op de  $X$ -as staan wordt de per tijdseenheid doorstroomende hoeveelheid water gevonden door den stroom in de richting der  $X$ -as met de breedte  $dy$  te vermenigvuldigen.

Men krijgt derhalve het verschil der door die vlakken gaande hoeveelheden als men  $dy$  vermenigvuldigt met de verandering die  $s_x$  ondergaat bij den overgang van het eene zijvlak tot het andere, voor welke verandering men kan schrijven

$$\frac{\partial s_x}{\partial x} dx,$$

daar de twee vlakken in de richting der  $X$ -as een lengte  $dx$  uiteenliggen.

Men komt dus tot de waarde

$$\frac{\partial s_x}{\partial x} dx dy$$

en overtuigt zich er gemakkelijk van dat als deze uitdrukking positief is, meer water door het eene zijvlak naar buiten dan door het andere naar binnen gaat.

Op dezelfde wijze komt men, de twee andere zijvlakken beschouwende, tot

$$\frac{\partial s_y}{\partial y} dx dy$$

en het blijkt dus dat de verandering per tijdseenheid van het in het prisma aanwezige watervolume wordt gegeven door

$$-\left(\frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y}\right) dx dy.$$

Aan den anderen kant is die verandering ook

$$\frac{\partial h}{\partial t} dx dy.$$

Derhalve, door gelijkstelling van beide uitdrukkingen,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} = 0. \quad (81)$$

§ 128. *Verdere bewegingsvergelijkingen.* Thans kan het verband tusschen de versnellingen en de werkende krachten beschouwd worden.

Vooreerst vloeit, als er een verhang is, uit de zwaartekracht een kracht voort, die per eenheid van volume de componenten

$$-g \varrho \frac{\partial h}{\partial x}, \quad -g \varrho \frac{\partial h}{\partial y} \quad (82)$$

heeft. Men overtuigt zich hiervan door op te merken dat in een horizontaal vlak de druk van punt tot punt veranderingen vertoont, die gelijken tred houden met de veranderingen der waterhoogte boven dat vlak. Bedenk men dat het gewicht der volume-eenheid  $g \varrho$  is, dan ziet men dat bovenstaande uitdrukkingen de waarden van  $-\frac{\partial p}{\partial x}$  en  $-\frac{\partial p}{\partial y}$  voorstellen, en dit zijn juist (§ 121) de componenten der uit de drukverschillen voortvloeiende kracht.

Men kan aantoonen dat ook de kracht die op een volume-element van willekeurige gedaante werkt door de uitdrukkingen (82) bepaald wordt; dit geldt tot vlak bij den waterspiegel of bij den bodem, ook wanneer deze helt.

De grootheden  $-\frac{\partial h}{\partial x}$  en  $-\frac{\partial h}{\partial y}$  stellen het verhang in de richtingen van de  $X$ - en de  $Y$ -as voor. Analooq daarmede is het verhang in een willekeurige horizontale richting  $l$   $-\frac{\partial h}{\partial l}$ ; het hier voorkomende differentiaalquotient wordt gevonden als men in de richting  $l$  over een oneindig kleinen afstand  $dl$  voortgaat en de hoogteverandering die men daarbij opmerkt, door  $dl$  deelt. Men kan ook zeggen dat het laatstbedoelde verhang gegeven wordt door de tangens van den hoek dien de snijlijn van den vloeistofspiegel met een door  $l$  gebracht verticaal vlak met de horizontale lijn  $l$  maakt. In de te beschouwen gevallen is die hoek zoo klein, dat de tangens door den hoek zelf, in boogmaat uitgedrukt, kan worden vervangen.

Het verhang  $-\frac{\partial h}{\partial l}$  geeft, na vermenigvuldiging met  $g \varrho$ , de in de richting  $l$  werkende kracht; als men voor  $l$  de richting van de grootste helling neemt, dan krijgt men de kracht zelf, waarvan de componenten door de uitdrukkingen (82) worden voorgesteld.

Een tweede kracht is de weerstand dien het stroomende water van den bodem ondervindt. Zij heeft voor de geheele boven beschouwde kolom een grootte evenredig met  $dx dy$ ; men vindt den weerstand per eenheid van horizontaal vlak als men dien factor weglaat, en vervolgens den weerstand  $W$  per volume-eenheid als men door de hoogte van het water deelt. Daar de richting steeds tegengesteld aan den stroom is, zijn de componenten van  $W$

$$-\frac{v_x}{v} W, \quad -\frac{v_y}{v} W,$$

of

$$-\frac{s_x}{s} W, \quad -\frac{s_y}{s} W.$$

Voor de versnellingen in de richtingen van  $OX$  en  $OY$  kan men schrijven

$$\frac{\partial v_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial v_y}{\partial t},$$

als men (§ 123), zoo er aanleiding toe is ze te beschouwen, de centrifugaalkracht en de kracht van BERNOULLI onder de werkende krachten opneemt.

Zijn, alles samengenomen, met uitzondering alleen van de verhangkracht en den weerstand, de componenten van de werkende kracht  $F_x$  en  $F_y$ , dan zijn de bewegingsvergelijkingen

$$\left. \begin{aligned} \varrho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -g \varrho \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v_x}{v} W + F_x, \\ \varrho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= -g \varrho \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v_y}{v} W + F_y. \end{aligned} \right\} \quad (83)$$

§ 129. *Nadere beschouwing van den weerstand.* Het zijn de termen met  $W$ , die de grootste moeilijkheid geven. Alles zou veel eenvoudiger worden als  $W$  evenredig met de snelheid kon gesteld worden. Was dit het geval, dus  $W = kv$ , met een standvastigen coëfficiënt  $k$ , dan zouden de weerstandstermen in (83) zijn

$$-kv_x, -kv_y,$$

Bij verschillende beschouwingen, met name bij de getijberekeningen, is deze onderstelling, maar dan met de noodige voorzorgen wat den coëfficiënt  $k$  betreft, gemaakt. Veelal echter is aangenomen dat de weerstand evenredig met de tweede macht der snelheid is en is zijn grootte met behulp van de constante van EYTELWEIN  $C$  bepaald.

Voor den weerstand per eenheid van horizontaal vlak wordt dan gesteld

$$\frac{g \varrho}{C^2} v^2 \quad (84)$$

en  $W$  wordt gevonden als men dit door de diepte  $q'$  op de beschouwde plaats deelt.

De voorlaatste termen in (83) worden dus

$$-\frac{g \varrho}{q' C^2} |v| v_x, -\frac{g \varrho}{q' C^2} |v| v_y,$$

waarbij  $|v|$  is geschreven om goed te doen uitkomen dat men hier met de absolute waarde van de snelheid te doen heeft. Daar de twee uitdrukkingen tegengestelde teekens hebben als  $v_x$  en  $v_y$  bepalen zij inderdaad een kracht die tegengesteld aan de snelheid gericht is. Zij kunnen vervangen worden door

$$-\frac{g \varrho}{q'^3 C^2} |s| s_x, -\frac{g \varrho}{q'^3 C^2} |s| s_y$$

en dan worden de bewegingsvergelijkingen

$$\left. \begin{aligned} \varrho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -g \varrho \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g \varrho}{q'^3 C^2} |s| s_x + F_x, \\ \varrho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= -g \varrho \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{g \varrho}{q'^3 C^2} |s| s_y + F_y. \end{aligned} \right\} \quad (85)$$

Daar de coördinaatassen naar goedvinden kunnen worden gekozen, geldt ook voor een willekeurige richting  $l$

$$\varrho \frac{\partial v_l}{\partial t} = -g \varrho \frac{\partial h}{\partial l} - \frac{g \varrho}{q'^3 C^2} |s| s_l + F_l, \quad (86)$$

waar de index  $l$  dient om de componenten van  $v$ ,  $s$  en  $F$  in de gekozen richting aan te wijzen.

§ 130. *Kleine veranderingen van een bewegingstoestand.* Bijkomstige bewegingstoestand. Er doen zich gevallen voor, waarin een berekende bewegingstoestand kleine wijzigingen of correcties moet ondergaan. Men wenscht b.v. aan een der voorkomende constanten, zooals  $C$ , een andere waarde te geven. Of wel, men heeft eerst zekere kleine, in  $F_x$  en  $F_y$  begrepen, krachten verwaarloosd en verlangt die nu in rekening te brengen. Ook kan het voorkomen dat in ander opzicht de gevonden oplossing niet genoegzaam aan de vergelijkingen voldoet en alleen door het aanbrengen van zekere denkbeeldige krachten zou kunnen worden verwezenlijkt (§ 38); de aan te brengen wijziging zal dan hierin bestaan, dat die krachten worden weggelaten.

In al deze gevallen kan de volgende methode dienen. Men stelt twee stellen van vergelijkingen op, nl. die waaraan de gevonden oplossing voldoet, en die waaraan in werkelijkheid voldaan moet worden, waarbij men de waarden  $h$ ,  $v$ ,  $s$ ,  $F$ , die voor de verschillende grootheden gevonden zijn, onderscheidt van de waarden die zij bij de juiste oplossing zullen hebben, en die men door  $h + \delta h$ ,  $v + \delta v$ ,  $s + \delta s$ ,  $F + \delta F$  kan voorstellen. Vervolgens trekt men elke vergelijking met  $h$ ,  $v$ , enz. af van de overeenkomstige vergelijking met  $h + \delta h$ ,  $v + \delta v$ , enz. Dit komt neer op een „variatie” van de in het eerste geval geldende vergelijkingen; elke term wordt vervangen door de verandering die hij ondergaat als men van den eersten tot den

tweeden bewegingstoestand overgaat. Mag men nu aannemen dat de verschillen  $\delta h$ ,  $\delta v$ , enz. zoo klein zijn dat tweede machten en producten ervan mogen worden verwaarloosd, dan krijgt men, en dit vereenvoudigt de zaak zeer, voor de bepaling van deze grootheden lineaire vergelijkingen.

Men kan de grootheden  $\delta h$ ,  $\delta v$ , enz. zelf als verhoogingen, snelheidscomponenten enz. opvatten, en komt zoo tot de voorstelling van een „bijkomstigen” bewegingstoestand die met den oorspronkelijken wordt samengesteld, of daarop wordt gesuperponeerd.

De door de variatie van de oorspronkelijke vergelijkingen verkregen vergelijkingen met  $\delta h$ ,  $\delta v$ , enz. kunnen de bewegingsvergelijkingen voor den bijkomstigen toestand worden genoemd.

De eerste daarvan is de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial \delta h}{\partial t} + \frac{\partial \delta s_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta s_y}{\partial y} = 0,$$

die uit (81) volgt. De eerste term b.v. ontstaat als men  $\frac{\delta h}{\partial t}$  aftrekt van  $\frac{\partial(h + \delta h)}{\partial t}$ .

Dat in de verdere bewegingsvergelijkingen, die uit (83) worden afgeleid, de termen

$$e \frac{\partial \delta v_x}{\partial t}, -g e \frac{\partial \delta h}{\partial x}, \delta F_x, \text{ enz.}$$

voorkomen, is aanstonds duidelijk. De vraag is nog maar wat er van de weerstandstermen wordt.

§ 131. *De weerstanden bij een bijkomstige beweging.* De regels voor deze worden betrekkelijk eenvoudig als men onderstelt dat bij de oorspronkelijke bewegingen de hoogteveranderingen  $h$  klein zijn in vergelijking met  $q$  en dus ook met de werkelijke diepte  $q'$ . Daar nl., bij den overgang tot den nieuwen toestand,  $\delta h$  klein ondersteld wordt ten opzichte van  $h$ , zal deze  $\delta h$ , die tevens de verandering van  $q'$  is, zoo klein kunnen worden ten opzichte van  $q'$  zelf, dat men in den noemer van de weerstandstermen in (85) deze laatste grootheid als onveranderlijk kan beschouwen.

Men kan nu de variatie der weerstandstermen uitvoeren zonder een bepaalde onderstelling omtrent de weerstandswet te maken. Als  $q'$  ondersteld wordt op de beschouwde plaats vast te staan, moet de weerstand per volume-eenheid een of andere bepaalde functie van den stroom  $s$ , d.i. van  $\sqrt{s_x^2 + s_y^2}$  zijn, stel

$$W = \varphi (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}).$$

De weerstandsterm in de eerste der vergelijkingen (83) wordt dan

$$-\frac{s_x}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2}} \varphi (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}),$$

of, als men een nieuw functieteeken invoert,

$$-s_x \psi (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}). \tag{87}$$

Evenzoo komt in de tweede bewegingsvergelijking de term

$$-s_y \psi (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}) \tag{88}$$

voor.

De variatie van (87) is

$$-\psi (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}) \cdot \delta s_x - \psi' (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}) \cdot \frac{s_x^2}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2}} \delta s_x -$$

$$-\psi' (\sqrt{s_x^2 + s_y^2}) \cdot \frac{s_x s_y}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2}} \delta s_y,$$

en voor die van (88) vindt men een dergelijke uitdrukking. Stelt men,  $\sqrt{s_x^2 + s_y^2}$  weer door  $s$  vervangende,

$$\psi(s) + \frac{s_x^2}{s} \psi'(s) = a, \quad \psi(s) + \frac{s_y^2}{s} \psi'(s) = b, \quad \frac{s_x s_y}{s} \psi'(s) = c, \tag{89}$$

dan worden de vergelijkingen voor de bijkomstige beweging

$$\left. \begin{aligned} e \frac{\partial \delta v_x}{\partial t} &= -g e \frac{\partial \delta h}{\partial x} - a \delta s_x - c \delta s_y + \delta F_x, \\ e \frac{\partial \delta v_y}{\partial t} &= -g e \frac{\partial \delta h}{\partial y} - b \delta s_y - c \delta s_x + \delta F_y. \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

De weerstanden worden daarin als lineaire functiën van de stroomcomponenten  $\delta s_x$  en  $\delta s_y$  voorgesteld, echter met deze complicatie, dat de weerstand in de eene richting ook van den stroom in de andere afhangt, en wel zoo dat de coëfficiënt van  $\delta s_y$  in de eerste vergelijking gelijk is aan dien van  $\delta s_x$  in de tweede.

Ter vereenvoudiging kan men de  $X$ -as in de richting kiezen, die op de beschouwde plaats de stroom  $s$  bij den oorspronkelijken bewegingstoestand heeft. Dan is, als men onder  $s$  de absolute grootte van den stroom verstaat,  $s_x = s$ ,  $s_y = 0$  en dus volgens (89)

$$a = \psi(s) + s \psi'(s), \quad b = \psi(s), \quad c = 0. \quad (91)$$

Men ziet aan de vergelijkingen (90) dat nu, wegens het verdwijnen van  $c$ , de bijkomstige beweging langs de oorspronkelijke stroomlijn door een weerstand van juist tegengestelde richting wordt tegengegaan en hetzelfde geldt van de bijkomstige beweging loodrecht op de stroomlijn. De in de twee gevallen te pas komende, door (91) bepaalde, weerstandscoefficienten  $a$  en  $b$  zouden aan elkaar gelijk zijn, als de weerstandswet lineair was. Want dan zou  $\varphi(s) = k s$ ,  $\psi(s) = k$  en  $\psi'(s) = 0$  zijn. In het algemeen zijn  $a$  en  $b$  van elkander verschillend. Bij de hier dikwijls aangenomen quadratische weerstandswet is

$$\psi(s) = \frac{g e}{q'^3 C^2} s.$$

Men ziet dit als men (87) en (88) met de weerstandstermen in (85) vergelijkt. Dientengevolge worden de waarden (91) van  $a$  en  $b$

$$a = 2 \frac{g e}{q'^3 C^2} s, \quad b = \frac{g e}{q'^3 C^2} s.$$

Loodrecht op de oorspronkelijke stroomrichting is dus de weerstand tegen de bijkomstige beweging half zoo groot als in die stroomrichting, en wel is de coëfficiënt  $b$ , die bij de eerstgenoemde richting de verhouding tusschen den bijkomstigen weerstand en den bijkomstigen stroom bepaalt, gelijk aan de verhouding tusschen weerstand en stroom bij de oorspronkelijke beweging.

Overigens kan worden opgemerkt dat, ofschoon de weerstandscoefficienten  $a$ ,  $b$  en  $c$  die nu werden ingevoerd, juist omdat zij van den oorspronkelijken stroom afhangen, in den regel van punt tot punt veranderen, zij dezelfde waarden hebben voor verschillende bijkomstige bewegingen die men zich, op een zelfden aanvankelijken toestand gesuperponeerd, kan voorstellen.

§ 132. *Betrekking tusschen twee stationaire bewegingstoestanden bij lineaire weerstandswet.* De in §§ 127 en 128 opgestelde bewegingsvergelijkingen worden eenvoudiger als  $h$  en  $v$  onafhankelijk van den tijd zijn en voor de weerstandstermen wordt genomen  $-k s_x$  en  $-k s_y$ . Stel nu dat er in de beschouwde watermassa, door wijziging van de omstandigheden die de beweging bepalen, twee verschillende toestanden mogelijk zijn. Dan heeft men, als men deze door de indices 1 en 2 van elkaar onderscheidt,

$$\frac{\partial s_{1x}}{\partial x} + \frac{\partial s_{1y}}{\partial y} = 0,$$

$$0 = -g e \frac{\partial h_1}{\partial x} - k s_{1x} + F_{1x},$$

$$0 = -g e \frac{\partial h_1}{\partial y} - k s_{1y} + F_{1y},$$

$$\frac{\partial s_{2x}}{\partial x} + \frac{\partial s_{2y}}{\partial y} = 0,$$

$$0 = -g \rho \frac{\partial h_2}{\partial x} - k s_{2x} + F_{2x},$$

$$0 = -g \rho \frac{\partial h_2}{\partial y} - k s_{2y} + F_{2y}.$$

Uit deze vergelijkingen vindt men gemakkelijk

$$0 = -g \rho \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) + F_{1x} s_{2x} + F_{1y} s_{2y} - F_{2x} s_{1x} - F_{2y} s_{1y},$$

waaruit de weerstandstermen zijn verdwenen. Ter bekorting zijn de grootheden

$$\sigma_x = s_{2x} h_1 - s_{1x} h_2, \quad \sigma_y = s_{2y} h_1 - s_{1y} h_2 \tag{92}$$

ingevoerd. Men kan ook schrijven

$$0 = -g \rho \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) + F_1 s_2 \cos \vartheta - F_2 s_1 \cos \vartheta' = 0, \tag{93}$$

als men de absolute grootte der krachten en stroomen door  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  voorstelt en den hoek tusschen  $F_1$  en  $s_2$  met  $\vartheta$ , dien tusschen  $F_2$  en  $s_1$  met  $\vartheta'$  aanwijst.

Men beschouwe nu het vloeistofgebied dat binnen een of andere gesloten lijn  $l$  ligt. Na het daardoor omvatte deel van het horizontale vlak in oneindig kleine deelen verdeeld te hebben, kan men formule (93), genomen voor een punt van zoodanig element  $dS$ , met de grootte daarvan vermenigvuldigen en vervolgens al de hierdoor verkregen vergelijkingen, op de verschillende elementen betrekking hebbende, bij elkaar optellen. Dan ontstaat uit den term met  $\sigma_x$  en  $\sigma_y$  een grootheid die alleen van de waarden van  $\sigma_x$  en  $\sigma_y$  aan den omtrek  $l$  afhangt. Dit ziet men gemakkelijk als men zich een aanschouwelijke voorstelling van dien term maakt. Men kan zich nl. verbeelden dat water, of iets anders, zich op zoodanige wijze door het gebied beweegt, dat  $\sigma_x$  en  $\sigma_y$  de componenten van den stroom zijn, op dezelfde wijze als  $s_x$  en  $s_y$  dat zijn van de werkelijk voorkomende stroomen. Geeft men dan aan het element  $dS$  den vorm van een oneindig kleinen rechthoek met de zijden evenwijdig aan de coördinaatassen, dan leert een beschouwing zooals in § 127 werd gebezigd dat

$$\left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) dS \tag{94}$$

aangeeft, hoeveel er door den omtrek van het element heen, meer naar buiten dan naar binnen stroomt. Men kan dit tot elementen van willekeurigen vorm uitbreiden, en daar de algebraïsche som van hetgeen de elementen elk op zich zelf door de streaming winnen gelijk moet zijn aan de winst van het geheele gebied, blijkt het dat de som der uitdrukkingen (94) gegeven wordt door wat er door den omtrek  $l$  meer naar buiten dan naar binnen stroomt. Stelt men dit door  $U$  voor, dan is de uitkomst der aangeduide bewerking

$$0 = -g \rho U + \int (F_1 s_2 \cos \vartheta - F_2 s_1 \cos \vartheta') dS. \tag{95}$$

Het verdient nog opmerking dat de hoeveelheid  $U$  bepaald wordt door den component van den denkbeeldigen stroom  $\sigma$  naar de normaal  $n$  van de begrenzingslijn  $l$  en dat voor dezen component blijkens (92) kan worden geschreven

$$\sigma_n = s_{2n} h_1 - s_{1n} h_2.$$

§ 133. *Een reciprociteitsstelling voor stationaire toestanden bij lineaire weerstandswet.* Men kan uit (95) een interessant gevolg afleiden als men onderstelt dat de eerste der beschouwde toestanden in de bewegingen bestaat, die onder bepaalde omstandigheden in werkelijkheid door zekere krachten  $F_1$  worden teweeggebracht, en voor den tweeden een doelmatig gekozen fictieven toestand neemt. Voor  $l$  kan de geheele omtrek van het gebied worden genomen; die lijn loopt dus langs de kusten en door de zeegaten.

Er zal worden aangenomen dat in deze laatste  $h_1 = 0$  is; aan de kusten is noodzakelijk  $s_{1n} = 0$ , en daar is  $h_1$  de verhooging die door de krachten  $F_1$  wordt veroorzaakt.

Daarentegen worde de tweede, denkbeeldige, toestand hierdoor teweeg gebracht, dat aan een klein deel der kust nabij een punt  $Q$  (figuur 28, § 39), zoo klein dat in alle punten daarvan  $h_1$  even groot kan worden geacht, stel  $h_{1Q}$ , gestadig water aan het gebied wordt onttrokken of daarin wordt gestort. Per tijdseenheid zij het volume daarvan  $V$  en dit worde positief gerekend als het wordt toegevoerd. Terwijl dus op de beschouwde plaats  $s_{2n}$  van nul verschilt, is die grootheid verder overal aan de kusten 0; krachten  $F_2$ , die ergens binnen het gebied zouden werken, komen bij den tweeden toestand niet voor. Eindelijk zij in de zeegaten ook  $h_2 = 0$ .

Neemt men een en ander in aanmerking, dan blijkt de grootheid  $\sigma_n$  overal nul te zijn behalve aan het kleine deel der kust nabij het punt  $Q$ . Daar is  $\sigma_n = s_{2n} h_{1Q}$ , en daar dit zich slechts door den factor  $h_{1Q}$  van den stroomcomponent  $s_{2n}$  onderscheidt, is wat vroeger  $U$  genoemd werd niet anders dan het volume  $V$ , met  $h_{1Q}$  vermenigvuldigd en met het tegengestelde teeken genomen, omdat  $U$  voorstelde wat meer naar buiten dan naar binnen ging, terwijl een positieve waarde van  $V$  toevoer van water beteekent. Zoo komt men tot de vergelijking

$$h_{1Q} = -\frac{1}{g \rho V} \int F_1 s_2 \cos \vartheta dS.$$

Met behulp hiervan kan men de verhooging  $h_1$  die de krachten  $F_1$  in het punt  $Q$  teweegbrengen berekenen, als men weet welken stroom  $s_2$  in elk punt van het gebied het toevoeren van water bij het punt  $Q$  ten gevolge heeft. Het blijkt uit het somteeken in de formule dat de op elk element werkende krachten het hunne tot de verhooging bijdragen. De verhooging die behoort bij de kracht  $F_1$ , uitgeoefend op de vloeistof boven of beneden een klein deel  $A$  van het horizontale vlak, liggende bij een punt  $P$ , is, als men nu de indices weglaat,

$$h_Q = -\frac{A F s_P \cos \vartheta}{g \rho V},$$

een uitkomst die met verg. (10) van § 39 overeenstemt.

§ 134. *Toepassing op bijkomstige bewegingstoestanden.* Men kan, als men eenmaal de bewegingsvergelijkingen voor zulke toestanden heeft opgesteld, verder ter vereenvoudiging in plaats van  $\delta s_x$ ,  $\delta s_y$ ,  $\delta h$ ,  $\delta F_x$ ,  $\delta F_y$  schrijven  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $h$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ , zoodat de eerste grootheden de bij een bijkomstigen toestand, op zich zelf beschouwd, voorkomende stroomen en verhoogingen voorstellen, en  $F_x$ ,  $F_y$  de krachten die bij den gewijzigden toestand meer dan bij den oorspronkelijken in het spel zijn. Voor twee bijkomstige toestanden 1 en 2, die beide op een zelfden oorspronkelijken toestand gesuperponeerd gedacht moeten worden, gelden dan vergelijkingen die van de in het begin van § 132 voorkomende alleen daardoor verschillen, dat als weerstandstermen voorkomen

$$\begin{aligned} -a s_{1x} - c s_{1y}, & \quad -c s_{1x} - b s_{1y} \\ -a s_{2x} - c s_{2y}, & \quad -c s_{2x} - b s_{2y}. \end{aligned}$$

Gaat men nu te werk zooals bij de afleiding van (93) gedaan werd, dan moeten deze grootheden bij elkaar worden opgeteld, nadat de eerste en tweede met  $s_{2x}$ ,  $s_{2y}$  en de beide andere met  $-s_{1x}$ ,  $-s_{1y}$  zijn vermenigvuldigd. Men ziet dat ook nu weer de weerstandstermen verdwijnen, zoodat men tot dezelfde besluiten komt als in de vorige §.

Het is juist voor de bepaling van bijkomstige toestanden, nl. van de veranderingen die de kracht van CORIOLIS, de centrifugaalkracht, de kracht van BERNOULLI in een eerst berekenden toestand brengen, dat verg. (10) van § 39 verschillende malen gebruikt is. Natuurlijk zou men daarmee niets verder zijn gekomen als men volkomen strenge oplossingen verlangde, want het fictieve in § 133 ingevoerde geval is niet gemakkelijker

te behandelen dan de werkelijke bewegingstoestand. De reciprociteitsstelling is echter van eenig nut geweest omdat men redelijk wel kan schatten of gissen hoe water dat op een bepaalde plaats van de kust wordt toegevoerd door het gebied zal stroomen. Uit den aard der zaak blijft dit altijd een enigszins ruwe benadering; men kan b.v. bij de bedoelde schatting bezwaarlijk rekening houden met de juiste grootte der weerstanden die bij een bijkomstige beweging in het spel zijn. Hoogstens kan men tot op zekere hoogte in aanmerking nemen dat, zooals uit het in § 131 gezegde volgt, de stroomen die door het toevoeren van water aan een punt der kust worden teweeggebracht, een zekere voorliefde voor richtingen dwars op de oorspronkelijke stroomlijnen zullen vertoonen.

§ 135. *Vergelijkingen voor de beweging in een kanaal.* Laat de  $X$ -as in de lengterichting van het kanaal vallen en zij  $s$  de stroom door de volle doorsnede, dus, als  $b$  de breedte is, wat vroeger (§ 126)  $b s_x$  werd genoemd. Dan wordt de continuïteitsvergelijking (81)

$$\frac{\partial s}{\partial x} = -b \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (96)$$

terwijl de eerste der bewegingsvergelijkingen (83) kan geschreven worden in den vorm

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -b g q \frac{\partial h}{\partial x} \mp \frac{b q}{\rho} W + \frac{b q}{\rho} F,$$

zooals men vindt als men  $v_x$  vervangt door  $\frac{s}{b q'}$ , of, in de onderstelling dat de waarden van  $h$  klein zijn in vergelijking met  $q$ , door  $\frac{s}{b q}$ . De weerstandsterm moet met het bovenste teeken worden genomen als de stroom in de positieve richting loopt, en met het onderste teeken als hij de tegengestelde richting heeft; in het eerste geval heeft nl.  $\frac{v_x}{v}$  de waarde  $+1$  en in het tweede de waarde  $-1$ .

Is er geen uitwendige kracht en ziet men geheel van den weerstand af, dan wordt de bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -b g q \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (97)$$

uit welke vergelijking in verband met (96) kan worden afgeleid dat golven zich met de snelheid

$$w = \sqrt{q g} \quad (98)$$

in de richting der lengte van het kanaal kunnen voortplanten.

Zoodanige golven, in de richting der positieve  $X$ -as gaande, worden b.v. voorgesteld door de formules

$$h = a \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p \right), \quad (99)$$

$$s = b w a \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p \right), \quad (100)$$

waardoor, zooals bij substitutie blijkt, aan (96) en (97) voldaan wordt.

Deze vergelijkingen stellen schommelende bewegingen en wel „enkelvoudige” trillingen voor, gekenmerkt door de frequentie  $n$ , de periode  $T = \frac{2\pi}{n}$ , de amplitude  $a$  voor de hoogte en  $b w a$  voor den stroom, terwijl de phase door  $p$  bepaald wordt.

Ofschoon de verschijnselen door de weerstanden ingewikkelder worden, kan men zich toch van de door (98) bepaalde voortplantingsnelheid en van de daarmee berekende golflengte

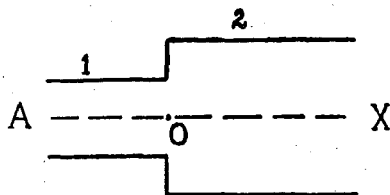
$$\lambda = w T$$

bedienen om ten ruwste na te gaan hoe groot de afmetingen der Zuiderzee in vergelijking met de golflengte der getijden zijn, en welke phaseverschillen tusschen het eene punt en het andere kunnen voorkomen (verg. § 40).

Dergelijke formules als de bovenstaande gelden ook voor een voortplanting in de richting der negatieve  $X$ -as.

§ 136. *Getijgolven in een kanaal dat zich plotseling verwijdt.* Telkens wanneer de omstandigheden onder welke de voortplanting plaats heeft veranderen, zullen uit aankomende golven nieuwe, die terugloopen, ontstaan. Zulk een terugkaatsing heeft b.v. plaats aan het einde van een kanaal, niet alleen wanneer het daar is afgesloten, maar ook als het daar in een uitgestrekt bekken uitloopt.

In figuur 51 stellen 1 en 2 op elkander volgende kanalen van ongelijke breedte voor. Bij het eerste denke men aan een zeegat dat bij  $A$  met de volle zee in gemeenschap staat, zoodat de veranderingen in de waterhoogte op die plaats als gegeven beschouwd kunnen worden. Om thans met geen andere terugkaatsingen dan die aan de grens der twee kanalen te doen te hebben, stelle men zich voor dat 2 naar rechts tot in het oneindige voortloopt. De  $X$ -as worde gekozen zooals in de figuur is aangewezen, en de oorsprong  $O$  ligge op de grens der twee kanalen.



Figuur 51.

Ter vereenvoudiging wordt aangenomen dat de diepte  $q$  in beide even groot is, zoodat dit ook van de voortplantingsnelheid  $w$  geldt, en wordt van de weerstanden afgezien. Ter onderscheiding worden, voor zoover noodig, de grootheden die op 1 en 2 betrekking hebben, door de indices 1 en 2 van elkaar onderscheiden, terwijl de grootheden waardoor de teruggekaatste golven gekenmerkt worden, door accenten worden aangewezen. De volgende berekening geldt niet alleen wanneer, zooals in de figuur,  $b_2 > b_1$  is, maar ook voor het geval  $b_2 < b_1$ .

De in 1 invallende golven kunnen nu worden voorgesteld (§ 135) door

$$h_1 = a_1 \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p_1 \right),$$

$$s_1 = b_1 w a_1 \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p_1 \right);$$

de teruggekaatste golven door

$$h_1' = a_1' \cos n \left( t + \frac{x}{w} + p_1' \right),$$

$$s_1' = -b_1 w a_1' \cos n \left( t + \frac{x}{w} + p_1' \right)$$

en de in 2 voortlopende golven door

$$h_2 = a_2 \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p_2 \right),$$

$$s_2 = b_2 w a_2 \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p_2 \right).$$

Door substitutie in de bewegingsvergelijkingen overtuigt men zich er van, dat de uitdrukkingen  $h_1'$  en  $s_1'$  even goed voldoen als  $h_1$  en  $s_1$ .

De betrekkingen tusschen de verschillende in deze formules voorkomende constanten vindt men door op te merken dat in 1 de toestanden  $h_1, s_1$  en  $h_1', s_1'$  op elkaar gesuperponeerd worden, zoodat in elk punt de hoogte door  $h_1 + h_1'$  en de stroom door  $s_1 + s_1'$  bepaald wordt, en voorts dat in  $O$  in beide kanalen de hoogte dezelfde moet zijn, en dat daar door het eene kanaal evenveel water moet toestroomen als door het andere wegvloeit. Dus,

$$\text{voor } x = 0: h_1 + h_1' = h_2, \quad s_1 + s_1' = s_2. \quad (101)$$

Het blijkt dat aan deze voorwaarden alleen dan op elk tijdstip voldaan kan worden als de drie phasegrootheden  $p_1, p_1', p_2$  aan elkaar

gelijk zijn; daarom kan voor elk daarvan  $p$  worden geschreven. Uit (101) vindt men dan verder

$$a_1 + a_1' = a_2, \quad b_1 (a_1 - a_1') = b_2 a_2,$$

waaruit volgt

$$a_1' = \frac{b_1 - b_2}{b_1 + b_2} a_1, \quad a_2 = \frac{2 b_1}{b_1 + b_2} a_1.$$

Deze uitkomsten kunnen gebruikt worden om de verticale waterbeweging aan het buiteneinde en het binneneinde van het zeevat,  $h_{bu}$  en  $h_{bi}$  met elkander te vergelijken. Aan het laatste is  $x = 0$ , aan het eerste  $x = -l$ , als  $l$  de lengte van 1 is. Men vindt

$$\begin{aligned} h_{bi} &= (a_1 + a_1') \cos n(t + p), & (102) \\ h_{bu} &= a_1 \cos n\left(t + \frac{l}{w} + p\right) + a_1' \cos n\left(t - \frac{l}{w} + p\right) = \\ &= (a_1 + a_1') \cos \frac{nl}{w} \cos n(t + p) - \\ &- (a_1 - a_1') \sin \frac{nl}{w} \sin n(t + p). \end{aligned}$$

Men kan de twee trillingen die door de termen met  $\cos n(t + p)$  en  $\sin n(t + p)$  worden voorgesteld, tot één schommeling vereenigen als men een grootheid  $r$  en een hoek  $f$  bepaalt door de formules (verg. § 139)

$$r \cos f = (a_1 + a_1') \cos \frac{nl}{w}, \quad r \sin f = (a_1 - a_1') \sin \frac{nl}{w}. \quad (103)$$

Dan wordt nl.

$$h_{bu} = r \cos \left\{ n(t + p) + f \right\}. \quad (104)$$

Tevens kan voor (102) worden geschreven

$$h_{bi} = r \frac{\cos f}{\cos \frac{nl}{w}} \cos n(t + p). \quad (105)$$

Schrijft men weer voor de golflengte  $\lambda$ , dan is

$$\frac{nl}{w} = 2\pi \frac{l}{\lambda},$$

dus een kleine hoek wanneer  $l$  veel kleiner dan de golflengte is. Verder zijn, als men  $a_1$  positief neemt, blijkens de boven gevonden waarden, zoowel  $a_1 + a_1'$  als  $a_1 - a_1'$  positief. Men kan dus aan de voorwaarden (103) voldoen met een positieve waarde van  $r$  en een hoek  $f$  die in het eerste positieve quadrant ligt.

Die hoek wordt bepaald door

$$\operatorname{tg} f = \frac{a_1 - a_1'}{a_1 + a_1'} \operatorname{tg} \frac{nl}{w} = \frac{b_2}{b_1} \operatorname{tg} \frac{nl}{w}. \quad (106)$$

Men ziet nu aan (104) en (105) wat de verhouding der amplituden van  $h_{bu}$  en  $h_{bi}$  en het verschil van hun phasen is, zoodat, wanneer  $h_{bu}$  gegeven is,  $h_{bi}$  daaruit kan worden afgeleid. Wat de amplitude betreft, deze is voor  $h_{bi}$  grooter of kleiner dan voor  $h_{bu}$  al naarmate  $f$  kleiner of grooter dan  $\frac{nl}{w}$ , d. w. z., zooals uit (106) volgt, al naarmate  $b_2$  kleiner of grooter dan  $b_1$  is. Een vernauwing zal het verticale getij aan het binneneinde van het kanaal 1 sterker doen worden dan aan het buiteneinde  $A$ , een verwijding daarentegen zwakker. Past men de gevonden uitkomsten toe op de uiterste gevallen  $b_2 = 0$  en  $b_2 = \infty$ , dan vindt men voor de amplitude aan het binneneinde in het eerste geval  $r \cdot \cos \frac{nl}{w}$  en in het tweede geval 0.

Intusschen zijn de bovenstaande berekeningen slechts met zekere benadering juist. De voor  $h_2$  en  $s_2$  opgestelde uitdrukkingen, bij welke is aangenomen dat over de volle breedte van het kanaal de toestand dezelfde is, kunnen niet tot vlak bij  $O$  gelden, maar slechts tot op zekeren afstand van dit punt. Intusschen, zoolang die afstand klein is in vergelijking met

de golflengte, zal, zooals een nadere beschouwing leert, de gemaakte fout niet groot zijn.

Zoo kunnen de medegedeelde berekeningen het begrijpelijk maken dat een uitgestrekte watermassa aan de binnenzijde van een zeegat de strekking heeft, het verticale getij te verzwakken. Tot hetzelfde besluit kan men ook nog komen, als men, zooals gedaan zal worden bij de in de volgende §§ behandelde vraagstukken, met de weerstanden rekening houdt.

§ 137. *Golfbeweging met weerstand.* Bij het onderzoek der getijbeweging kan van de uitwendige kracht  $F$  worden afgezien, maar de weerstand mag niet worden verwaarloosd. Hij werd voor elke geul evenredig aan de snelheid of aan den stroom gesteld, zoodat de bewegingsvergelijking luidt

$$\frac{\partial s}{\partial t} + ks = -bgq \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (107)$$

waar  $k$  voor elke geul een constante is. Later (§ 144) zal worden vermeld hoe de waarde daarvan aan den werkelijk bestaanden weerstand kan worden aangepast.

Het gevolg van den weerstand is dat bij de voortplanting der golven de amplitude allengs verzwakt wordt, wat in de formules voor  $h$  en  $s$  tot uitdrukking komt door een factor  $e^{-\sigma x}$ , die in den exponent de positieve constante  $\sigma$  bevat. In plaats van (99) en (100) komen nu uitdrukkingen van den vorm

$$h = ae^{-\sigma x} \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p \right),$$

$$s = ce^{-\sigma x} \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p' \right).$$

Substitueert men deze waarden in (96) en (107), dan krijgt men vergelijkingen waaruit de factor  $e^{-\sigma x}$ , die bij de differentiaties behouden blijft, door deeling wegvalt. Men kan vervolgens  $\cos n \left( t - \frac{x}{w} + p' \right)$  vervangen door

$$\cos n (p' - p) \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p \right) - \sin n (p' - p) \sin n \left( t - \frac{x}{w} + p \right)$$

en  $\sin n \left( t - \frac{x}{w} + p' \right)$  door een dergelijke uitdrukking. Bedenkt men verder dat aan de vergelijkingen slechts dan voor alle waarden van  $x$  en  $t$  kan worden voldaan, als de coëfficiënt van  $\cos n \left( t - \frac{x}{w} + p \right)$  rechts en links het-

zelfde is, en evenzoo die van  $\sin n \left( t - \frac{x}{w} + p \right)$ , dan komt men tot vier betrekkingen tusschen de standvastige grootheden. Het blijkt dat daardoor de voortplantingsnelheid  $w$ , de verzwakkingscoëfficiënt  $\sigma$ , de verhouding der amplituden  $a$  en  $c$  en het verschil der fasen  $p$  en  $p'$  bepaald worden.

Dat niet de amplituden zelf bepaald worden, maar alleen hun verhouding, is begrijpelijk; als men nl. waarden van  $h$  en  $s$ , die aan (96) en (107) voldoen, met een zelfden constanten factor vermenigvuldigt, voldoen zij nog steeds aan de vergelijkingen. Evenzoo is het natuurlijk, dat wel het phaseverschil  $p' - p$  bepaald wordt, maar niet elke phase afzonderlijk. Is nl. een stelsel van trillingen mogelijk, dan kan het ook nog bestaan als men ze alle evenveel in phase voor- of achteruit zet.

§ 138. *Werken met complexe grootheden.* De berekeningen worden zeer vereenvoudigd als men grootheden invoert, die de imaginaire eenheid  $i$  bevatten, en met name goniometrische functiën als  $\cos nt$  vervangt door uitdrukkingen met den factor

$$e^{int}.$$

Men kent de beteekenis van dergelijke uitdrukkingen; er behoeft slechts herinnerd te worden aan formules als

$$\begin{aligned}
 e^{i\psi} &= \cos \psi + i \sin \psi, \\
 e^{-i\psi} &= \cos \psi - i \sin \psi, \\
 e^{\varphi+i\psi} &= e^{\varphi} (\cos \psi + i \sin \psi), \\
 e^{\varphi-i\psi} &= e^{\varphi} (\cos \psi - i \sin \psi).
 \end{aligned}$$

De hierin uitgedrukte definities zijn zoo gekozen dat de regels voor het vermenigvuldigen, deelen en differentieeren hetzelfde blijven als in het geval van reële exponenten.

Als aan differentiaalvergelijkingen als (96) en (107) door complexe waarden voor  $h$  en  $s$  voldaan wordt, is de bedoeling dat de reële gedeelten dier uitdrukkingen de werkelijke waarden zullen zijn. Men ziet gemakkelijk dat ook die reële gedeelten op zich zelf genomen, aan de vergelijkingen voldoen, als dit met de complexe uitdrukkingen het geval is.

Is b.v. in een bepaald punt gevonden

$$h = a e^{int}$$

met een reële waarde van  $a$ , dan zal de werkelijke waarde zijn

$$h = a \cos nt.$$

De coëfficiënt waarmede  $e^{int}$  vermenigvuldigd is kan ook zeer goed complex zijn. Is hij (verg. § 139)

$$\alpha + i\beta = \mu e^{i\varphi},$$

dus

$$h = \mu e^{i(nt+\varphi)},$$

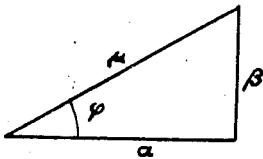
dan is de werkelijke waarde

$$h = \mu \cos (nt + \varphi).$$

Men ziet — en dit levert veel gemak op — dat zoowel de amplitude als de phase van een trilling in den coëfficiënt waarmede  $e^{int}$  vermenigvuldigd is, kunnen zijn begrepen.

Zoolang men zich aan een bepaald getij, b.v.  $M_2$ , houdt staat de factor  $e^{int}$  vast.

§ 139. *Meetkundige voorstelling.* Men kan beschouwingen over uitkomsten zooals die zich bij de getijberekeningen voordoen, met eenvoudige figuren aanschouwelijk maken.



Figuur 52.

Vooreerst kan men voor twee gegeven reële getallen  $\alpha$  en  $\beta$  altijd schrijven

$$\alpha = \mu \cos \varphi, \quad \beta = \mu \sin \varphi$$

en kan dus elke complexe uitdrukking  $\alpha + i\beta$  als volgt transformeeren:

$$\alpha + i\beta = \mu \cos \varphi + i \mu \sin \varphi = \mu e^{i\varphi}.$$

De grootte  $\mu$  kan hierbij steeds positief worden genomen en dan bepalen de algebraïsche teekens van  $\alpha$  en  $\beta$  het quadrant waarin de hoek  $\varphi$  ligt. In figuur 52 ziet men het verband tusschen  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\mu$  en  $\varphi$ .

Is verder voor een der periodiek veranderlijke groottheden, stel voor de hoogte in een bepaald punt, een uitdrukking van den vorm

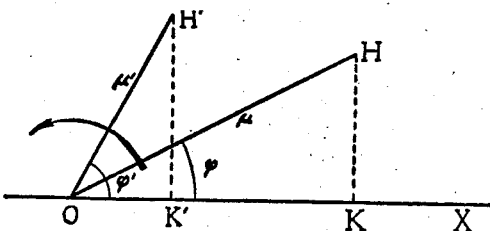
$$h = \mu e^{i(nt+\varphi)}$$

gevonden, zoodat de werkelijke waarde is

$$h = \mu \cos (nt + \varphi),$$

dan kan men als volgt te werk gaan.

Men neemt in een diagram (figuur 53) een oorsprong  $O$  en een as  $OX$



Figuur 53.

aan, en trekt uit  $O$  een vector  $OH$ , die de lengte  $\mu$  heeft, en een hoek  $\varphi$  met  $OX$  maakt; daarbij wordt eerst een bepaalde draaiingsrichting als de positieve gekozen. Stel verder dat de vector op den tijd  $t = 0$  den stand  $OH$  heeft en dan met de hoeksnelheid  $n$  om  $O$  rond-

draait, zoodat hij in een volle periode van het beschouwde getij tot zijn

eersten stand terugkeert. Op den tijd  $t$  maakt hij dan een hoek  $nt + \varphi$  met de as en de afstand waarop de projectie van het uiteinde van den vector dan van  $O$  verwijderd is, is  $\mu \cos(nt + \varphi)$ . Het heen- en weergaan van die projectie over de as geeft dus een beeld van de periodieke veranderingen der hoogte  $h$ .

Men kan op deze wijze in hetzelfde diagram de verticale schommelingen in elk der beschouwde punten weergeven. Is in een tweede punt de waterhoogte gegeven door

$$h' = \mu' e^{i(nt + \varphi')},$$

of door

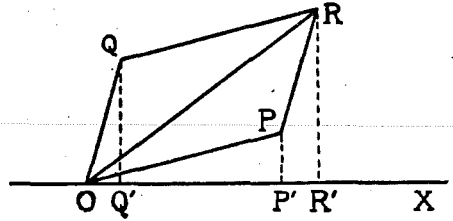
$$h' = \mu' \cos(nt + \varphi'),$$

dan beantwoordt daaraan een vector  $OH'$  met de lengte  $\mu'$ , die op den tijd 0 een hoek  $\varphi'$  met  $OX$  maakt. Zoo stellen de lengten der vectoren de amplituden op de verschillende plaatsen voor, terwijl de phaseverschillen door de hoeken tusschen de vectoren worden aangegeven. Op deze wijze zijn in figuur 4 (§ 11) de constanten van het hoofdgetij voorgesteld.

Natuurlijk kunnen op dezelfde wijze ook vectoren die op de stroomen  $s$  betrekking hebben in de figuur worden opgenomen.

Het verdient bij deze wijze van voorstellen nog de aandacht dat twee schommelingen worden samengesteld door op de vectoren  $OP$  en  $OQ$  (figuur 54) die daarop betrekking hebben een parallellogram te construeeren.

De diagonaal  $OR$  daarvan is de vector die de resulterende schommeling voorstelt; men ziet nl. gemakkelijk dat de  $x$  voor de projectie  $R'$  van haar uiteinde de algebraïsche som is van de waarden die  $x$  voor de projecties  $P'$  en  $Q'$  heeft.



Figuur 54.

Een voorbeeld hiervan heeft men in de drie stroomen die in een vertakkingspunt ter sprake komen. Is de positieve richting in twee der geulen naar dat punt toe en in de derde er van af gekozen, dan is de derde stroom de algebraïsche som van den eersten en den tweeden; de voorstellende vectoren zullen derhalve de zijden en de diagonaal van een parallellogram zijn.

§ 140. *Verdere beschouwing van een golfbeweging met weerstand.* Men kan aan (96) en (107) voldoen door te stellen

$$\left. \begin{aligned} h &= a e^{int+ux}, \\ s &= c e^{int+ux}. \end{aligned} \right\} \quad (108)$$

Bij het differentieeren naar  $x$  of  $t$  blijft dan namelijk de exponentieele factor

$$e^{int+ux}$$

bestaan, zoodat hij door deeling wegvalt en twee betrekkingen overblijven, waaraan steeds door geschikte keus der constante grootheden kan voldaan worden.

Uit (96) volgt

$$uc = -inba$$

en uit (107)

$$(in+k)c = -bqgua$$

en hieruit leidt men af

$$u^2 = \frac{n}{gq} (-n + ik), \quad (109)$$

$$c = -\frac{ibn}{u} a. \quad (110)$$

Uit (109) vindt men voor  $u$  twee gelijke complexe waarden met het tegengestelde teeken. Van nu af zal onder  $u$  één dier waarden verstaan

worden en voor de andere  $-u$  worden geschreven. Dus komen er twee oplossingen. De eerste is

$$h = \alpha e^{int + ux}, \quad (111)$$

$$s = -\frac{ibn}{u} \alpha e^{int + ux} \quad (112)$$

en de tweede

$$h = \alpha' e^{int - ux}, \quad (113)$$

$$s = \frac{ibn}{u} \alpha' e^{int - ux}. \quad (114)$$

Om uit (109)  $u$  zelf af te leiden verdient het aanbeveling een hulphoek  $\vartheta$  in te voeren, bepaald door

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{k}{n}. \quad (115)$$

Dan wordt nl.

$$u^2 = \frac{n^2}{gq} (-1 + i \operatorname{tg} \vartheta) = -\frac{n^2}{gq \cos \vartheta} (\cos \vartheta - i \sin \vartheta) = -\frac{n^2}{gq \cos \vartheta} e^{-i\vartheta}.$$

Men kan dus stellen:

$$u = i \frac{n}{\sqrt{gq \cos \vartheta}} \cdot e^{-1/2 i \vartheta} = \frac{n}{\sqrt{gq \cos \vartheta}} (\sin 1/2 \vartheta + i \cos 1/2 \vartheta), \quad (116)$$

een complexe uitdrukking waarvan zoowel het reële als het complexe deel positief is.

Stelt men voor het reële deel  $\sigma$  en voor het imaginaire  $i \frac{n}{w}$ , en verder in plaats van  $\alpha'$  de uitdrukking  $\mu e^{i n p}$ , dan gaat (113) over in

$$h = \mu e^{-\sigma x} + i n \left( t - \frac{x}{w} + p \right),$$

zoodat de werkelijke waarde wordt

$$h = \mu e^{-\sigma x} \cos n \left( t - \frac{x}{w} + p \right).$$

Een dergelijke uitdrukking vindt men voor  $s$ . Te zamen stellen de twee formules (113) en (114) een voortplanting in de richting van  $x$  voor, met de voortplantingsnelheid  $w$  en den verzwakkingscoëfficiënt  $\sigma$ , die nu beide bekend worden (verg. § 137).

Op dezelfde wijze besluit men uit (111) en (112) tot een bewegings-toestand die zich van den vorigen onderscheidt doordat in den exponent  $+\sigma x$  en onder het cosinus-teeken  $+\frac{x}{w}$  staat. Dit is een voortplanting in tegengestelde richting als zoeven, opnieuw met de snelheid  $w$  en den verzwakkingscoëfficiënt  $\sigma$ .

§ 141. *Geulen van verschillende diepte naast elkaar.* Stel dat naast elkaar liggen een aantal kanalen met de breedten  $b_1, b_2, \dots$ , de diepten  $q_1, q_2, \dots$ , en de weerstandcoëfficiënten  $k_1, k_2, \dots$ . Het water kan zonder noemenswaardigen weerstand zijdelings van het eene kanaal naar het andere vloeien, zoodat de hoogte  $h$  voor een bepaalde waarde van  $x$  (welke coördinaat in de gemeenschappelijke lengterichting loopt) in alle kanalen dezelfde is. Stellen  $s_1, s_2, \dots$  de stroomen in de verschillende kanalen door de doorsnede in een bepaald punt  $x$  voor, dan is de totale stroom in de lengterichting

$$s = s_1 + s_2 + \dots \quad (117)$$

Er is nu slechts één continuïteitsvergelijking, nl. als  $b$  de gezamenlijke breedte is,

$$\frac{\partial s}{\partial x} = -b \frac{\partial h}{\partial t},$$

maar men heeft voor elk kanaal een afzonderlijke bewegingsvergelijking:

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} + k_1 s_1 = -b_1 g q_1 \frac{\partial h}{\partial x},$$

$$\frac{\partial s_2}{\partial t} + k_2 s_2 = -b_2 g q_2 \frac{\partial h}{\partial x},$$

enz.

Daar zoowel in  $s_1$ , als in  $s_2$ , enz. de tijd alleen in den factor  $e^{int}$  voorkomt heeft men

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} = i n s_1, \quad \frac{\partial s_2}{\partial t} = i n s_2, \quad \text{enz.}$$

en men kan dus uit de voorgaande vergelijkingen afleiden

$$s_1 = - \frac{b_1 g q_1}{i n + k_1} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad s_2 = - \frac{b_2 g q_2}{i n + k_2} \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{enz.}, \quad (118)$$

zoodat uit (117) volgt

$$s = - \sum \frac{b g q}{i n + k} \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (119)$$

Zoover gekomen, kan men nu verder met het samenstel van naast elkaar liggende geulen als met één geul werken; terwijl (96) denzelfden vorm als vroeger behoudt, wordt (107) door (119) vervangen. De substitutie (108) leidt weer tot de betrekking (110), maar in plaats van (109) vindt men nu voor de bepaling van  $u$

$$u^2 = \frac{b n}{\sum \frac{b g q}{-n + i k}}. \quad (120)$$

De twee mogelijke bewegingstoestanden worden weer door (111)—(114) voorgesteld.

§ 142. *Verband tusschen waterhoogte en stroom aan het eene uiteinde van een geul en de overeenkomstige grootheden aan het andere einde.* Blijkens het voorgaande is de meest algemeene bewegingstoestand waarmee wij in een geul te rekenen hebben, onverschillig of de geul uit verschillende naast elkaar liggende deelen van ongelijke diepte bestaat of niet,

$$\left. \begin{aligned} h &= a e^{int + ux} + a' e^{int - ux}, \\ s &= \frac{i b n}{u} (-a e^{int + ux} + a' e^{int - ux}). \end{aligned} \right\} \quad (121)$$

De hierin voorkomende constanten  $a$  en  $a'$  kunnen gevonden worden, zoodra men twee gegevens heeft, b.v. de waarden van  $h$  en  $s$  aan het begin van het kanaal. Noemt men die waarden  $h_0$  en  $s_0$ , en neemt men aan het begin  $x = 0$ , dan is

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= a e^{int} + a' e^{int}, \\ s_0 &= \frac{i b n}{u} (-a e^{int} + a' e^{int}), \end{aligned} \right\}$$

waaruit men gemakkelijk  $a e^{int}$  en  $a' e^{int}$  kan oplossen. Substitueert men de daarvoor gevonden waarden in (121) en stelt men tevens  $x = l$  (de lengte van het kanaal), dan vindt men voor de waarden van  $h$  en  $s$  aan het einde

$$\left. \begin{aligned} h_l &= H_h h_0 + H_s s_0, \\ s_l &= S_h h_0 + S_s s_0, \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

waar de coëfficiënten  $H_h$ ,  $H_s$ ,  $S_h$ ,  $S_s$  de volgende waarden hebben:

$$\left. \begin{aligned} H_h &= \frac{1}{2} (e^{ul} + e^{-ul}), \\ H_s &= \frac{i u}{2 b n} (e^{ul} - e^{-ul}), \\ S_h &= -\frac{i b n}{2 u} (e^{ul} - e^{-ul}), \\ S_s &= \frac{1}{2} (e^{ul} + e^{-ul}). \end{aligned} \right\} \quad (123)$$

§ 143. *Verdeeling van een geul in op elkaar volgende vakken.* Als de breedte en de diepte of de omstandigheden wat de nevengeulen betreft, in de richting der lengte veranderen, kan men verschillende achter elkaar geplaatste vakken onderscheiden, voor elk waarvan het bovengezegde geldt. Ook voor het geheele samenstel bestaan dan betrekkingen van de gedaante (122) tusschen de waarden van  $h$  en  $s$  aan de uiteinden; de

daarin voorkomende coëfficiënten kunnen worden afgeleid uit die welke voor de vakken elk afzonderlijk zijn gevonden.

Zijn nl.  $h_0$  en  $s_0$  de waarden aan het begin van het eerste vak,  $h_1$  en  $s_1$  die aan het einde daarvan, en  $h_2$  en  $s_2$  de waarden aan het einde van het tweede vak, dan kan men voor het eerste vak stellen

$$h_1 = H'_h h_0 + H'_s s_0, \quad s_1 = S'_h h_0 + S'_s s_0 \quad (124)$$

en voor het tweede

$$h_2 = H''_h h_1 + H''_s s_1, \quad s_2 = S''_h h_1 + S''_s s_1 \quad (125)$$

en men krijgt de gezochte formules voor de twee vakken samen als men de waarden (124) in (125) substitueert. Zoo kan men voortgaan.

Ter controleering van de lange berekeningen kan men zich bedienen van de betrekking

$$H_h S_s - H_s S_h = 1 \quad (126)$$

die tusschen de vier coëfficiënten bestaat. Voor een enkel vak volgt deze uit de vergelijkingen (123), en wanneer men aldus weet dat voor twee op elkaar volgende vakken, zooals zoeven beschouwd werden,

$$H'_h S'_s - H'_s S'_h = 1 \quad \text{en} \quad H''_h S''_s - H''_s S''_h = 1$$

is, kan men daaruit afleiden dat de formule ook voor het samenstel der vakken doorgaat. Men kan nl. aantoonen dat, als  $H_h, H_s, S_h, S_s$  de coëfficiënten daarvoor zijn,

$$H_h S_s - H_s S_h = (H'_h S'_s - H'_s S'_h) (H''_h S''_s - H''_s S''_h)$$

is.

Men kan deze redeneering zoover als noodig is voortzetten, telkens een vak meer nemende.

In het verifieeren van (126) ligt een dubbele contrôle, daar de voorkomende getallen alle complex zijn. Het reële gedeelte van  $H_h S_s - H_s S_h$  moet 1 en het imaginaire gedeelte moet 0 worden.

§ 144. *Bepaling van de weerstandscoefficiënten k.* Voor elke geul is de waarde van  $k$  aangepast aan de constante van EYTELWEIN  $C$  door de voorwaarde te stellen, dat bij een volle stroomschommeling de negatieve arbeid van den fictieven door  $k$  gemeten weerstand gelijk is aan dien van den werkelijken weerstand, die door  $C$  bepaald wordt. Aangezien de amplitude der schommelingen in een bepaald punt constant is, en dus de arbeid van elk dezer weerstanden bij den heengang even groot is als bij den teruggang, kan men even goed de beide arbeiden, berekend voor het tijdsverloop tusschen twee opeenvolgende stroomkenteringen, aan elkaar gelijk stellen. Stel dat gedurende die periode de snelheid  $v$  de positieve richting heeft, dan is de bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g}{C^2 q} v^2.$$

Men vindt deze formule als men in de eerste van (83)  $F_x = 0$  stelt, voor  $W$  de waarde (84), door  $q$  gedeeld, invoert en  $v_x$  door  $v$  vervangt.

In het voorgaande is echter gesteld

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - k v,$$

van welke formule zich (107) alleen door den factor  $bq$  onderscheidt.

De laatste termen in deze vergelijkingen stellen den weerstand  $W$  voor, die per massa-eenheid werkt. Is nu op de beschouwde plaats de snelheid

$$v = v_m \cos nt$$

( $v_m$  de maximale snelheid of amplitude), dan is de bedoelde arbeid

$$\int_{-\frac{\pi}{2n}}^{+\frac{\pi}{2n}} W v dt,$$

waarbij de keus der grenzen duidelijk zal zijn. Tusschen de oogenblikken  $t = -\frac{\pi}{2n}$  en  $t = +\frac{\pi}{2n}$  is de snelheid positief, terwijl zij op die tijdstippen nul is.

De voorwaarde luidt dus:

$$k \int_{-\frac{\pi}{2n}}^{+\frac{\pi}{2n}} v^2 dt = \frac{g}{C^2 q} \int_{-\frac{\pi}{2n}}^{+\frac{\pi}{2n}} \frac{\pi}{v^3} dt,$$

of

$$k \int_{-\frac{\pi}{2n}}^{+\frac{\pi}{2n}} \cos^2 n t dt = \frac{g v_m}{C^2 q} \int_{-\frac{\pi}{2n}}^{+\frac{\pi}{2n}} \cos^3 n t dt.$$

Voor de eerste integraal in deze vergelijking vindt men  $\frac{\pi}{2n}$  en voor de tweede  $\frac{4}{3n}$ , zoodat

$$k = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{g v_m}{C^2 q} \quad (127)$$

wordt (zie § 44).

Wat de moeilijkheid betreft die voortkomt uit het feit dat  $v_m$  niet bij den aanvang der berekening bekend is, en dat de grootte ervan van punt tot punt verandert, hiervoor moge worden verwezen naar wat daarvan in § 44 is gezegd.

Overigens is bij de berekeningen overal in plaats van  $k$  de door formule (115) bepaalde hoek  $\vartheta$  ingevoerd.

Er valt nog iets op te merken over de waarden van  $k$  die bij twee naast elkaar liggende geulen moeten worden gebruikt.

Als de op die geulen betrekking hebbende grootheden door de indices 1 en 2 van elkaar worden onderscheiden heeft men volgens (127)

$$k_1 : k_2 = \frac{v_{m1}}{C_1^2 q_1} : \frac{v_{m2}}{C_2^2 q_2}. \quad (128)$$

Aan den anderen kant kunnen wij uit (118) afleiden

$$s_1 : s_2 = \frac{b_1 q_1}{i n + k_1} : \frac{b_2 q_2}{i n + k_2},$$

of wel

$$\begin{aligned} v_1 : v_2 &= \frac{1}{i n + k_1} : \frac{1}{i n + k_2} = \frac{1}{1 - i \operatorname{tg} \vartheta_1} : \frac{1}{1 - i \operatorname{tg} \vartheta_2} = \\ &= \frac{\cos \vartheta_1}{e^{-i \vartheta_1}} : \frac{\cos \vartheta_2}{e^{-i \vartheta_2}} = \cos \vartheta_1 e^{i \vartheta_1} : \cos \vartheta_2 e^{i \vartheta_2}. \end{aligned}$$

Uit het in § 138 gezegde volgt verder dat de verhouding der amplituden  $v_{m1}$  en  $v_{m2}$  moet zijn

$$v_{m1} : v_{m2} = \cos \vartheta_1 : \cos \vartheta_2 \quad (129)$$

en men vindt dan uit (128)

$$\frac{\operatorname{tg} \vartheta_2}{\cos \vartheta_2} : \frac{\operatorname{tg} \vartheta_1}{\cos \vartheta_1} = C_1^2 q_1 : C_2^2 q_2, \quad (130)$$

door welke betrekking men zich bij het vaststellen der waarden van  $\vartheta_1$  en  $\vartheta_2$  kan laten leiden.

§ 145. *Oplossing van het getijvraagstuk voor een willekeurig geulennet.* Stel dat er  $p$  geulen zijn met een deel hunner eindpunten in een zeegat of aan de kust, en een zeker aantal vertakkingspunten. Voor elke geul kan men als onbekenden invoeren de waarden van  $s$  en  $h$  aan een der einden, daar de waarden aan het andere einde daarin kunnen worden uitgedrukt; zoodoende heeft men  $2p$  onbekenden. Komen nu in een vertakkingspunt  $q$  geulen te zamen, dan heeft men  $q-1$  voorwaarden die

uitdrukken dat in alle de hoogte even groot is; daarbij komt nog de voorwaarde dat de algebraïsche som van alle naar het vertakkingspunt gerichte stroomen nul moet zijn. Zoo leidt de beschouwing van een vertakkingspunt tot  $q$  voorwaarden, evenveel als het aantal der daar samenvallende einden van geulen bedraagt. Daar men verder voor elk eindpunt dat in een zeegat of aan de kust ligt één voorwaarde heeft (nl. in een zeegat de gegeven waarde van  $h$  en aan de kust  $s = 0$ ), zijn er in het geheel evenveel voorwaarden als einden van geulen, d. i.  $2p$ , overeenkomende met het aantal der onbekenden. De vergelijkingen zijn van den eersten graad en de oplossing is dus altijd mogelijk. Hoe men die wil inrichten, in welke van de onbekenden men eerst de andere wil uitdrukken, teneinde, het net doorlopende, tot de vergelijkingen te komen waardoor zij bepaald worden, heeft geen invloed op de uitkomsten.

Men kan in den loop der berekeningen telkens als men wil van de complexe uitdrukkingen tot de reële overgaan, en b.v. voor elke afzonderlijke geul nagaan hoe de amplituden en fasen van verticale beweging en stroom aan het eene uiteinde van de overeenkomstige grootheden aan het andere einde afhangen. Maar het verdient aanbeveling met de complexe grootheden door te rekenen en eerst op het laatst de reële deelen daarvan te nemen. Men vindt dan de amplitude en phase der verticale schommelingen aan de binneneinden van het geulennet, afgeleid uit die in de zeegaten.

Ten slotte moge nog worden opgemerkt, dat, aangezien voor elke geul twee in tegengestelde richting loopende golfstelsels zijn in rekening gebracht, de gevolgde methode neerkomt op de beschouwing van al de terugkaatsingen die de getijgolven ondervinden.

§ 146. *Superpositie van een constante opwaaing en een getijbeweging.* De bewegingsvergelijkingen (85) worden bijzonder eenvoudig wanneer men van de getijbeweging afziet en alleen een lang aanhoudende standvastige kracht  $F$ , door den wind uitgeoefend, in het oog vat. Dan ontstaat een stationaire toestand, waarbij  $\frac{dv_x}{dt}$  en  $\frac{dv_y}{dt}$  overal nul zijn. In den regel zal dan het water niet in rust zijn; het kan op deze of gene wijze circuleeren (verg. § 61, b). In bijzonder eenvoudige gevallen kan men echter daarvan afzien en zeggen dat er een toestand ontstaat, waarbij overal de stroom  $s$  nul is. Wel te verstaan, de stroom over de volle diepte gerekend; het verdwijnen daarvan sluit niet uit, dat er in de bovenste en de onderste lagen tegengestelde stroomen bestaan (§§ 55, b en 149).

De hoogte  $h_0$  van het water boven het in § 126 genoemde horizontale vlak  $V$  zal nu zoo zijn dat aan de vergelijkingen

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -g \rho \frac{\partial h_0}{\partial x} + F_x, \\ 0 &= -g \rho \frac{\partial h_0}{\partial y} + F_y \end{aligned} \right\} \quad (131)$$

voldaan wordt.

Men kan nu overgaan tot het geval dat, terwijl de wind de standvastige kracht  $F$  uitoefent, het water de schommelingen vertoont, die het gevolg zijn van de door de zeegaten binnendringende getijgolven. Voor dit geval zullen de vergelijkingen den vorm (85) met bepaalde waarden van de daarin voorkomende grootheden hebben. Trekt men nu van die betrekkingen de vergelijkingen (131) af, dan komt er

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -g \rho \frac{\partial h_1}{\partial x} - \frac{g \rho}{q'^3 C^2} |s| s_x, \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= -g \rho \frac{\partial h_1}{\partial y} - \frac{g \rho}{q'^3 C^2} |s| s_y, \end{aligned} \right\} \quad (132)$$

als men

$$h - h_0 = h_1$$

stelt.

Wat de continuïteitsvergelijking betreft, daarvan zijn bij den eersten toestand alle termen nul en zij luidt voor den tweeden toestand

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} = 0. \quad (133)$$

De formules (132) en (133) zijn nu juist die, welke bij gegeven hoogteveranderingen buiten de zeegaten de getijbeweging bepalen, zooals deze zou zijn als, bij afwezigheid van den wind, het water de in werkelijkheid bestaande diepte  $q'$  had. Die diepte zal juist door de getijbeweging schommelingen ondergaan, maar men kan bij de berekening van de bij het getij behorende stroomen  $s$  en verhangen  $\frac{\partial h_1}{\partial x}$  en  $\frac{\partial h_1}{\partial y}$  met voldoende benadering daarvan afzien en op elk punt voor  $q'$  de gemiddelde diepte nemen, die het water in werkelijkheid bij de waarnemingen aldaar vertoont. Trekt men nu de aldus berekende waarden van  $\frac{\partial h_1}{\partial x}$  en  $\frac{\partial h_1}{\partial y}$  van de werkelijk bestaande waarden  $\frac{\partial h}{\partial x}$  en  $\frac{\partial h}{\partial y}$  af, dan vindt men de waarden  $\frac{\partial h_0}{\partial x}$  en  $\frac{\partial h_0}{\partial y}$  die met de door den wind uitgeoefende krachten evenwicht zouden maken.

Wat van de waarden der differentiaalquotienten van  $h$  naar de coördinaten geldt, gaat ook op voor de hoogteverschillen van punt tot punt. Is  $\Delta h$  het tussehen twee plaatsen  $P$  en  $Q$  op zeker oogenblik waargenomen hoogteverschil en  $\Delta_1 h$  het hoogteverschil dat op dat oogenblik bij de getijden, op de bovengezede wijze berekend, zou bestaan, dan is

$$\Delta_0 h = \Delta h - \Delta_1 h$$

het hoogteverschil dat met de krachten  $F'$  evenwicht kan maken, d. i. de door die krachten teweeggebrachte „opwaaiing”.

§ 147. *Strengte oplossing van het stormvraagstuk bij lineaire weerstandswet voor een eenvoudige geul* 1). Een kanaal waarin het water overal tot dezelfde diepte  $q$  staat, en waarvoor de vergelijkingen (96) en (107) gelden, strekt zich in de richting der positieve  $X$ -as tot in het oneindige uit. Men vraagt  $h$  en  $s$  als functiën van  $x$  en  $t$  te bepalen als gegeven is dat aan de doorsnede  $x = 0$  een stroom  $s$  bestaat, die een bekende functie van den tijd is, en dat voor  $x = \infty$  de verhooging  $h = 0$  is.

a. Ter vereenvoudiging voere men vooreerst voor den tijd  $t$  en voor den afstand  $x$  andere eenheden in, die uit de bij de vergelijkingen (96) en (107) onderstelde door vermenigvuldiging resp. met  $\frac{2}{k}$  en  $\frac{2w}{k}$  ontstaan, waarbij  $w$  de door (98) bepaalde voortplantingsnelheid is. Deze keus heeft ten gevolge dat in de nieuwe eenheden die voortplantingsnelheid 1 wordt.

De vergelijkingen nemen nu den volgende vorm aan:

$$\frac{\partial s}{\partial x} = -b w \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (134)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -b w \frac{\partial h}{\partial x} - 2s. \quad (135)$$

De voorwaarde aan het begin van het kanaal zij

$$\text{voor } x = 0: s = F(t), \quad (136)$$

van welke functie wordt aangenomen dat zij vóór zeker oogenblik  $t_0$  (vóór het begin van den storm) steeds nul is geweest,

$$\text{voor } t < t_0: F(t) = 0. \quad (137)$$

In het vervolg is slechts van de waarden van  $h$  en  $s$  op latere oogenblikken sprake.

1) De methode van oplossen is ontleend aan RIEMANN-WEBER, Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik, 4e Aufl., (literatuuropgave n°. 56) Bd. II, § 121.

b. De oplossing kan worden voorgesteld met behulp van een functie, die door een voor alle waarden van het argument convergeerende reeks wordt bepaald, nl.

$$\varphi(z) = 1 + \frac{z^2}{2^2} + \frac{z^4}{2^2 \cdot 4^2} + \frac{z^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \frac{z^8}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8^2} + \dots \quad (138)$$

De afgeleide functie zal door  $\varphi'(z)$  worden voorgesteld <sup>1)</sup>.

c. De toestand die in het kanaal ontstaat kan tot op zekere hoogte worden opgevat als een voortplanting van evenwichtsverstoringen, die van  $x = 0$  uitgaan.

Daarbij is sprake van de bovengenoemde snelheid, die in de nu gebruikte eenheden de waarde 1 heeft, onder dien verstande dat een invloed die op zeker tijdstip van  $x = 0$  uitgaat, zich in een punt  $P$  op zekeren afstand gelegen, niet eerder doet gevoelen dan aan die snelheid van voortplanting beantwoordt, maar als hij eenmaal  $P$  bereikt heeft, daar, zij het dan ook met gestadig afnemende sterkte, blijft werken. Vat men een bepaalde plaats  $x$  (het punt  $P$ ) in het oog, dan zullen zich daar op den tijd  $t$  alleen waarden van  $s$  doen bemerken, die in  $x = 0$  bestonden vóór den tijd  $t - x$ , dus waarden die zijn voorgekomen op tijden  $t - x - \tau$ , waarbij  $\tau$  een positief tijdsverschil is. Maar deze waarden zullen ook alle een rol spelen en diensengevolge komen in de oplossing verschillende waarden  $F(t - x - \tau)$  van de gegeven functie voor. Zij strekken zich uit van  $\tau \equiv 0$  tot een waarde voor welke  $t - x - \tau = t_0$  wordt. Voor nog grootere waarden van  $\tau$  verdwijnt volgens (137)  $F(t - x - \tau)$ . Ten einde alle werkzame waarden van de functie te omvatten is in de volgende formules naar  $\tau$  geïntegreerd van 0 tot een zoo groote waarde  $T$ , dat, voor de beschouwde waarde van  $x$ , zeker  $t - x - T < t_0$  is.

d. De oplossing van het probleem is

$$s = e^{-x} \left[ F(t - x) + \int_0^T L F(t - x - \tau) d\tau \right], \quad (139)$$

$$h = \frac{1}{bw} \left[ e^{-x} F(t - x) + \int_0^T M F(t - x - \tau) d\tau \right]. \quad (140)$$

Hierin is

$$L = \frac{x}{\sqrt{(2x + \tau)\tau}} e^{-\tau} \varphi' \left\{ \sqrt{(2x + \tau)\tau} \right\},$$

$$M = e^{-x-\tau} \left[ \varphi \left\{ \sqrt{(2x + \tau)\tau} \right\} + \frac{x + \tau}{\sqrt{(2x + \tau)\tau}} \varphi' \left\{ \sqrt{(2x + \tau)\tau} \right\} \right].$$

Men kan door substitutie in (134) en (135) aantoonen dat aan deze vergelijkingen voldaan wordt en door na te gaan wat er voor  $x = 0$  van  $s$  en voor  $x = \infty$  van  $h$  wordt, kan men bewijzen dat ook de conditie (136) en de voorwaarde voor  $x = \infty$  vervuld zijn <sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> De functie  $\varphi$  voldoet, zooals door substitutie van de reeks blijkt aan de differentiaalvergelijking

$$\frac{d^2 \varphi}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{d\varphi}{dz} - \varphi = 0. \quad (141)$$

De limiet van  $\frac{1}{z} \varphi'(z)$  voor  $z = 0$  is  $\frac{1}{2}$ .

Voor zeer groote waarden van  $z$  kan men bij benadering stellen

$$\varphi(z) = \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}}, \quad \varphi'(z) = \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}}. \quad (142)$$

De functie  $\varphi(z)$  is niet anders dan  $J_0(iz)$ , de zogenaamde BESSEL'sche functie voor het imaginaire argument  $iz$ . Een tabel van waarden daarvan, die bij het nu behandelde vraagstuk zou kunnen dienen, vindt men op p. 130 van de Funktionentafeln van JAHNKE u. EMDE, literatuuropgave n°. 61.

<sup>2)</sup> Het zou te ver gaan, de substituties geheel uit te voeren. Daarom moge met eenige aanwijzingen worden volstaan.

Differentieert men de uitdrukkingen (139) en (140) naar  $s$  of  $t$ , dan moet o.a. ook de functie  $F(t - x - \tau)$  onder het integraalteeken gedifferentieerd worden.

Deze functie heeft de eigenschap dat haar differentiaalquotient naar  $x$  gelijk is aan dat naar  $\tau$ , en dat het differentiaalquotient naar  $t$  dezelfde waarde met het tegengestelde

§ 148. *Overgang tot een rechthoekig bekken van eindige lengte.* Men komt tot het geval dat in § 82 werd besproken als men zich voorstelt dat het in de vorige § beschouwde kanaal zich niet tot in het oneindige, maar slechts tot  $x = l$  uitstrekt en daar met de open zee in gemeenschap staat. De rechthoek dien men dan overhoudt, kan als een ruwe voorstelling van de Waddenzee dienen; de zijde  $x = 0$  is de afsluitingslijn. Het onderscheid met het zoeven behandelde geval is nu, dat men alleen met waarden van  $x$  tusschen 0 en  $l$  te doen heeft, en dat reeds voor  $x = l$  de verhooging  $h$  nul wordt.

De oplossing kan worden opgebouwd uit een aantal deelen die min of meer overeenkomen met de in § 147 aangegeven uitdrukkingen en waarvan de fysieke interpretatie deze is, dat de in die § beschouwde bewegings-toestand herhaaldelijk aan de zijden  $x = l$  en  $x = 0$  van den rechthoek wordt teruggekaatst.

a. De door (139) en (140) bepaalde  $s$  en  $h$  zijn voor alle positieve waarden van  $x$  en voor alle waarden van  $t$  geheel bekende functiën van  $x$  en  $t$ , stel

$$s = \psi(x, t), \quad h = \chi(x, t).$$

Zij voldoen aan (134) en (135). Eveneens voldoen aan die vergelijkingen

$$s = \psi(a + x, t), \quad h = \chi(a + x, t),$$

als  $a$  een of andere positieve constante is. Ook deze functiën zijn voor alle positieve waarden van  $x$  bekend.

b. Substitueert men in (134) en (135)  $x = -x'$ ,  $h = -h'$ , dan komt er

$$\frac{\partial s}{\partial x'} = -b w \frac{\partial h'}{\partial t},$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -b w \frac{\partial h'}{\partial x'} - 2s.$$

teeken heeft. Men kan daarom de differentiatie naar  $t$  of  $x$  door die naar  $\tau$  vervangen, eventueel met omkeering van het teeken, en komt dan tot integralen die  $L \frac{dF}{d\tau}$  of  $M \frac{dF}{d\tau}$  bevatten. Deze kunnen door partieele integratie worden herleid, waardoor geïntegreerde termen en zekere nieuwe integralen ontstaan. In de geïntegreerde termen moet men  $\tau = T$  en  $\tau = 0$  stellen. Het eerste geeft nul omdat  $F(t - x - T) = 0$  is, en  $\tau = 0$  leidt tot uitdrukkingen die  $F(t - x)$  bevatten, vermenigvuldigd met de waarden die  $L$  en  $M$  voor  $\tau = 0$  aannemen. Zoover gekomen zal men bemerken dat zoowel in (134) als in (135) alle termen wegvallen die geen integraal bevatten.

De nieuwe integralen die bij het partieele integreren ontstaan, evenals de andere integralen die nog voorkomen, bevatten  $F(t - x - \tau)$ . Men kan nu al de integralen tot één vereenigen en zal vinden dat de coëfficiënt waarmede in deze, onder het integraalteeken,  $F(t - x - \tau)$  vermenigvuldigd is verdwijnt. Wat verg. (134) betreft, moet men om dit in te zien van de differentiaalvergelijking (141) gebruik maken, waaraan de functie  $\varphi$  voldoet.

Het verdient aanbeveling bij de hier aangeduide berekeningen hier en daar  $z$  te schrijven in plaats van  $\sqrt{(2x + \tau)\tau}$ .

Dat, voor  $x = 0$ ,  $s = F(t)$  wordt, volgt onmiddellijk uit (139). Men moet daarbij bedenken dat zelfs voor  $z = 0$  de grootheid  $\frac{1}{z} \varphi'(z)$  eindig blijft.

Er blijft nu nog over te zien wat er voor een zeer groote waarde van  $x$  van de uitdrukking (140) voor  $h$  wordt. De eerste term  $e^{-x} F(t - x)$  nadert tot nul. In den tweeden komt het op de waarde van  $M$  aan. Stelt men weer  $\sqrt{(2x + \tau)\tau} = z$ , en  $x + \tau = u$ , dan is

$$M = e^{-u} \left[ \varphi(z) + u \frac{\varphi'(z)}{z} \right].$$

Zoowel  $z$  als  $u$  zijn positief, en  $z < u$ . Daar nu niet alleen  $\varphi(z)$  maar, zooals men uit (138) kan afleiden, ook  $\frac{\varphi'(z)}{z}$  door een reeks met louter positieve termen wordt voorgesteld, is

$$\text{dus} \quad \varphi(z) < \varphi(u), \quad \frac{\varphi'(z)}{z} < \frac{\varphi'(u)}{u},$$

$$M < e^{-u} [\varphi(u) + \varphi'(u)].$$

Wordt nu  $u$  zeer groot, dan kan men  $\varphi(u)$  en  $\varphi'(u)$  door uitdrukkingen die aan (142) beantwoorden vervangen; na vermenigvuldiging met  $e^{-u}$  blijft  $\sqrt{u}$  in den noemer staan. Dus nadert  $M$ , en daarmee  $h$ , tot nul.

Daar deze vergelijkingen denzelfden vorm hebben als (134) en (135) wordt er aan voldaan door

$$s = \psi(a + x', t), \quad h' = \chi(a + x', t)$$

en men vindt dus,  $x'$  en  $h'$  door  $-x$  en  $-h$  vervangende, een nieuwe oplossing van (134) en (135), nl.

$$s = \psi(a - x, t), \quad h = -\chi(a - x, t).$$

De hier voorkomende waarden zijn bekend voor alle positieve waarden van  $a - x$ .

c. De oplossing van het vraagstuk is nu als volgt:

$$s = \psi(x, t) + \psi(2l - x, t) - \psi(2l + x, t) - \psi(4l - x, t) + \psi(4l + x, t) + \dots$$

$$h = \chi(x, t) - \chi(2l - x, t) - \chi(2l + x, t) + \chi(4l - x, t) + \chi(4l + x, t) - \dots,$$

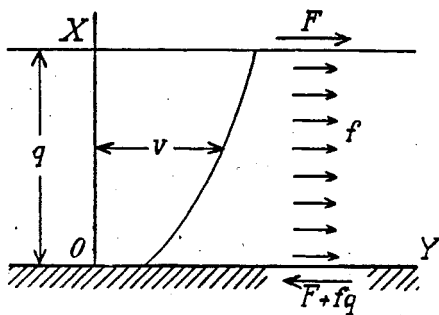
in welke uitdrukkingen men de zoeven genoemde herhaalde terugkaatsingen zal herkennen.

Voor  $x = 0$  heffen in de reeks voor  $s$  na den eersten term de termen elkaar twee aan twee op, zoodat er overblijft  $s = \psi(0, t)$ , wat volgens de vorige § de voorgeschreven waarde  $F(t)$  heeft. Aan den anderen kant vallen, als men  $x = l$  stelt, in de reeks voor  $h$  alle termen twee aan twee tegen elkaar weg, waardoor  $h = 0$  wordt.

De teruggekaatste bewegingen worden door de weerstanden hoe langer hoe zwakker, zoodat de reeksen convergeeren. Kiest men de afmetingen eenigermate in overeenstemming met die van de Waddenzee, en kent men aan den coëfficiënt  $k$  een waarde toe, die eenigszins aan de werkelijke weerstanden beantwoordt, dan blijkt die uitputting zoo snel te gaan, dat niet meer dan een paar terugkaatsingen in aanmerking behoeven te worden genomen.

Zoals reeds in § 82 gezegd werd, hebben berekeningen naar de nu besproken methode in het onderzoek slechts een voorbijgaande rol gespeeld. Hier is er alleen in eenige bijzonderheden van gesproken om te doen uitkomen hoe ingewikkeld, zelfs bij uiterste vereenvoudiging, een strenge oplossing van het vraagstuk wordt.

§ 149. *Stroomen in een kanaal in de onderstelling dat tusschen twee waterlagen een wrijving bestaat, evenredig met de tweede macht van het snelheidsverval.* Laat (figuur 55) de  $Y$ -as in de richting van het kanaal zijn en de  $X$ -as



Figuur 55.

verticaal naar boven. Aan den bodem  $x = 0$ , aan den waterspiegel  $x = q$ . Op dezen laatsten werkt een kracht die per eenheid van oppervlak  $F$  bedraagt en bovendien werkt eveneens in de richting der lengte op het binnenste een kracht, die per volume-eenheid  $f$  is. De laatste kracht is in de gevallen waarop deze beschouwingen toepassing vinden die welke uit een verhang voortvloeit.

De krachten worden, evenals de snelheid  $v$ , positief gerekend als zij de richting der positieve  $Y$ -as hebben. Van de oppervlaktekracht  $F$  wordt dit steeds ondersteld.

$Y_x$  zij de tangentieele kracht die aan een of ander horizontaal vlak per vlakke-eenheid in de richting der  $Y$ -as door hetgeen boven het vlak ligt wordt uitgeoefend op hetgeen daar beneden ligt. Die kracht kan worden voorgesteld (§ 35) door

$$Y_x = \mu \left| \frac{dv}{dx} \right| \frac{dv}{dx}. \tag{143}$$

Aan den bodem is  $Y_x$  de tangentieele kracht, door het water op den bodem uitgeoefend. Dus

$$\text{voor } x = 0: Y_x = \nu |v|v, \tag{144}$$

terwijl aan het oppervlak

$$\text{voor } x = q: Y_x = F \quad (145)$$

moet zijn.

De voorwaarde voor een stationaire toestand is dat de krachten op een laag van de dikte  $dx$  werkende elkaar opheffen. Dit geeft

$$\frac{dY_x}{dx} + f = 0$$

en dus, met het oog op (145),

$$Y_x = F + f(q - x). \quad (146)$$

Twee gevallen moeten, wat de kracht  $f$  betreft, worden onderscheiden.

a. Zij

$$-\frac{F}{q} \leq f < \infty.$$

Dan is, voor alle te pas komende waarden van  $x$ ,  $Y_x$  positief. Dus volgens (143) ook  $\frac{dv}{dx}$  positief,

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dx} &= \frac{1}{\sqrt{\mu}} \{F + f(q - x)\}^{1/2}, \\ v &= -\frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \{F + f(q - x)\}^{3/2} + c. \end{aligned} \quad (147)$$

Ter bepaling van de integratieconstante  $c$  dient de voorwaarde aan den bodem. Hier is

$$Y_x = F + fq \geq 0$$

en dus volgens (144) ook  $v \geq 0$ ,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\nu}} \{F + fq\}^{1/2}$$

en dit moet met (147) voor  $x = 0$  overeenstemmen. Dus

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\sqrt{\nu}} \{F + fq\}^{1/2} + \frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \{F + fq\}^{3/2} - \\ &\quad - \frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \{F + f(q - x)\}^{3/2}. \end{aligned} \quad (148)$$

Men vindt de gemiddelde snelheid  $\bar{v}$  door dit met  $dx$  te vermenigvuldigen, naar  $x$  te integreeren van 0 tot  $q$  en dan door  $q$  te deelen. De uitkomst is

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{1}{\sqrt{\nu}} \{F + fq\}^{1/2} + \frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \{F + fq\}^{3/2} - \\ &\quad - \frac{4}{15f^2q\sqrt{\mu}} \{F + fq\}^{5/2} + \frac{4}{15f^2q\sqrt{\mu}} F^{5/2}. \end{aligned} \quad (149)$$

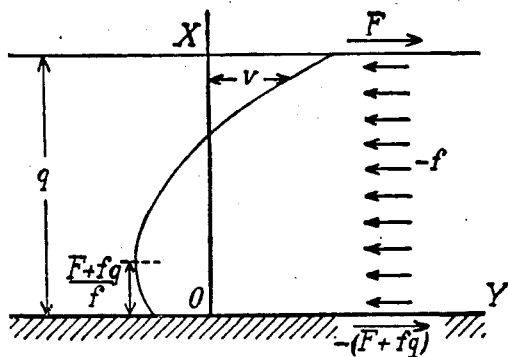
b. Zij

$$-\infty < f \leq -\frac{F}{q}.$$

Dan is (verg. figuur 56) volgens (146)  $Y_x$  nul voor

$$x = \frac{F + fq}{f}, \quad (150)$$

positief voor grootere, en negatief voor kleinere waarden van  $x$ . Als  $f$  van



Figuur 56.

$-\frac{F}{q}$  tot  $-\infty$  gaat, schuift het horizontale vlak  $V$ , waar  $Y_x = 0$  is, van den bodem naar den waterspiegel. Het nadert ook tot dezen laatsten als men, bij constante negatieve  $f$ , de oppervlaktekracht  $F$  laat afnemen.

Boven het vlak  $V$  geldt weer (147), maar daar beneden wordt blijkens (143) met  $Y_x$  ook  $\frac{dv}{dx}$  negatief,

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\sqrt{\mu}} \left\{ -F + f(x-q) \right\}^{1/2},$$

$$v = -\frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \left\{ -F + f(x-q) \right\}^{3/2} + c. \quad (151)$$

Hier is dezelfde integratieconstante geschreven als in (147) omdat aan het vlak  $V$ , waar  $Y_x = 0$  is, de snelheid geen sprong kan maken.

De constante wordt weer bepaald door de voorwaarde aan den bodem. Hier is nu  $Y_x = F + fq$  negatief, dus volgens (144) ook  $v$  negatief,

$$v = -\frac{1}{\sqrt{v}} \left\{ -F - fq \right\}^{1/2},$$

derhalve

$$c = -\frac{1}{\sqrt{v}} \left\{ -F - fq \right\}^{1/2} + \frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \left\{ -F - fq \right\}^{3/2}.$$

Om vervolgens de gemiddelde snelheid te vinden moet men, na vermenigvuldiging met  $dx$ , (151) integreeren van  $x = 0$  tot de waarde (150) en (147) van die waarde tot  $q$ , en ten slotte de som der uitkomsten door  $q$  deelen. Natuurlijk gaat de in (147) en (151) voorkomende constante  $c$  onveranderd in de einduitkomst over en men vindt

$$\bar{v} = -\frac{1}{\sqrt{v}} \left\{ -F - fq \right\}^{1/2} + \frac{2}{3f\sqrt{\mu}} \left\{ -F - fq \right\}^{3/2} + \frac{4}{15f^2q\sqrt{\mu}} \left\{ -F - fq \right\}^{5/2} + \frac{4}{15f^2q\sqrt{\mu}} F^{5/2}.$$

§ 150. *Betrekking tusschen een oppervlaktekracht en een ruimtekracht die dezelfde uitwerking heeft.* Uit (148) en (149) kan men, door  $F = 0$  en  $f = g \rho i$  te stellen, de formules voor een verhangstroom afleiden, die in § 55,  $a$  voorkomen en door de invoering van den coëfficiënt  $\alpha$  (formule 16) vereenvoudigd zijn. Maakt men van dezen in het algemeen gebruik, en stelt men bovendien

$$\frac{F}{qf} = \gamma, \quad (152)$$

dan kunnen de formules die in de vorige § voor de gemiddelde snelheid werden gevonden, geschreven worden in den vorm

$$\bar{v} = \beta \sqrt{\frac{F}{v}}, \quad (153)$$

waarin de, naar gelang van omstandigheden positieve of negatieve, waarde van  $\beta$  bepaald wordt door:

$$\beta = \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^{1/2} + \frac{2}{3} \alpha \gamma \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^{3/2} - \frac{4}{15} \alpha \gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^{5/2} + \frac{4}{15} \alpha \gamma^2$$

voor

$$-1 \leq \frac{1}{\gamma} < \infty,$$

en

$$\beta = -\left(-1 - \frac{1}{\gamma}\right)^{1/2} + \frac{2}{3} \alpha \gamma \left(-1 - \frac{1}{\gamma}\right)^{3/2} + \frac{4}{15} \alpha \gamma^2 \left(-1 - \frac{1}{\gamma}\right)^{5/2} + \frac{4}{15} \alpha \gamma^2$$

voor

$$-\infty > \frac{1}{\gamma} \geq -1.$$

Dezelfde gemiddelde snelheid zou men ook kunnen teweegbrengen door naast de ruimtekraft  $f$ , in plaats van de oppervlaktekraft  $F$ , een kraft te laten werken die gelijkmatig over de geheele diepte verdeeld is. Bedraagt die kraft  $F'$  per eenheid van horizontaal vlak, dan zou in het geheel per volume-eenheid de kraft  $\frac{F'}{q} + f$  werken en men kan de daardoor veroorzaakte gemiddelde snelheid  $\bar{v}$  berekenen, b.v. door in (17)  $g_{ei}$  (blz. 120) door  $\frac{F'}{q} + f$  te vervangen. Men kan de uitkomst schrijven in den vorm

$$F' + qf = \frac{\nu}{\left(1 + \frac{2}{5} \alpha\right)^2} |\bar{v}| \bar{v},$$

waarin ook uitkomt dat  $F' + qf$  en  $\bar{v}$  hetzelfde teeken hebben. Substitueert men hierin de waarde (153) voor  $\bar{v}$ , dan krijgt men een formule voor de bepaling van de kraft  $F'$  die, wat  $\bar{v}$  en dus wat den stroom door een doorsnede betreft, met de oppervlaktekraft gelijkstaat. Voert men ook nog de uit (152) volgende waarde van  $qf$  in, en stelt men

$$F' = \omega F, \tag{154}$$

dan wordt

$$\omega = \frac{|\beta| \beta}{\left(1 + \frac{2}{5} \alpha\right)^2} - \frac{1}{\gamma}.$$

Met deze formule zijn de waarden van  $\omega$  berekend, die men in achterstaande tabel 46 vindt. Daaraan moge nog het volgende worden toegevoegd.

Voor een zekere waarde van  $\frac{1}{\gamma}$  beneden  $-1$  wordt  $\beta$  nul, en dan wordt  $\omega = -\frac{1}{\gamma}$ , dus  $> 1$ . Dit is het geval van de stationaire opwaaiing, en  $-\frac{1}{\gamma}$  is de coëfficiënt die in § 55, *b* is opgegeven.

Voor  $\gamma = -1$ , het geval waarin de krachten  $F$  en  $f q$  die per lengte-eenheid op het oppervlak en het binnenste der vloeistof werken, gelijk en tegengesteld zijn, geven de formules die boven voor  $\beta$  werden gegeven beide  $\beta = \frac{4}{15} \alpha$ ; daarmede wordt

$$\omega = \left(\frac{\frac{4}{15} \alpha}{1 + \frac{2}{5} \alpha}\right)^2 + 1.$$

Voor zeer groote, hetzij positieve of negatieve, waarden van  $\gamma$  (verg. § 55, *d*) nadert  $\beta$  volgens beide formules tot  $1 + \frac{1}{2} \alpha$ , zooals men vindt door naar de opklimmende machten van de kleine grootheid  $\frac{1}{\gamma}$  te ontwikkelen en deze ten slotte tot nul te laten naderen. Dientengevolge wordt voor  $\gamma = \pm \infty$

$$\omega = \left(\frac{1 + \frac{1}{2} \alpha}{1 + \frac{2}{5} \alpha}\right)^2.$$

In plaats van de verhouding (152) kan men ook de overeenkomstige

$$\gamma' = \frac{F'}{qf}$$

invoeren. Daar blijkens (154)

$$\gamma' = \omega \gamma$$

is, kan men voor elke waarde van  $\gamma$ , na  $\omega$  bepaald te hebben, ook  $\gamma'$  be-

rekenen. Zoo zijn de getallen gevonden, die in tabel 46 staan; daardoor is nu ook  $\omega$  als functie van  $\gamma'$  bepaald.

TABEL 46.

| $\gamma$  | $\alpha = 0,35$ |           | $\alpha = 0,80$ |           | $\gamma$ | $\alpha = 0,35$ |           | $\alpha = 0,80$ |           |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
|           | $\omega$        | $\gamma'$ | $\omega$        | $\gamma'$ |          | $\omega$        | $\gamma'$ | $\omega$        | $\gamma'$ |
| $-\infty$ | 1,06            | $-\infty$ | 1,12            | $-\infty$ | -0,2     | 1,11            | -0,22     | 1,21            | -0,24     |
| -5        | 1,06            | -5,28     | 1,12            | -5,58     | -0,1     | 1,09            | -0,11     | 1,19            | -0,12     |
| -2        | 1,05            | -2,10     | 1,11            | -2,22     | 0        | 1,08            | 0         | 1,16            | 0         |
| -1,2      | 1,04            | -1,25     | 1,09            | -1,31     | 0,4      | 1,07            | 0,43      | 1,14            | 0,46      |
| -1        | 1,01            | -1,01     | 1,03            | -1,03     | 0,8      | 1,06            | 0,85      | 1,14            | 0,91      |
| -0,98     | 1,02            | -1,00     | 1,02            | -1,00     | 1,2      | 1,07            | 1,28      | 1,13            | 1,36      |
| -0,95     | 1,03            | -0,98     | 1,05            | -1,00     | 2,8      | 1,07            | 2,99      | 1,13            | 3,16      |
| -0,9      | 1,06            | -0,95     | 1,09            | -0,98     | 9,7      | 1,06            | 10,3      | 1,12            | 10,9      |
| -0,8      | 1,09            | -0,87     | 1,15            | -0,92     | 14,8     | 1,06            | 15,7      | 1,12            | 16,6      |
| -0,5      | 1,10            | -0,55     | 1,23            | -0,61     | $\infty$ | 1,06            | $\infty$  | 1,12            | $\infty$  |

§ 151. *Bijkomstige toestanden, bij afgesloten Zuiderzee, in het geulennet dat in §§ 89—91 werd behandeld.* Ten einde de correcties aan te brengen, die in § 109 zijn besproken, is het noodig voor het net dat in figuur 37 is voorgesteld, op dergelijke wijze als in § 130 voor het tweedimensionale geval gedaan werd, de vergelijkingen op te stellen, waardoor kleine veranderingen in den stroomtoestand bepaald worden. Daarbij wordt aangenomen dat deze stationair blijft.

In het in § 91 beschouwde geval (afgesloten Zuiderzee) bestond in elke elementaire geul  $PQ$  een bepaalde constante stroom  $s'$  en hadden de waterhoogten aan de uiteinden bepaalde waarden  $h'_P$  en  $h'_Q$ . Wordt de richting  $l$  van  $P$  naar  $Q$  voor de positieve genomen, dan bestaat tusschen deze grootheden en de windkracht de betrekking (verg. formule 49, blz. 163)

$$h'_Q - h'_P + \frac{l}{b^2 q^3 C^2} |s'| s' = \frac{l}{g \rho q} F_l. \tag{155}$$

Indien nu, om welke reden dan ook, de toestand verandert, zal, als men het eerste lid der vergelijking met de nieuwe waterhoogten en stroomsterkte berekent, dat lid niet meer deze waarde, maar een andere aannemen. Stel dat het verschil  $\varphi$  is, dat dus, als men voor de nieuwe waarden  $\bar{h}'$  en  $\bar{s}'$  schrijft,

$$\bar{h}'_Q - \bar{h}'_P + \frac{l}{b^2 q^3 C^2} |\bar{s}'| \bar{s}' = \frac{l}{g \rho q} F_l + \varphi \tag{156}$$

is. Om de vergelijking voor den bijkomstigen toestand te krijgen moet men (155) van (156) aftrekken, m.a.w. de variatie der twee leden van (155) aan elkaar gelijkstellen. Voor de variaties van  $h'$  en  $s'$  wordt  $\delta h'$ ,  $\delta s'$  geschreven; zij worden evenals vroeger als zeer klein beschouwd.

In verband daarmee wordt aangenomen dat de gevarieerde stroom dezelfde richting als de oorspronkelijke heeft, waaruit volgt dat de variatie van  $|s'| s'$  door  $2 |s'| \delta s'$  wordt gegeven. De gezochte vergelijking wordt dus, als men

$$\frac{2l}{b^2 q^3 C^2} |s'| = k \tag{157}$$

stelt

$$\delta h'_Q - \delta h'_P + k \delta s' = \varphi.$$

Ter bekorting zal nu in plaats van  $\delta h'$  en  $\delta s'$  worden geschreven  $h$  en  $s$  (bijkomstige verhooging en bijkomstige stroom). Daardoor wordt de vergelijking

$$h_Q - h_P + k s = \varphi. \tag{158}$$

Men kan  $\varphi$  als de maat voor de „beweegkracht” beschouwen, waardoor de bijkomstige stroom ontstaat.

Wat den door (157) bepaalden weerstandscoefficiënt  $k$  betreft, deze volgt onmiddellijk uit de waarde van  $h'_s$  die in tabel 21 (§ 91) is opgegeven. Men heeft nl., overeenkomstig formule (51)

$$\frac{l}{b^2 q^3 C^2} |s'| s' = h'_s,$$

zoodat (verg. § 131)

$$k = 2 \frac{h'_s}{s'} \quad (159)$$

wordt, waarbij ook  $s'$  aan genoemde tabel kan worden ontleend. Wel te verstaan is  $k$  positief;  $h'_s$  en  $s'$  hebben dan ook steeds hetzelfde teeken.

Terwijl op deze wijze de coëfficiënten  $k$  door den oorspronkelijken in § 91 onderzochten toestand geheel bepaald zijn, kunnen de grootheden  $\varphi$ , naar gelang van den bijzonderen bijkomstigen toestand dien men wil beschouwen, verschillende waarden aannemen. Zoodra deze bekend zijn, kan men, na voor elke elementaire geul een vergelijking als (158) te hebben opgesteld, alle waarden van  $s$  en  $h$  berekenen, als men nog de bekende voorwaarden aan een vertakkingspunt in aanmerking neemt, alsmede de voorwaarde dat in elk zeegat  $h = 0$  is.

§ 152. *Geulen naast elkander.* Stel dat tusschen  $P$  en  $Q$  twee of meer elementaire geulen 1, 2, ... loopen. Dan gelden blijkens (158) de vergelijkingen

$$s_1 = \frac{\varphi_1}{k_1} + \frac{h_P - h_Q}{k_1}, \quad s_2 = \frac{\varphi_2}{k_2} + \frac{h_P - h_Q}{k_2}, \dots$$

en men heeft, als men

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots = \frac{1}{k}$$

en

$$\frac{\frac{\varphi_1}{k_1} + \frac{\varphi_2}{k_2} + \dots}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots} = \psi_{PQ} \quad (160)$$

stelt, voor den totalen stroom

$$s_{PQ} = \frac{\psi_{PQ}}{k} + \frac{h_P - h_Q}{k},$$

dus

$$h_Q - h_P + k s_{PQ} = \psi_{PQ}, \quad (161)$$

een betrekking die denzelfden vorm heeft als die welke voor de afzonderlijke geulen geldt.

Men kan  $\frac{1}{k_1}, \frac{1}{k_2}, \dots$  de „doorlatingsvermogens” van deze laatste noemen, de som  $\frac{1}{k}$  van deze grootheden het doorlatingsvermogen van de samengestelde geul,  $k$  den weerstand daarvan, en  $\psi_{PQ}$  de beweegkracht die er in werkt. De volgorde der letters wijst aan dat hier sprake is van een kracht die, als zij positief is, het water van  $P$  naar  $Q$  drijft. Het is duidelijk dat

$$\psi_{QP} = -\psi_{PQ}$$

is en dat men in plaats van (161) ook kan schrijven

$$h_P - h_Q + k s_{QP} = \psi_{QP}. \quad (162)$$

Men kan zich van deze vergelijking of van (161) bedienen, naar gelang van de richting waarin men in gedachten de geul doorloopt.

§ 153. *Stelling voor een kring en oplossing van het vraagstuk.* Men kan nu verder een methode volgen, die overeenkomt met de in §§ 87 en 88 toegepaste. Gaat men langs een der wegen die in figuur 37 door de cijfers

1-5 zijn aangewezen <sup>1)</sup>, van zeegat tot zeegat of, bij kring 3, tot men in het uitgangspunt terugkeert, en stelt men voor elke zijde van den kring een vergelijking als (161) of (162) op; dan vallen bij optelling van al die vergelijkingen de hoogten  $h$  weg, zoodat er voor elken kring een vergelijking ontstaat van den vorm

$$\Sigma k s = \Sigma \psi; \quad (163)$$

voor  $edfg$  b.v.

$$k_{ed} s_{ed} + k_{df} s_{df} + k_{fg} s_{fg} = \psi_{ed} + \psi_{df} + \psi_{fg}.$$

Er zijn vijf dergelijke vergelijkingen, terwijl er negen stroomen zijn. Daar echter aan elk der vier vertakkingspunten een betrekking tusschen de daarheen en daarvan af gerichte stroomen bestaat, heeft men evenveel vergelijkingen als onbekenden.

De oplossing gaat het gemakkelijkst als men zich van den volgenden kunstgreep bedient. Men kan elke stroomverdeeling die in het net bestaan kan opvatten als samengesteld uit vijf stroomen  $x, y, z, u, v$ , resp. in de kringen ①, ②, ③, ④, ⑤ rondlopende, waarbij in een zijde die twee kringen gemeen hebben, twee stroomen gesuperponeerd worden. Neemt men voor de positieve richtingen van rondgang die welke door de pijltjes in de figuur zijn aangewezen, dan is b. v.

$$s_{de} = x - y, \quad s_{fh} = u - z, \text{ enz.}$$

Aan de continuïteitsvoorwaarden aan de vertakkingspunten is nu voldaan, welke ook de waarden van  $x, y, z, u, v$  zijn, en voor de bepaling dezer stroomen dienen de vijf vergelijkingen (163), nadat daarin alle stroomen in  $x, y, z, u, v$  zijn uitgedrukt.

Zijn eenmaal de stroomen in het net gevonden, dan vindt men de waarde van  $h$  in een of ander van de in figuur 37 door letters aangewezen punten door van een zeegat langs een of meer geulen naar dat punt te gaan; men heeft nl. tengevolge van (162)

$$h = \Sigma \psi - \Sigma k s,$$

als in het tweede lid elke  $\psi$  en elke  $s$  genomen wordt met het teeken dat past bij het gaan van het zeegat naar het beschouwde punt.

Bij de uitvoering der berekeningen werden vooreerst voor de elementaire geulen, met behulp van de in tabel 21 voorkomende waarden van  $h'_s$  en  $s'$  de volgende waarden voor het doorlatingsvermogen gevonden.

TABEL 47.

|               |              |                 |              |              |             |             |              |              |             |             |              |
|---------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| Geul          | $\alpha p_9$ | $\alpha p_{20}$ | $p q_{27,4}$ | $p q_{15,4}$ | $p q_{8,4}$ | $q b_{4,9}$ | $q b_{20,9}$ | $q b_{10,9}$ | $b c_{7,1}$ | $d c_{6,9}$ | $d c_{16,9}$ |
| $\frac{1}{k}$ | 2,67         | 1,76            | 2,56         | 1,25         | 0,82        | 4,89        | 0,58         | 0,17         | 1,20        | 0,91        | 6,75         |
| Geul          | $d c_{4,9}$  | $er_{10}$       | $er_6$       | $er_1$       | $r d_{3,9}$ | $r d_{8,4}$ | $f d_{18,3}$ | $f d_{4,3}$  | $f d_{9,3}$ | $g f_9$     | $g f_{18}$   |
| $\frac{1}{k}$ | 0,49         | 1,09            | 0,53         | 0,01         | 1,23        | 0,34        | 0,96         | 0,26         | 0,28        | 3,45        | 1,70         |
| Geul          | $f h_{18}$   | $f h_9$         | $f h_4$      | $h d_{6,6}$  | $h d_{3,6}$ | $i h_6$     | $ki_{21}$    | $ki_6$       | $li_{5,5}$  | $ml_6$      | $ml_{12}$    |
| $\frac{1}{k}$ | 0,63         | 1,48            | 0,21         | 0,59         | 0,37        | 4,79        | 5,85         | 0,19         | 1,90        | 0,94        | 0,49         |

Hieruit werden de weerstanden  $k$  der samengestelde geulen  $\alpha p$ , enz. afgeleid:

TABEL 48.

|      |            |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |       |      |      |      |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Geul | $\alpha p$ | $p q$ | $q b$ | $b c$ | $d c$ | $er$ | $r d$ | $f d$ | $g f$ | $f h$ | $h d$ | $i h$ | $ki$ | $li$ | $ml$ |
| $k$  | 0,22       | 0,22  | 0,18  | 0,83  | 0,12  | 0,61 | 0,64  | 0,67  | 0,19  | 0,43  | 1,04  | 0,21  | 0,17 | 0,53 | 0,70 |

<sup>1)</sup> Daar bij de nu volgende berekeningen het geval van afgesloten Zuiderzee beschouwd werd, vielen  $bv$  en  $cv$  weg. Bovendien werd van den weg van  $l$  naar de Lauwerszee afgezien.

Zooals reeds gezegd werd, geeft formule (163), op de vijf kringen toegepast, evenveel vergelijkingen ter bepaling van  $x, y, z, u, v$ . Men heeft b.v. voor den eersten kring, daar in  $a b c d$  de stroom  $x$  en in  $d e$  de stroom  $x-y$  bestaat,

$$k_{abcd} x + k_{de} (x - y) = \psi_{abcde},$$

voor den tweeden kring

$$k_{ed} (y - x) + k_{df} (y - z) + k_{fg} (y - u) = \psi_{edfg}, \text{ enz.}$$

Daar alle weerstanden en dus alle coëfficiënten der onbekenden bekend zijn, kan men  $x, y, z, u, v$  oplossen. Men vindt dan:

$$x = 0,52 \psi_{abcde} + 0,36 \psi_{edfg} + 0,14 \psi_{fahf} + 0,13 \psi_{ghik} + 0,02 \psi_{kilm}$$

$$y = 0,36 \psi_{abcde} + 0,82 \psi_{edfg} + 0,32 \psi_{fahf} + 0,30 \psi_{ghik} + 0,04 \psi_{kilm}$$

$$z = 0,14 \psi_{abcde} + 0,32 \psi_{edfg} + 0,64 \psi_{fahf} + 0,34 \psi_{ghik} + 0,04 \psi_{kilm}$$

$$u = 0,13 \psi_{abcde} + 0,30 \psi_{edfg} + 0,34 \psi_{fahf} + 1,23 \psi_{ghik} + 0,15 \psi_{kilm}$$

$$v = 0,02 \psi_{abcde} + 0,04 \psi_{edfg} + 0,04 \psi_{fahf} + 0,15 \psi_{ghik} + 0,74 \psi_{kilm}.$$

Zijn voor een of ander bijzonder geval de beweegkrachten  $\varphi$  bekend, dan volgen de grootheden  $\psi$  uit (160). Nadat daaruit de stroomen zijn afgeleid, kan men de bijkomstige verhoogingen op de reeds vermelde wijze.

§ 154. *Onderzoek naar den invloed dien het heeft, dat de kracht van den wind op het oppervlak en niet op het binnenste der watermassa werkt.* Bij de beschouwingen van § 87 en de daarvan gemaakte toepassingen is ondersteld dat de kracht van den wind, die voor de vlakke-eenheid door  $F$  werd voorgesteld, gelijkmatig over de geheele diepte verdeeld is. De correctie die daarom moet worden aangebracht kan het eenvoudigst worden berekend als men zich voorstelt dat er in het geval  $Z$  in werkelijkheid een oppervlaktekracht is geweest, die op de in § 55, c besproken wijze met de in rekening gebrachte volumekracht gelijkstaat. Dit brengt mede dat de voor het geval  $Z$  aangenomen hoogteverschillen en stroomen onveranderd kunnen worden gehandhaafd. Dat nu de zoeven genoemde oppervlaktekrachten niet meer nauwkeurig beantwoorden aan de windsterkte waarvan men uitging, is geen bezwaar, daar men bij het nu behandelde vraagstuk zich in de onderstellingen daaromtrent zekere vrijheid kan veroorloven als men maar in de gevallen  $Z$  en  $A$  met dezelfde krachten en wel met dezelfde oppervlaktekrachten rekent.

Is nu  $F_Z$  de volumekracht die in geval  $Z$  voor een of andere elementaire geul in rekening is gebracht, dan heeft volgens het gezegde in werkelijkheid een oppervlaktekracht bestaan, voor welke grootte men, als steeds ter onderscheiding de indices  $Z$  en  $A$  gebruikt worden, kan schrijven

$$\frac{F_Z}{\omega_Z} \quad (164)$$

Daarbij wordt  $\omega_Z$  op de in § 150 aangegeven wijze bepaald door de verhouding  $\gamma'$  tusschen  $F_Z$  en de verhangkracht  $f q$ , d. w. z. door

$$\gamma' = - \frac{h_w}{h},$$

daar  $h_w$  en  $h_P - h_Q = -h$ , de grootheden die men in tabel 20 vindt, juist de maat zijn voor de krachten waarvan hier sprake is.

Men moet nu ook in geval  $A$  met de oppervlaktekracht (164) rekenen, dus met een volumekracht

$$\omega_A \frac{F_Z}{\omega_Z}. \quad (165)$$

Men heeft echter ook in geval  $A$  met een volumekracht  $F_Z$  gewerkt en de vraag is dus, hoe de uitkomsten veranderen als men van deze tot (164) overgaat. Wat den coëfficiënt  $\omega_A$  betreft, deze behoort bij de verhouding  $\gamma'$  tusschen de kracht (164) en de verhangkracht  $f q$  die in geval  $A$  bestond. Daar het echter gebleken is dat de gezochte correctie klein uitvalt, mag men wel voor  $\gamma'$  de verhouding, niet van (164) maar van  $F_Z$

tot de verhangkracht nemen, en deze verhouding wordt bepaald door

$$\gamma' = -\frac{h'_w}{h'}$$

als men  $h'_w$  en  $h'$  aan tabel 21 ontleent.

De zaak komt dus hierop neer dat men in geval *A* het tweede lid van verg. (155) moet vervangen door

$$\frac{l}{g \varrho q} \frac{\omega_A}{\omega_Z} F$$

(ter vereenvoudiging  $F$  in plaats van  $F_l$ ) en de gezochte correctie bestaat in het aanbrengen van een bijkomstigen toestand, te bepalen zooals in §§ 151—153 werd uiteengezet, met voor elke geul als „beweegkracht”

$$\varphi = \frac{l}{g \varrho q} \left( \frac{\omega_A}{\omega_Z} - 1 \right) F.$$

Blijkens (50) (blz. 164) kan men hiervoor schrijven

$$\varphi = \left( \frac{\omega_A}{\omega_Z} - 1 \right) h_w,$$

waar  $h_w$  de reeds genoemde aan tabel 20 van § 90 te ontleenen grootheid is.

§ 155. *Correcties wegens de verandering die de afsluiting in de waterdiepte zal brengen.* De vergelijkingen waaraan, voor een bepaalde elementaire geul, bij de toestanden *Z* en *A* voldaan moet worden, zijn resp.

$$h_Q - h_P + \frac{l}{b^2 q^3 C^2} |s|s = \frac{l}{g \varrho q} F_l$$

en

$$h'_Q - h'_P + \frac{l}{b^2 q'^3 C^2} |s'|s' = \frac{l}{g \varrho q'} F_l, \quad (166)$$

als  $q$  en  $q'$  de diepte voor en na de afsluiting voorstellen. Met het verschil daarvan is bij de in § 91 vermelde berekeningen rekening gehouden, maar aangezien de waarde van  $q'$  (die uit de berekening moet volgen) aan vroegere voorloopige becijferingen ontleend was, laat de nauwkeurigheid daarvan te wenschen over. Men kan nu uit (166) afleiden, met welke waarden van  $\varphi$  (§ 151) men rekenen moet om de aldus gemaakte fouten te verbeteren. De correcties bleken echter zoo klein te zijn, dat er van kan worden afgezien.

§ 156. *Invloed van een kleine verandering der constante van Eytelwein.*  
a. Aan de bespreking hiervan moge een hulpvraagstuk voorafgaan.

Een vak bestaat uit een zeker aantal naast elkander liggende geulen 1, 2, ..., voor elk waarvan een vergelijking van den vorm

$$h_Q - h_P + \frac{l}{b^2 q^3 C^2} |s|s = \frac{l}{g \varrho q} F_l \quad (167)$$

geldt, waarbij de windkracht  $F_l$  (in het vervolg  $F$ ) voor alle dezelfde grootte heeft. Stel dat, terwijl de hoogten  $h_P$  en  $h_Q$  onveranderd worden gehouden, die kracht kleine veranderingen ondergaat,  $f_1$  voor de eerste geul,  $f_2$  voor de tweede, enz. Dan heeft men voor de bepaling der veranderingen  $\delta s_1, \delta s_2, \dots$  (verg. § 151) vergelijkingen van den vorm

$$k \delta s = \frac{l}{g \varrho q} f,$$

of, daar het tweede lid van (167)  $h_w$  is, als men voor het doorlatingsvermogen de notatie

$$\frac{1}{k} = \sigma$$

invoert,

$$\delta s = \sigma h_w \frac{f}{F}.$$

De verandering van den totalen stroom door het vak is dus

$$\frac{1}{F'} \sum \sigma h_w f.$$

Daar zij alleen van de hier voorkomende som afhangt, is zij zoo groot alsof in al de samenstellende geulen de windkracht de gelijke veranderingen

$$\bar{f} = \frac{\sum \sigma h_w f}{\sum \sigma h_w}$$

ondergaan had. Men toont gemakkelijk aan dat ook wanneer de hoogten  $h_P$  en  $h_Q$  op bepaalde wijze gevarieerd worden de verandering  $\bar{f}$  denzelfden invloed op den totalen stroom heeft als de afzonderlijke, ongelijke veranderingen  $f_1, f_2$ , enz.

b. Wil men aan de constante van EYTELWEIN een waarde  $C'$  toekennen, die een weinig grooter of kleiner is dan de tot nog toe gebruikte waarde  $C$ , dan kan men toch al de stroom en hoogten in den toestand  $Z$ , waarvan men uitging, onveranderd laten, als men maar de windkrachten wijzigt. Blijven nl. in een elementaire geul stroom en verval wat zij waren, dan verandert het stroomverval in (167) in verhouding van  $\frac{1}{C^2}$  tot  $\frac{1}{C'^2}$ , zoodat het eerste lid de variatie

$$\left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right) h_s \quad (168)$$

ondergaat. Aan den anderen kant brengt een verandering  $f$  van de windkracht  $F$  in het tweede lid van (167) de wijziging

$$\frac{f}{F'} h_w$$

en men zal dus bereiken wat men zich voorstelde als men

$$f = \frac{h_s F'}{h_w} \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right) \quad (169)$$

stelt. Deze waarde is niet hetzelfde voor verschillende naast elkaar liggende geulen, maar blijkens het boven onder  $a$  gezegde kan men ook over het geheele vak dat zij samenstellen de windkracht met het bedrag

$$\bar{f} = \frac{\sum \sigma h_s}{\sum \sigma h_w} F' \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right) \quad (170)$$

varieeren, tegen welke verandering geen bezwaar is (verg. § 154).

De verandering die de voor den toestand  $A$  geldende vergelijking (166) ondergaan moet bestaat nu, wat het eerste lid betreft, hierin dat de term voor het stroomverval met  $\frac{C^2}{C'^2}$  wordt vermenigvuldigd, zoodat dat lid met

$$\left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right) h'_s \quad (171)$$

verandert, en wat het tweede lid aangaat, in de verandering van  $F'$  met het bedrag (170). Dit geeft voor het tweede lid de variatie

$$\frac{\sum \sigma h_s}{\sum \sigma h_w} h_w \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right) \quad (172)$$

en de grootheden  $\varphi$  (§ 151) die voor de verdere berekening moeten dienen, worden dus bepaald door

$$\varphi = \left\{ \frac{\sum \sigma h_s}{\sum \sigma h_w} h'_w - h'_s \right\} \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right). \quad (173)$$

In den eersten factor hebben de grootheden zonder accënten betrekking op den in § 90 beschouwden toestand  $Z$  en die met accenten op den in § 91 onderzochten toestand  $A$ .

Er is ook een vrij eenvoudige formule voor de grootheid  $\psi$  (§ 152) voor een uit de naast elkaar liggende geulen samengesteld vak.

Uit formule (160) volgt, als  $k'$  de weerstand van het geheele vak is,

$$\psi = k' \left\{ \frac{\sum \sigma h_s}{\sum \sigma h_w} \sum \sigma' h'_w - \sum \sigma' h'_s \right\} \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right).$$

De sommen hebben steeds op de naast elkaar liggende geulen betrekking.

In de uitkomst kan men nog (verg. 159)

$$\sigma = \frac{s}{2 h_s}, \quad \sigma' = \frac{s'}{2 h'_s}$$

stellen, waardoor  $\Sigma \sigma h_s = \frac{1}{2} \Sigma s$ , d. w. z. de helft van den stroom in het geheele vak wordt. Evenzoo  $\Sigma \sigma' h'_s = \frac{1}{2} \Sigma s'$ , en dus

$$\psi = \frac{1}{2} k' \left\{ \frac{\Sigma \sigma' h'_w}{\Sigma \sigma h_w} \Sigma s - \Sigma s' \right\} \left( \frac{C^2}{C'^2} - 1 \right). \quad (174)$$

§ 157. *Verandering van den exponent in de weerstandswet.* In § 31 werd voor den weerstand per vlakke-eenheid van den bodem gesteld

$$\frac{g \varrho}{C^2} v^2; \quad (175)$$

bij eerste benadering kan daarbij worden aangenomen dat, bij gegeven snelheid  $v$ , de weerstand onafhankelijk van de diepte is. Men kan nu, zich bij gebrek aan beter aan dit laatste houdende, in plaats van 2 een anderen exponent, stel  $k$ , aannemen, zoodat de weerstand wordt voorgesteld door

$$\frac{g \varrho}{C'^2} v^k. \quad (176)$$

Hoe groot, in vergelijking met  $C$ , de nieuwe constante  $C'$  moet zijn, hangt van de snelheid af, die bestaan heeft bij de waarnemingen uit welke de grootte van den weerstand is afgeleid. Die snelheid is niet altijd dezelfde geweest, maar om eenigszins het gevolg van een wijziging in den exponent te beoordeelen zal er een bepaalde grootte  $v_0$  aan worden toegekend. Daarvoor kan een gemiddelde snelheid worden genomen, die bij de in § 12 vermelde stroommetingen in de Zuiderzee bestaan heeft.

Voor  $v = v_0$  moeten de uitdrukkingen (175) en (176) aan elkaar gelijk zijn.

Gaat men nu van  $v_0$  tot een grootere of kleinere waarde  $v$  over (met  $v_0$  en  $v$  worden hier steeds de absolute waarden bedoeld), dan wordt (175) vermenigvuldigd met  $\left(\frac{v}{v_0}\right)^2$  en (176) met  $\left(\frac{v}{v_0}\right)^k$ . Volgens de nieuwe in (176) uitgedrukte wet is dus de weerstand

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^{k-2}$$

maal zoö groot als tot nog toe ondersteld werd.

Het stroomverval in (167) moet dus hiermede vermenigvuldigd worden, waardoor het eerste lid der vergelijking de variatie

$$\left[ \left(\frac{v}{v_0}\right)^{k-2} - 1 \right] h_s \quad (177)$$

ondergaat. Men kan nu verder de in § 156 gebezigde redeneering stap voor stap volgen. In (168) wordt de factor tusschen de haakjes vervangen door den eersten factor uit (177), en in plaats van (170) komt er

$$\bar{f} = \frac{\Sigma \left\{ \sigma h_s \left[ \left(\frac{v}{v_0}\right)^{k-2} - 1 \right] \right\}}{\Sigma \sigma h_w} F.$$

Een hieraan beantwoordende verandering komt in het tweede lid van (166) en de variatie van het stroomverval in het eerste lid dier vergelijking is, overeenkomende met (177),

$$\left[ \left(\frac{v'}{v_0}\right)^{k-2} - 1 \right] h'_s.$$

Ten slotte

$$\varphi = \frac{\Sigma \left\{ \sigma h_s \left[ \left(\frac{v}{v_0}\right)^{k-2} - 1 \right] \right\}}{\Sigma \sigma h_w} h'_w - h'_s \left[ \left(\frac{v'}{v_0}\right)^{k-2} - 1 \right]$$

en voor een samengestelde geul

$$\psi = k' \left[ \frac{\Sigma \left\{ \sigma h_s \left[ \left( \frac{v}{v_0} \right)^{k-2} - 1 \right] \right\}}{\Sigma \sigma h_w} \cdot \Sigma \sigma' h'_w - \Sigma \left\{ \sigma' h'_s \left[ \left( \frac{v'}{v_0} \right)^{k-2} - 1 \right] \right\} \right].$$

Wel te verstaan is bij de afleiding hiervan ondersteld dat de aan te brengen correctie klein is. Dit sluit in zich dat  $k$  weinig van 2 verschilt. Is dit het geval, dan kan men de uitdrukkingen in bovenstaande vergelijkingen die  $\frac{v}{v_0}$  of  $\frac{v'}{v_0}$  bevatten, vereenvoudigen door gebruik te maken van de formule

$$a^{k-2} - 1 = (k-2) \log \text{nat } a.$$

§ 158. *Exacte berekening van den toestand in een kanaal uit de waterhoogte en den stroom aan het begin daarvan en de windkracht.* a. Om de voor dat doel in § 96 gegeven formules af te leiden behoeft men slechts de uitdrukkingen (59) en (60) in de vergelijkingen (57) en (58) te substitueeren, nadat men voor deze laatste heeft geschreven

$$\frac{\dot{s}}{s} + \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \pm \bar{s}^2 - \bar{F} = 0,$$

waarbij het bovenste of het onderste teeken geldt naar gelang  $\bar{s}$  positief of negatief is. Men krijgt door deze substitutie in de eerste leden der vergelijkingen reeksen naar de opklimmende machten van  $\bar{x}$  en komt dan tot de waarden (61) — (66) door de termen zonder  $\bar{x}$ , die met de eerste macht daarvan, die met  $\bar{x}^2$  enz, elke groep afzonderlijk genomen, nul te stellen.

Verder kan men ook al de gezochte coëfficiënten in  $\bar{h}_0$ ,  $\bar{s}_0$ ,  $\bar{F}$  en de differentiaalquotienten dezer grootheden naar den tijd uitdrukken. Differentiatie van (61) en (62) naar den tijd geeft, als nu ter vereenvoudiging de strepen boven de letters worden weggelaten,

$$\dot{s}_I = \dot{h}_0,$$

$$\dot{h}_I = \ddot{s}_0 \pm 2 s_0 \dot{s}_0 - \dot{F}$$

en door substitutie hiervan en van (61) in (63) en (64) vindt men

$$s_{II} = \ddot{s}_0 \pm 2 s_0 \dot{s}_0 - \dot{F}, \quad (178)$$

$$h_{II} = \dot{h}_0 \pm 2 s_0 \dot{h}_0. \quad (179)$$

Hieruit worden door een nieuwe differentiatie  $\dot{h}_{II}$  en  $\dot{s}_{II}$  afgeleid, welke waarden vervolgens, met die van  $s_I$  en  $s_{II}$  in (65) en (66) kunnen worden gesubstitueerd. Dit geeft

$$s_{III} = \ddot{h}_0 \pm 2 \dot{s}_0 \dot{h}_0 \pm 2 s_0 \ddot{h}_0, \quad (180)$$

$$h_{III} = \ddot{s}_0 \pm 4 s_0 \ddot{s}_0 + 4 s_0^2 \dot{s}_0 \pm 2 \dot{s}_0^2 \pm 2 \dot{h}_0^2 \mp 2 s_0 \dot{F} - \ddot{F}. \quad (181)$$

b. Of men in deze vergelijkingen de bovenste of de onderste teekens moet nemen, hangt, zooals gezegd werd, van het teeken van  $s$  af; slechts bij één keus der teekens krijgt men, als  $s$  over de beschouwde uitgestrektheid overal hetzelfde teeken heeft, juiste uitkomsten. Dit neemt niet weg dat men kan nagaan welk verschil het maakt als men, met dezelfde waarden van  $F$ ,  $h_0$ ,  $s_0$  en de differentiaalquotienten daarvan, eerst de berekening uitvoert met de bovenste en dan met de onderste teekens. In de bedoelde verschillen komen klaarblijkelijk alleen de termen voor die in bovenstaande vergelijkingen dubbele teekens hebben. Wijst men met het teeken  $\Delta$  aan wat men voor een der beschouwde grootheden meer krijgt als men met de onderste teekens dan wanneer men met de bovenste teekens werkt, dan is

$$\Delta s_I = 0, \quad \Delta h_I = -2 s_0^2, \quad \Delta s_{II} = -4 s_0 \dot{s}_0, \quad \Delta h_{II} = -4 s_0 \dot{h}_0,$$

$$\Delta s_{III} = -4 \dot{s}_0 \dot{h}_0 - 4 s_0 \ddot{h}_0,$$

$$\Delta h_{III} = -8 s_0 \ddot{s}_0 - 4 \dot{s}_0^2 - 4 \dot{h}_0^2 + 4 s_0 \dot{F}.$$

In het bijzondere geval  $s_0 = 0$  blijft hiervan alleen over

$$\Delta s_{III} = -4 \dot{s}_0 \dot{h}_0, \quad \Delta h_{III} = -4 (\dot{s}_0^2 + \dot{h}_0^2),$$

en uit (59) en (60) volgt dan

$$\Delta h = \frac{2}{3} (\dot{s}_0^2 + \dot{h}_0^2) x^3, \quad \Delta s = \frac{2}{3} \dot{s}_0 \dot{h}_0 x^3. \quad (182)$$

c. Deze formules kunnen worden toegepast wanneer op het beschouwde oogenblik de stroom in zeker punt van het kanaal nul is, en voorbij dat punt de tegengestelde richting heeft als daarvoor.

Stel dat  $A$  het beginpunt van het kanaal is, van waar men uitgaat bij het uitvoeren der in § 96 besproken berekeningen; m. a. w. laat het doel zijn  $h$  en  $s$  in een willekeurig punt van de geul uit de waarden  $h_A$  en  $s_A$  in dat beginpunt af te leiden. Laat de stroom van  $A$  af tot in zeker punt  $B$  toe dezelfde richting behouden, maar voorbij  $B$  de omgekeerde richting hebben, en zij  $C$  een verder gelegen punt, waar men den toestand wil leeren kennen. Is de stroom tusschen  $A$  en  $B$  positief, zooals om de gedachten te bepalen moge worden aangenomen, dan moet men voor het deel  $AB$  de formules met de bovenste teekens toepassen; daardoor vindt men uit  $h_A$ ,  $s_A$  en  $F$  de in  $B$  bestaande waarden, die  $h_0$  en  $s_0$  mogen heeten.

Men kan nu, met deze waarden beginnende, de berekening voor het deel  $BC$  uitvoeren, ten einde de waarden in  $C$ , op een afstand  $x$  voorbij  $B$ , te leeren kennen. Daarbij moet men, wegens het omkeeren van den stroom, met de onderste teekens gaan rekenen. Doet men dit niet, maar bezigt men ook bij deze berekening voor  $BC$  de vergelijkingen met de bovenste teekens, dan zijn de uitkomsten die men daarbij krijgt, en die  $h_C$  en  $s_C$  mogen zijn, niet goed. Uit het hierboven onder  $b$  gezegde volgt dat zij moeten worden gecorrigeerd met de grootheden (182). Het verdient nu opmerking dat de waarden  $h_C$  en  $s_C$  zijn gevonden door eerst uit  $h_A$  en  $s_A$  af te leiden  $h_0$  en  $s_0$ , de waarden in  $B$ , en dan uit deze laatste de waarden in  $C$ , en wel door bij beide stappen van deze berekening dezelfde vergelijkingen (61)–(66), steeds met de bovenste teekens, te gebruiken. Dan is het echter duidelijk dat men (als de reeksen ook over het geheele interval  $AC$  genoegzaam convergeeren) de geheele berekening met dezelfde reeksontwikkeling ineens over de volle uitgestrektheid had kunnen doen, en dat men daarbij dezelfde waarden  $h_C$  en  $s_C$  als met de twee stappen zou hebben gevonden. Aldus komt men tot den volgenden regel. Men voert eerst de berekening van  $A$  tot  $C$  uit, zonder zich om het eventueele omkeeren van den stroom te bekommeren. Doet dat omkeeren zich voor, zooals de uitkomst der berekening zal leeren, dan kan men uit de gebezigde formules afleiden hoever het omkeerpunt  $B$  van  $A$  verwijderd is, en kan men ook de waarden van  $h_0$  en  $s_0$  in  $B$  bepalen. Daarmede worden dan ook de correcties (182) bekend, die men aan  $h_C$  en  $s_C$  moet aanbrengen. Dat, zooals aan het slot van § 96 gezegd werd, deze correcties klein uitvallen, hangt hiermede samen, dat de termen van de derde orde in (59) en (60) bij de gekozen lengten klein zijn, en in (182) heeft men alleen zulke termen van de derde orde.

d. Ten slotte moge worden opgemerkt dat men de berekening zoo kan inrichten, dat bij de toepassing op een gewoon getij de termen die de hogere getijden voorstellen, duidelijk te voorschijn komen. Bevatten nl., zooals in § 97 werd aangenomen,  $h_0$  en  $s_0$  den factor  $\cos nt$ , dan komen in  $s_{II}$  en  $h_{II}$ , zooals men aan (178) en (179) ziet, termen voor met  $\cos nt \sin nt$ , en blijkens (181) in  $h_{III}$  een term met  $\cos^2 nt \sin nt$ . Voor de eerste uitdrukking kan  $\frac{1}{2} \sin 2nt$  worden geschreven en voor de tweede  $\frac{1}{4} (\sin 3nt + \sin nt)$ .

§ 159. *Oplossing van het in § 67 besproken vraagstuk.* Als bij een verheffing  $P$  de grootste hoogte  $h_1$  is zal, indien de hoogte eenigszins regelmatig verandert, voor de hoogte op een korten tijd  $x$  vóór of na den tijd van het maximum kunnen geschreven worden  $h_1 - a_1 x^2$ . Daarin is  $a_1$  een

coëfficiënt die bepaald wordt door de kromming, in het hoogste punt, van de lijn die de veranderingen van het niveau voorstelt. Een dergelijke uitdrukking  $h_2 - a_2 x^2$  geldt voor een verheffing  $Q$ .

Stel nu dat een verheffing  $P$  en een verheffing  $Q$  op zoodanige wijze samenvallen dat de grootste hoogte bij  $P$  op zekeren tijd  $t_0$  en die bij  $Q$  op den tijd  $t_0 + l$  voorkomt, waarbij  $l$  positief of negatief kan zijn. Dan zijn de waterhoogten op den tijd  $t_0 + x$

$$h_1 - a_1 x^2 \text{ en } h_2 - a_2 (x - l)^2,$$

en zal nu de resulteerende hoogte grooter dan  $H$ , of daaraan gelijk zijn, dan moet men hebben

$$a_1 x^2 + a_2 (x - l)^2 \leq q,$$

als men

$$q = h_1 + h_2 - H$$

stelt; dit wordt bij de berekening als een kleine grootheid behandeld.

Schrijft men de zooeven gevonden voorwaarde in den vorm

$$\left(x - \frac{a_2}{a_1 + a_2} l\right)^2 \leq \frac{q}{a_1 + a_2} - \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} l^2,$$

dan ziet men dat er alleen aan voldaan kan worden als

$$l^2 \leq \frac{a_1 + a_2}{a_1 a_2} q \quad (183)$$

is. De grootheid

$$l_1 = \sqrt{\frac{a_1 + a_2}{a_1 a_2} q}$$

geeft aan hoeveel tijd de twee maxima, als de hoogte  $H$  bereikt of overschreden zal worden, ten hoogste in de een of andere richting uiteen mogen liggen.

Is  $l$  een positief of negatief tijdsverloop, in absolute waarde niet boven  $l_1$ , dan zijn de uiterste waarden van  $x$  die, welke bepaald worden door

$$x - \frac{a_2}{a_1 + a_2} l = \pm \sqrt{\frac{q}{a_1 + a_2} - \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} l^2}.$$

Zij liggen met een bedrag

$$2 \sqrt{\frac{q}{a_1 + a_2} - \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} l^2} \quad (184)$$

uiteen, en dit is dus de tijd gedurende welken bij het samenvallen op de nader door  $l$  bepaalde wijze, de hoogte boven  $H$  is gestegen.

Zijn er een groot aantal verheffingen  $P$ , alle gekenmerkt door dezelfde waarden van  $h_1$  en  $a_1$ , en eveneens een groot aantal verheffingen  $Q$ , alle met dezelfde  $h_2$  en  $a_2$ , dan kunnen er ook vele coïncidenties  $P, Q$  zijn, bij welke alle aan (183) voldaan is. De waarden van  $l$  zijn bij deze verschillende coïncidenties gelijkmatig over het interval van  $-l_1$  tot  $+l_1$  verdeeld en men krijgt de gemiddelde waarde van den door (184) voorgestelden tijdsduur als men die uitdrukking met  $dl$  vermenigvuldigt, van  $-l_1$  tot  $+l_1$  integreert en de uitkomst door  $2l_1$  deelt. Die gemiddelde tijdsduur is dus

$$\frac{1}{2l_1} \int_{-l_1}^{+l_1} \sqrt{\frac{q}{a_1 + a_2} - \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} l^2} \cdot dl,$$

waarvan men de waarde het gemakkelijkst vindt als men

$$l = l_1 \sin \vartheta$$

stelt. Dan komt er nl.

$$\sqrt{\frac{q}{a_1 + a_2}} \int_{-\frac{1}{2}\pi}^{+\frac{1}{2}\pi} \cos^2 \vartheta \, d\vartheta = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{q}{a_1 + a_2}} \quad (185)$$

Laat verder  $N_1$  het aantal der verheffingen  $P$ , en  $N_2$  dat der verheffingen  $Q$  zijn, die in een zeer langen tijd  $T$  voorkomen. Dan vindt men door een eenvoudige redeneering het aantal malen dat bij een samenvallen

$P, Q$  de hoogte  $H$  wordt overschreden. Bij elke verheffing  $P$  kan een tijdsinterval  $2 l_1$  worden aangewezen, waarbinnen het maximum van een verheffing  $Q$  moet vallen als er het verlangde gevolg zal zijn. De som van alle dergelijke tijdsintervallen is  $2 N_1 l_1$ , en de kans dat het maximum eener bepaalde verheffing  $Q$  binnen dit tijdsverloop zal vallen wordt bepaald door  $\frac{2 N_1 l_1}{T}$ . Dit met  $N_2$  vermenigvuldigende vindt men voor het gezochte aantal

$$\frac{2 N_1 N_2 l_1}{T} = \frac{2 N_1 N_2}{T} \sqrt{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}} q. \quad (186)$$

De tijd gedurende welken, als men al deze coïncidenties samenvat, de waterhoogte boven  $H$  ligt, wordt gegeven door het product van (185) en (186)

$$\frac{\pi N_1 N_2}{T} \frac{q}{\sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}. \quad (187)$$

Men kan in plaats van (186) en (187) ook schrijven

$$\frac{2}{T} \Sigma \sqrt{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}} q \quad (188)$$

en

$$\frac{\pi}{T} \Sigma \frac{q}{\sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}, \quad (189)$$

als de sommen worden uitgestrekt over alle combinaties van een in den tijd  $T$  voorkomende verheffing  $P$  met een in dien zelfden tijd vallende verheffing  $Q$ . Het aantal dezer combinaties is nl.  $N_1 N_2$  en de uitdrukkingen achter het somteken zijn voor alle gelijk.

Terwijl dus (188) en (189) voor het nu beschouwde geval op hetzelfde neerkomen als (186) en (187), hebben de nieuwe uitdrukkingen het voordeel dat zij ook gelden als er allerlei verheffingen  $P$ , met verschillende waarden van  $h_1$  en  $\alpha_1$  en eveneens verschillende verheffingen  $Q$ , met ongelijke waarden van  $h_2$  en  $\alpha_2$  zijn. Ook dan nog stelt (188), over alle combinaties  $P, Q$  uitgestrekt, het aantal malen voor, dat de hoogte  $H$  overschreden wordt, en geeft (189) aan gedurende welken tijd dit, alles te zamen genomen, het geval is. Om den gemiddelden duur van den tijd gedurende welken het water de bedoelde hoogte heeft, te vinden, heeft men slechts (189) door (188) te deelen.

Men vindt de in § 67 opgegeven waarden als men de waarde van  $q$  substitueert en bedenkt dat, zooals uit de beteekenis van  $\alpha_1, \alpha_2, \delta_1$  en  $\delta_2$  volgt, tusschen deze grootheden de betrekkingen bestaan

$$\alpha_1 = \frac{4n}{\delta_1^2}, \quad \alpha_2 = \frac{4n}{\delta_2^2}.$$

## VIII. DE GOLFOPLOOP.

§ 160. *De factoren die invloed uitoefenen op den golfoploop.* De aan de Staatscommissie gegeven opdracht luidt: te onderzoeken in hoeverre, als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee, te verwachten is, dat tijdens storm hogere waterstanden *en een grootere golfoploop*, dan thans het geval is, zullen voorkomen vóór de kusten van Noordholland, Friesland enz.

De Commissie heeft dus te onderzoeken, of en in hoeverre de golfoploop zal *veranderen* tengevolge van de afsluiting.

De factoren die den golfoploop beheerschen zijn:

1<sup>o</sup>. die welke betrekking hebben op het *ontstaan* van de golf (wind-richting, windkracht en diepte in volle zee);

2<sup>o</sup>. die welke van invloed zijn op dé *voortplanting* der golf voordat deze den dijk bereikt (diepte in zee vóór den dijk, afstand waarover de golf zich, onbelemmerd door ondiepten, van uit de stormstreek kan ontwikkelen);

3<sup>o</sup>. die welke betrekking hebben op den *aanval* van de golf op het dijksbeloop (ligging van het betrokken dijkvak ten opzichte van de stormstreek, vorm en bekleeding van het dijksbeloop, aanwezigheid van voorland, helling van den zeebodem onmiddellijk buiten den dijk).

Van deze factoren zullen tengevolge van de afsluiting der Zuiderzee alleen kunnen veranderen de sub 2<sup>o</sup>. genoemde, nl. de diepte in zee vóór den dijk, en de afstand waarover de golf zich onbelemmerd kan ontwikkelen.

Het meest waarschijnlijke is, dat van deze beide alleen de eerste tengevolge van de afsluiting zal veranderen, en wel in dien zin, dat de diepte vóór den dijk zal toenemen tengevolge van de verhooging der hoge waterstanden bij storm. De tweede zou kunnen veranderen door wijziging van de geulen en platen in de Waddenzee benoorden de afsluiting, waardoor op het eene punt platen zouden ontstaan waar thans de golf zich onbelemmerd naar den dijk toe kan ontwikkelen, en op het andere punt platen zouden verdwijnen die thans de golfontwikkeling belemmeren. Het is intusschen weinig waarschijnlijk dat dergelijke veranderingen zich in eenigszins belangrijke mate zullen voordoen in de nabijheid van de kusten waarom het hier gaat, en daarom kan het onderzoek zich practisch wel beperken tot de verandering welke de golfoploop zal kunnen ondergaan tengevolge van de verhooging van de stormvloedhoogte.

Door de Staatscommissie zelf zijn omtrent dit onderwerp geen waarnemingen gedaan; wel is dit geschied door de directie der Zuiderzeewerken.

Het onderzoek dat door deze werd ingesteld naar den golfoploop en de factoren waardoor deze beheerscht wordt, omvatte:

1<sup>o</sup>. het verzamelen van gegevens omtrent de hoogte van het bij vroegere stormen aan verschillende dijken waargenomen vloedmerk, waaruit de hoogte van den golfoploop is af te leiden;

2<sup>o</sup>. het geregeld waarnemen van den golfoploop aan een aantal daartoe tegen het buitenbeloop van onder verschillende omstandigheden verkeerende dijkvakken aangebrachte schalen (zoogenaamde „golfpeilschalen”), zoowel onder gewone omstandigheden (bij hoogwater dagtij) als bij storm;

3<sup>o</sup>. het nemen van proeven in een daartoe in den tuin van het bureel der Zuiderzeewerken opgestelden proefbak, waarin kunstmatig golven van verschillende hoogte konden worden opgewekt.

§ 161. *De waarneming van het vloedmerk.* De eerste stelselmatige waarnemingen van het vloedmerk zijn op last van den toenmaligen Inspecteur van den Rijkswaterstaat J. F. W. CONRAD verricht na den storm van 12/13

December 1883; de uitkomsten daarvan zijn niet officieel gepubliceerd, doch zijn te vinden in het bekende werk „Waterbouwkunde”, 2e deel Afd. XIII, Waterstaatkundige beschrijving van Nederland door Ir. W. VERWEY Az. <sup>1)</sup> Sedert werden aan de betrokken waterstaatsambtenaren voorschriften gegeven om het vloedmerk na elken storm te doen opnemen, doch daaraan schijnt niet overal de hand te zijn gehouden, in het bijzonder niet in Friesland.

Voor Zeeland zijn echter geregelde waarnemingen beschikbaar. Daarvan zijn door den dienst der Zuiderzeewerken bewerkt die bij den stormvloed van 12/13 Maart 1906, wat een tijdroovend werk bleek, daar de hoogte van het vloedmerk meestal is opgegeven ten opzichte van de dijkskruin, waarvan de ligging ten opzichte van N.A.P. niet overal juist bekend was, en nader moest worden opgespoord.

Latere gegevens zijn nog verkregen voor de Noordhollandsche dijken bij den stormvloed van 13/14 Januari 1916 en bij de daarop gevolgde stormen van 25/26 November en 2/3 December 1917, van welken laatsten storm ook eenige gegevens ten aanzien van de Friesche zeedijken bekend zijn.

Bij de instelling, door de directie der Zuiderzeewerken, van een geregelde waarnemingsdienst langs de Friesche en Noordhollandsche Zuiderzeedijken, waarover straks nader, is ook last gegeven het vloedmerk na elken storm op te nemen; na het begin dezer waarnemingen op 1 December 1919 zijn echter slechts enkele eenigszins belangrijke stormen voorgekomen, en alleen bij die van 19 Januari 1921 en van 2 Januari 1922 bereikte de zeestand een hoogte die weinig van de vroeger waargenomen maximum hoogten verschilt.

Uit de voor den storm van December 1883 medegedeelde cijfers blijkt, dat toen de hoogste golfoploop aan dijken welke geacht kunnen worden in ongeveer gelijke omstandigheden te verkeeren als die langs de Waddenzee na de afsluiting, bedroeg 2,70 m, en wel aan den Noorderdijk van Drechterland. Deze maat werd dan ook door de Staatscommissie van 1892 aangenomen bij de bepaling van de aan den afsluitdijk te geven hoogte. Wel werden in 1883 nog hoogere golfoploopen waargenomen, o.a. een van 5,80 m aan den Westkapelschen zeedijk, doch deze dijk is aan de volle Noordzee blootgesteld, en bovendien is bij nader onderzoek gebleken dat het opgegeven cijfer vermoedelijk onjuist is, en aangeeft de golfverheffing boven den dagelijkschen hoogwaterstand en niet boven de stormvloedhoogte ter plaatse.

Uit de sedert bekend geworden gegevens is intusschen gebleken dat de hoogste golfoploop van 2,70 m, waarop de Staatscommissie van 1892 zich bij de bepaling van de kruinshoogte voor den afsluitdijk baseerde, belangrijk overschreden kan worden. Tijdens den stormvloed van 13/14 Januari 1916 moet de golfoploop bij den Noorderdijk van Drechterland, welke toen niet rechtstreeks kon worden waargenomen daar het water op verschillende plaatsen over de dijkskruin stroomde, ongeveer 3,50 m hebben bedragen, terwijl in 1906 nog een hoogere golfoploop, en wel van omstreeks 3,80 m, is waargenomen tegen den dijk van het Waterschap Groede en Baanst langs de Wester-Schelde bewesten Breskens.

§ 162. *De waarnemingen aan de golfpeilschalen.* Het doel van deze waarnemingen was gegevens te verkrijgen omtrent den golfoploop zoowel bij storm als onder gewone omstandigheden. Daartoe zijn op verschillende daartoe geschikt geachte punten tegen het buitenbeloop der zeedijken aangebracht zoogenaamde golfpeilschalen, bestaande uit een rij in het beloop geslagen houten piketten, waarvan de ongeveer gelijk met het beloop afgewerkte koppen onderling 0,20 m in hoogte verschillen en voorzien zijn van een geëmailleerd ijzeren plaatje, waarop de hoogte t.o.v. N.A.P. is aangegeven, welke plaatjes vanaf de dijkskruin kunnen worden afgelezen. De 14 schalen zijn aangebracht langs dijkvakken, naar verschillende windstreken gekeerd en met verschillende belooopen en verschillende waterdiepten daarvoor, en

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 64.

wel zes langs de Friesche kust tusschen Roptazijl en Stavoren, zes langs de Noordhollandsche kust tusschen den Venhoek benoorden Enkhuizen en Helder, en voorts één tegen den Helderschen zeedijk en één tegen den Oeverdijk op Wieringen. De waarnemers werden zooveel mogelijk gekozen onder de waterstaats- of waterschapsbeambten in de nabijheid; zij ontvingen de instructie om den golfoploop op te nemen bij elk hoogwater dagtij en voorts meermalen bij storm, terwijl zij na elken storm ook het vloedmerk moesten opnemen. De waarnemingen zijn begonnen 1 December 1919 en voortgezet tot 1 Juli 1921. Daar tijdens de waarnemingen slechts één zware storm is voorgekomen, nl. op 19 Januari 1921, zijn slechts enkele cijfers omtrent den hoogsten golfoploop verkregen die ter aanvulling kunnen dienen van de van elders bekende gegevens <sup>1)</sup>. Overigens bleken de door de waarneming der golfpeilschalen verkregen cijfers zonder duidelijke oorzaak vrij sterk uiteen te loopen, zoodat daaruit geen rechtstreeksche gevolgtrekkingen konden worden gemaakt.

§ 163. *De waarnemingen in den proefbak.* De proeven zijn genomen in de eerste helft van 1920.

De houten proefbak had een lengte van 15 m, de grootste welke in verband met de afmetingen van den tuin van het bureel der Zuiderzeewerken mogelijk was, en een breedte van 1,50 m, die door het plaatsen van langsschotten in drie goten van 0,50 m of twee goten van 0,75 m verdeeld kon worden. De hoogte van den bak bedroeg 1 m, terwijl de maximum waterdiepte waarmede gewerkt kon worden 0,60 m was. Aan het eene einde van den bak werden de golven opgewekt door beweging in horizontalen zin van een verticaal schot; aan het andere einde was een schuin beloop van planken aangebracht, waaraan verschillende hellingen konden worden gegeven. De beweging van het schot geschiedde met de hand, met verschillende uitslagen en in verschillend tempo, dat met behulp van een metronoom werd gecontroleerd.

Het gelukte in den bak regelmatige golven op te wekken tot een maximum hoogte van 0,27 m, welke hoogte minder bleek te bedragen dan zou volgen uit de vrij algemeen aangenomen theorie dat bij golfbeweging in een watermassa met beperkte diepte de golfhoogte iets minder dan  $\frac{4}{5}$  van de aanvankelijke waterdiepte kan bedragen (zie o. a. HAGEN, Ueber Wellen auf Gewässern von gleichmässiger Tiefe <sup>2)</sup>).

De bedoeling was om door proeven de volgende vraagpunten te onderzoeken:

a. het verband tusschen de helling van een beloop en den golfoploop daartegen;

b. de invloed op den golfoploop van meer of minder ruwheid van het beloop;

c. het verband tusschen de waterdiepte vóór den dijk en den golfoploop;

d. de invloed op den golfoploop van op eenigen afstand vóór den dijk gelegen ondiepten;

e. de invloed op den golfoploop van buitenbermen en van het onderzeesche beloop vóór den dijk.

In den regel werd ter vergelijking gewerkt met 2 of 3 goten, waarvan dan één, met een dijksbeloop van 4 op 1, onder normale omstandigheden verkeerde. Voorts werd gewerkt met waterdiepten van 0,30, 0,40, 0,50 en 0,60 m.

Bij de genomen proeven kon intusschen geen rekening worden gehouden met den factor *wind*; daarom kunnen de uitkomsten dier proeven niet

<sup>1)</sup> Na het eindigen van de waarnemingen zijn verscheidene stormvloeden van middelmatige hoogte voorgekomen. Uit het oogpunt van golfoploop is de belangrijkste die van 25/26 November 1925; de tot NNO geruimde wind veroorzaakte een zwaren golfaanval op dijken die in den regel niet sterk zijn blootgesteld. Tegen den Zeedijk beoosten Muiden was de golfoploop grooter dan 250 cm, langs de dijken van de Waarden Groetpolders omstreeks 3 meter.

<sup>2)</sup> Literatuuropgave n°. 65.

rechtstreeks dienen om daaruit gevolgtrekkingen te maken voor de praktijk. Toch schijnt het wel van belang om op deze plaats iets omtrent deze uitkomsten mede te deelen en wel in het bijzonder omtrent die van de proeven, welke betrekking hadden op het sub *c* genoemde punt, daar de andere voor het doel der Staatscommissie minder waarde hebben. Terloops moge worden vermeld, dat bij de omtrent punt *a* genomen proeven bleek, dat de golfoploop bij zeer flauwe belooen gering is en bij een helling van 8:1 of flauwer nog niet de hoogte van de golfverheffing buiten in zee bereikt, dat tusschen de grenzen 8:1 en 3:1 de golfoploop met de steilheid van het beloop toeneemt en bij ongeveer 3:1 een maximum bereikt, waarbij de golfoploop ongeveer 3 maal de hoogte der golfverheffing buiten bedraagt, en dat, als het beloop dan nog steiler wordt, de breking van de golf op het beloop ophoudt en terugkaatsing begint, waarbij door interferentie een onregelmatige beweging optreedt en de golf nu en dan uitschiet en een groote hoogte kan bereiken, tot 4 à 5 maal de hoogte der golfverheffing.

Verder kan nog worden medegedeeld dat bij de in den bak genomen proeven waarbij het houten beloop kunstmatig ruw werd gemaakt door daarop een laag mastiek met grind aan te brengen, van eenigen be- teekenenden invloed van de ruwheid van het beloop op den golfoploop niets is gebleken.

Bij de sub *c* genoemde proeven omtrent het verband tusschen de waterdiepte vóór den dijk en den golfoploop, werden de ondiepten vóór den dijk nagebootst door in één of meer der goten houten verhoogingen aan te brengen, waardoor de oorspronkelijke waterdiepte met resp. 0,10, 0,20 m enz. verminderd kon worden.

De proeven leerden dat in het algemeen de golfoploop toeneemt met de diepte vóór den dijk. Daarbij waren drie gevallen te onderscheiden:

1<sup>o</sup>. Als de diepte vóór het beloop nog minstens  $\frac{2}{3}$  bedroeg van de diepte verder buitenwaarts, was van den invloed der verondieping weinig te bespeuren; in enkele gevallen werd zelfs een geringe verhooging van den golfoploop waargenomen.

2<sup>o</sup>. Bij vermindering der diepte vóór het beloop tusschen de grenzen van  $\frac{2}{3}$  en  $\frac{1}{3}$  der diepte verder buitenwaarts was, vooral voor de grootere golven, een aanzienlijke vermindering van den golfoploop te constateeren. De golven braken dan als zij de ondiepte bereikten en zetten hun weg naar den dijk met verminderde hoogte voort.

3<sup>o</sup>. Bij nog sterker vermindering der diepte (tot minder dan  $\frac{1}{3}$  van de diepte verder buitenwaarts) werd in vele gevallen weder een hooger golfoploop waargenomen; het water stroomde dan, na het breken van de golf op de ondiepte, met groote snelheid naar den dijk toe en stuwde daartegen op.

Zooals hierboven reeds is opgemerkt kon bij deze in den golfbak genomen proeven geen rekening worden gehouden met den factor wind; daarom was het in de eerste plaats noodig de uitkomsten dezer proeven te vergelijken met de uitkomsten der waarnemingen aan de golfpeilschalen. Deze laatste hebben geleerd dat de wind inderdaad bij den golfoploop een voorname rol speelt, vooral als hij op den dijk is gericht. De uitkomsten der waarnemingen aan de golfpeilschalen welke werden verricht bij weinig of geen, of bij van den dijk afgekeerden, wind, bleken vrijwel overeen te stemmen met de uitkomsten der in den golfbak genomen proeven; bij toeneming der steilheid van het dijksbeloop bleek ook de golfoploop toe te nemen. Naarmate echter de wind tijdens de waarnemingen sterker of meer op den dijk gericht was, werden de onderlinge verschillen tusschen de waargenomen golfoploopen kleiner en ten slotte werden zij zoo gering dat bij sterken wind niets meer bleek van eenigen invloed van de helling van het beloop op de hoogte van den golfoploop, althans niet bij de in de praktijk meestal toegepaste hellingen van 3 tot 5 op 1.

Zoo was o. a. bij den storm van 19 Januari 1921 de golfoploop tegen den zeedijk benoorden Harlingen, met een buitenbeloop van 4:1, even

groot als die tegen den zeedijk bezuiden die plaats met een beloop van 5 : 1, niettegenstaande ook de diepte vóór den eerstgenoemden dijk nog iets grooter is. Ook de gemiddelden van de bij sterken wind (geen storm) tegen deze dijken waargenomen golfoploopen bleken vrijwel gelijk te zijn.

Uit deze waarnemingen zou dus zijn af te leiden dat, althans binnen de grenzen van de voor de Zuiderzeedijken toegepaste hellingen van 3 tot 5 op 1, de helling van het dijksbeloop op de hoogte van den golfoploop bij storm weinig invloed heeft, en praktisch kan worden uitgeschakeld. Als factoren welke op die hoogte van invloed zijn blijven dan: de ligging ten opzichte van de stormstreek, de afstand waarover de golf zich naar den dijk toe kan ontwikkelen en de diepte in zee vóór den dijk.

Aan de ligging van de dijken langs de Waddenzee wordt nu door de afsluiting der Zuiderzee niets veranderd. De afstand waarover de golf zich kan ontwikkelen zal ook niet of slechts weinig veranderen, wanneer althans, gelijk wel mag worden aangenomen, in de nabijheid der bestaande dijken bij den nieuwen toestand geen diepe geulen worden gevormd. Er blijft dus over de diepte vóór de dijken, die tengevolge van de afsluiting wél veranderen kan.

§ 164. *Het verband tusschen waterdiepte en golfoploop.* Voor het doel der Staatscommissie is het dus van belang, binnen redelijke grenzen te kunnen vaststellen in welke verhouding de golfoploop verandert met de diepte vóór den dijk. Men zal dan in staat zijn, voor elk punt langs de kusten der Waddenzee te bepalen met hoeveel de door de Commissie aan te geven verhooging van de stormvloedhoogte nog moet worden vermeerderd om te komen tot de maat der verhooging welke de dijk ter plaatse zal moeten ondergaan.

De in den proefbak gedane waarnemingen kunnen hiertoe niet dienen, alleen reeds omdat daarbij geen rekening kon worden gehouden met den wind.

De waarnemingen aan de golfpeilschalen zijn evenmin voor het doel geschikt, eensdeels omdat door het wegblijven van hevige stormen tijdens de waarnemingsperiode voor elk punt slechts over enkele waarnemingen kan worden beschikt en anderdeels omdat de verkregen resultaten te groote en niet voldoende te verklaren afwijkingen vertoonen. Theoretisch zou een goed overzicht over de verhouding van golfoploop tot waterdiepte zijn te verkrijgen door aan een zelfde golfpeilschaal tijdens een zelfden storm, of desnoods bij eenige gelijk gerichte en ongeveer even krachtige stormen, op verschillende oogenblikken van het tij en dus bij verschillende waterstanden den golfoploop waar te nemen. In werkelijkheid echter bleken de verschillen in waterstand, en dus ook in diepte, te klein om veel invloed op den golfoploop te hebben, en werd deze door andere factoren, in het bijzonder door de zeer veranderlijke windkracht en windrichting, beheerscht, zóó dat meermalen bij een lageren waterstand een hooger oploop werd geconstateerd.

Men is dus voor het opsporen der bedoelde verhouding aangewezen op vergelijking van de bij verschillende stormen aan verschillende dijkvakken verrichte waarnemingen, en wel in hoofdzaak op de waarnemingen van het *vloedmerk*. Gelukkig zijn hieromtrent verschillende cijfers beschikbaar en door deze te vergelijken, daarbij zooveel mogelijk uitkiezende de waarnemingen welke zijn verricht onder ongeveer gelijke omstandigheden, d.w.z. tijdens een hevigen, ongeveer loodrecht op de dijksrichting gericht, storm op punten waar een ruime watervlakte vóór den dijk aanwezig is, is het mogelijk gebleken een overzicht samen te stellen, waaruit iets omtrent het verband tusschen golfoploop en waterdiepte vóór den dijk valt af te leiden. Dat overzicht is opgenomen in tabel 49.

Het was uit den aard der zaak niet mogelijk om voor de samenstelling van het overzicht dijkvakken uit te kiezen welke wat ligging ten opzichte van de stormstreek, breedte der watervlakte voor den dijk, toestand der dijksglooiing, enz. betreft, in volkomen gelijke omstandigheden verkeerden, noch om op verschillende tijdstippen stormen te vinden, waarbij windkracht

## Staat van punten langs verschillende zeedijken met de voor den dijk aanwezige zeediepte en den aldaar waargenomen hoogsten golfoploop.

| Volg.<br>nummer. | Plaats van waarneming.  | Richting van<br>de normaal<br>op den dijk. | Tijdstip der waarneming. | Stormvloed-<br>hoogte +<br>N. A. P. | Zeediepte<br>voor den dijk<br>t. o. v. N.A.P. | Totale<br>waterdiepte<br>tijdens den<br>stormvloed. | Bedrag van<br>den hoogsten<br>golfoploop. | Volg-<br>nummer. |
|------------------|---|--|--------------------------|-------------------------------------|---|---|---|------------------|
| 1                | Dijk van het Waterschap Wonseradeel's Zuiderzeedijken nabij dijkpaal 0 (Workumer hek) . . . . .                               | WZW  | 2 Dec. 1917              | 2,00 m                              | N.A.P.  | 2,00 m  | 1,70 m                                    | 1                |
| 2                | Dijk van de Vijf Deelen Zeedijken Buitendijks benoorden de haven van Makkum (waarnemingschaal) . . . . .                      | West                                       | 18/19 Jan. 1921          | 2,13 „                              | N.A.P.  | 2,13 „  | 1,35 „                                    | 2                |
| 3                | Dijk van het Waterschap Het Nieuw Bildt nabij den overzet. . . . .  | NNW  | 2 Dec. 1917              | 2,60 „                              | 0,25 m +                                      | 2,35 „  | 1,65 „                                    | 3                |
| 4                | Dijk van het Waterschap Het Oud Bildt westzijde . . . . .   | West                                       | 2 Dec. 1917              | 2,65 „                              | 0,25 „ +                                      | 2,40 „  | 1,70 „                                    | 4                |
| 5                | Zelfde dijk noordwestzijde . . . . .  | NW   | 2 Dec. 1917              | 2,65 „                              | 0,25 „ +                                      | 2,40 „  | 1,85 „                                    | 5                |
| 6                | Dijk van het Waterschap de Bildtpollen nabij dijkpaal 64 . . . . .  | NNW  | 19 Jan. 1921             | 2,43 „                              | N.A.P.  | 2,43 „  | 1,97 „                                    | 6                |
| 7                | Balgdijk van den Anna Paulownapolder, dijkpaal 68—115 . . . . .   | NNO  | 2/3 Dec. 1917            | 2,10 „                              | 0,40 m —                                      | 2,50 „  | 1,25 „                                    | 7                |
| 8                | Dijk van het Waterschap Het Nieuw Bildt zuidwestzijde . . . . .   | ZW   | 2 Dec. 1917              | 2,60 „                              | N.A.P.  | 2,60 „  | 1,50 „                                    | 8                |
| 9                | Dijk van het Waterschap De Bildtpollen nabij het Groote Gat . . . . .   | NNW  | 2 Dec. 1917              | 2,60 „                              | N.A.P.  | 2,60 „  | 2,00 „                                    | 9                |
| 10               | Amsteldijk van den Anna Paulownapolder, dijkpaal 45—52 (tegenover den noordwaarts gerichten tak van het Amsteldiep) . . . . . | NNO  | 2/3 Dec. 1917            | 2,10 „                              | 1,40 m —                                      | 3,50 „  | 2,26 „                                    | 10               |
| 11               | Lijn F van den dijk van den polder Waard en Groet. . . . .  | NO   | 2/3 Dec. 1917            | 2,05 „                              | 0,80 „ —                                      | 2,85 „  | 1,65 „                                    | 11               |
| 12               | Dijk van de Vijf Deelen Zeedijken Buitendijks ca. 1500 m benoorden Makkum (dijkpaal 62) . . . . .                             | West                                       | 2 Dec. 1917              | 2,35 „                              | 0,50 „ —                                      | 2,85 „  | 2,02 „                                    | 12               |
| 13               | Dijk van het Waterschap Het Nieuw Bildt noordwestzijde. . . . .   | NW   | 2 Dec. 1917              | 2,60 „                              | 0,50 „ —                                      | 3,10 „  | 2,15 „                                    | 13               |
| 14               | Zeedijk beoosten Muiden. . . . .  | Noord                                      | 2/3 Dec. 1917            | 2,45 „                              | 1,00 „ —                                      | 3,45 „  | 1,75 „                                    | 14               |
| 15               | Dijk van het Waterschap Het Nieuw Bildt westzijde. . . . .  | West                                       | 2 Dec. 1917              | 2,60 „                              | 1,00 „ —                                      | 3,60 „  | 2,25 „                                    | 15               |
| 16               | Waarnemingschaal voor den golfoploop aan den Oeverdijk op Wieringen   | NNW  | 12 Jan. 1920 — 9.15 vm   | 0,78 „                              | 2,90 „ —                                      | 3,68 „  | 2,20 „                                    | 16               |
| 17               | Dijk van de Vijf Deelen Zeedijken Binnendijks nabij dijkpaal 2. . . . .   | NW   | 2 Dec. 1917              | 2,70 „                              | 1,00 „ —                                      | 3,70 „  | 1,89 „                                    | 17               |
| 18               | Zelfde dijk nabij dijkpaal 4. . . . .   | NW   | 2 Dec. 1917              | 2,70 „                              | 1,80 „ —                                      | 4,50 „  | 2,43 „                                    | 18               |
| 19               | Zelfde dijk nabij dijkpaal 7. . . . .   | NWtW                                       | 2 Dec. 1917              | 2,75 „                              | 2,30 „ —                                      | 5,05 „  | 2,64 „                                    | 19               |
| 20               | Westerdijk van de Vier Noorderkoggen, dijkpaal 40—52½. . . . .  | NW   | 19 Dec. 1919             | 1,71 „                              | 3,50 „ —                                      | 5,21 „  | 2,99 „                                    | 20               |
| 21               | Zelfde dijk, dijkpaal 19 . . . . .  | Noord                                      | 2/3 Dec. 1917            | 2,25 „                              | 3,00 „ —                                      | 5,25 „  | 2,20 „                                    | 21               |
| 22               | Dijk van de Vijf Deelen Zeedijken Buitendijks nabij den Groenen Dijk (dijkpaal 18). . . . .                                   | WNW  | 2 Dec. 1917              | 2,60 „                              | 2,70 „ —                                      | 5,30 „  | 2,84 „                                    | 22               |
| 23               | Noorderdijk van Drechterland, dijkpaal 20—22. . . . .   | NNW  | 13/14 Jan. 1916          | 2,40 „                              | 3,00 „ —                                      | 5,40 „  | 3,15 „                                    | 23               |
| 24               | Westerdijk van de Vier Noorderkoggen, dijkpaal 49 . . . . .   | NW   | 2/3 Dec. 1917            | 2,15 „                              | 3,50 „ —                                      | 5,65 „  | 2,55 „                                    | 24               |
| 25               | Zelfde dijk nabij dijkpaal 42 . . . . .   | NW   | 2/3 Dec. 1917            | 2,20 „                              | 3,50 „ —                                      | 5,70 „  | 2,40 „                                    | 25               |
| 26               | Dijk van de Vijf Deelen Zeedijken Buitendijks nabij den Steenen Man te Harlingen . . . . .                                    | West                                       | 2 Dec. 1917              | 2,70 „                              | 3,00 „ —                                      | 5,70 „  | 2,73 „                                    | 26               |
| 27               | Westerdijk van de Vier Noorderkoggen, dijkpaal 43 . . . . .   | NW   | 13/14 Jan. 1916          | 2,45 „                              | 3,50 „ —                                      | 5,95 „  | 2,50 „                                    | 27               |
| 28               | Zelfde dijk, dijkpaal 58 . . . . .  | Noord                                      | 13/14 Jan. 1916          | 2,40 „                              | 4,00 „ —                                      | 6,40 „  | 2,70 „                                    | 28               |
| 29               | Dijk van de Vier Noorderkoggen, dijkpaal 61—64 . . . . .  | NW   | 6/7 Nov. 1921            | 1,84 „                              | 4,80 „ —                                      | 6,64 „  | 2,96 „                                    | 29               |
| 30               | Dijk van de Vijf Deelen Zeedijken Binnendijks, dijkpaal 104 . . . . .   | WNW  | 19 Jan. 1921             | 2,43 „                              | 4,50 „ —                                      | 7,00 „  | 3,03 „                                    | 30               |
| 31               | Zelfde dijk nabij Roptazijl (dijkpaal 9.6) . . . . .  | NWtW                                       | 2 Dec. 1917              | 2,75 „                              | 4,80 „ —                                      | 7,55 „  | 2,95 „                                    | 31               |
| 32               | Noorderdijk van Drechterland, dijkpaal 56—58. . . . .   | NNO  | 13/14 Jan. 1916          | 2,40 „                              | 6,50 „ —                                      | 8,90 „  | 3,50 „                                    | 32               |
| 33               | Dijk van den polder Groede en Baanst (Zeeuwsch-Vlaanderen) . . . . .  | NWtN                                       | 12/13 Maart 1906         | 3,95 „                              | ca. 10 m —                                    | ca. 14 „  | 3,80 „                                    | 33               |
| 34               | Waarnemingschaal van den golfoploop aan de Heldersche zeevering . . . . .   | Noord                                      | 19 Jan. 1921 — 11.45 vm  | 1,58 „                              | 30 à 40 m —                                   | ca. 40 „  | 4,42 „                                    | 34               |

en windrichting geheel gelijk waren. De in het overzicht opgenomen cijfers voor den golfloop zullen dus verschillen vertoonen welke niet uitsluitend het gevolg zijn van het verschil in diepte vóór den dijk. Toch kan wel worden aangenomen dat, door voor eik punt den hoogsten aldaar waargenomen golfloop te kiezen, de waarnemingen zijn geschied onder tamelijk gelijke meteorologische omstandigheden, en wel bij de grootste windkracht welke aan onze kusten voorkomt, terwijl voorts de waarnemingspunten zooveel mogelijk zijn gekozen aan dijkvakken welke tegen de stormstreek, tusschen West en Noord, zijn gekeerd, en wel voor het meerendeel langs de Friesche west- en noordwestkusten en langs de naar het Noorden gekeerde kusten van Noordholland. Waar langs de kust van Noordholland waarnemingen van den golfloop tegen meer naar het Noordoosten gekeerde dijkvakken zijn opgenomen, is dit niet geschied dan nadat uit een nader onderzoek, waarbij gebruik werd gemaakt van door het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut ter inzage verstrekte grafieken van windrichting en windkracht, was vastgesteld dat tijdens de betrokken stormen, waarvan de algemeene richting was van West tot Noord, kort uitschietende buien met groote windsnelheid voorkwamen, waarbij de wind door het Noorden heen vrij ver naar het Oosten liep, zoodat mag worden aangenomen dat ook de tegen het Noordoosten gekeerde dijkvakken, waarvan enkele in de tabel zijn opgenomen, gedurende korten tijd aan de volle stormkracht zijn blootgesteld geweest.

In het overzicht zijn voorts alleen opgenomen dijkvakken waarbuiten over een geruimen afstand uit de kust de waterdiepte tamelijk gelijk blijft; dit is de reden waarom van een aantal gegevens omtrent den aan de Zeeuwsche dijken waargenomen golfloop bij de samenstelling der tabel geen gebruik is gemaakt, omdat voor deze dijken in het algemeen de waterdiepte over korte afstanden sterk afwisselt. De buitenglooiing der dijkvakken waarlangs de waarnemingen zijn verricht, hebben hellingen afwisselende tusschen 3 : 1 en 5 : 1; alle zijn van steenglooiing, meerendeels van een glooiing van zuilenbasalt, voorzien. In de tabel zijn in hoofdzaak opgenomen waarnemingen aan de Friesche- en Noordhollandsche Zuiderzeedijken, waarlangs zich geen wateren bevinden met grootere diepte dan ongeveer 7 m — N.A.P. Ten einde het verschijnsel van den golfloop ook voor grooter diepte te kunnen nagaan, werd daarnevens nog een waarneming opgenomen aan den dijk van den polder Groede en Baanst, gelegen aan den zuidelijken oever van de Wester-Schelde bewesten Breskens, buiten welken dijk, die niet van een buitenberm is voorzien, zich een waterdiepte van ongeveer 10 m — N.A.P. over tamelijk grooten afstand uitstrekt, terwijl voorts nog werd opgenomen een waarneming aan de eveneens niet van een buitenberm voorziene Heldersche zeewering, waarvoor zich een waterdiepte van 30 à 40 m bevindt, ofschoon deze laatste waarneming in verband met de ligging der zeewering aan het Heldersche zeegat voor het doel slechts een betrekkelijke waarde heeft, en alleen kan dienen om eenig inzicht te geven in de mate waarin de maximum golfloop toeneemt bij zeer groote diepte.

Uit de in de tabel opgenomen gegevens blijkt een vrij regelmatige toeneming van den hoogsten golfloop naarmate de waterdiepte vóór den dijk tijdens den stormvloed grooter wordt. Een nog duidelijker beeld hiervan wordt verkregen uit de grafische voorstelling van de in tabel 49 opgenomen waarden (figuur 57).

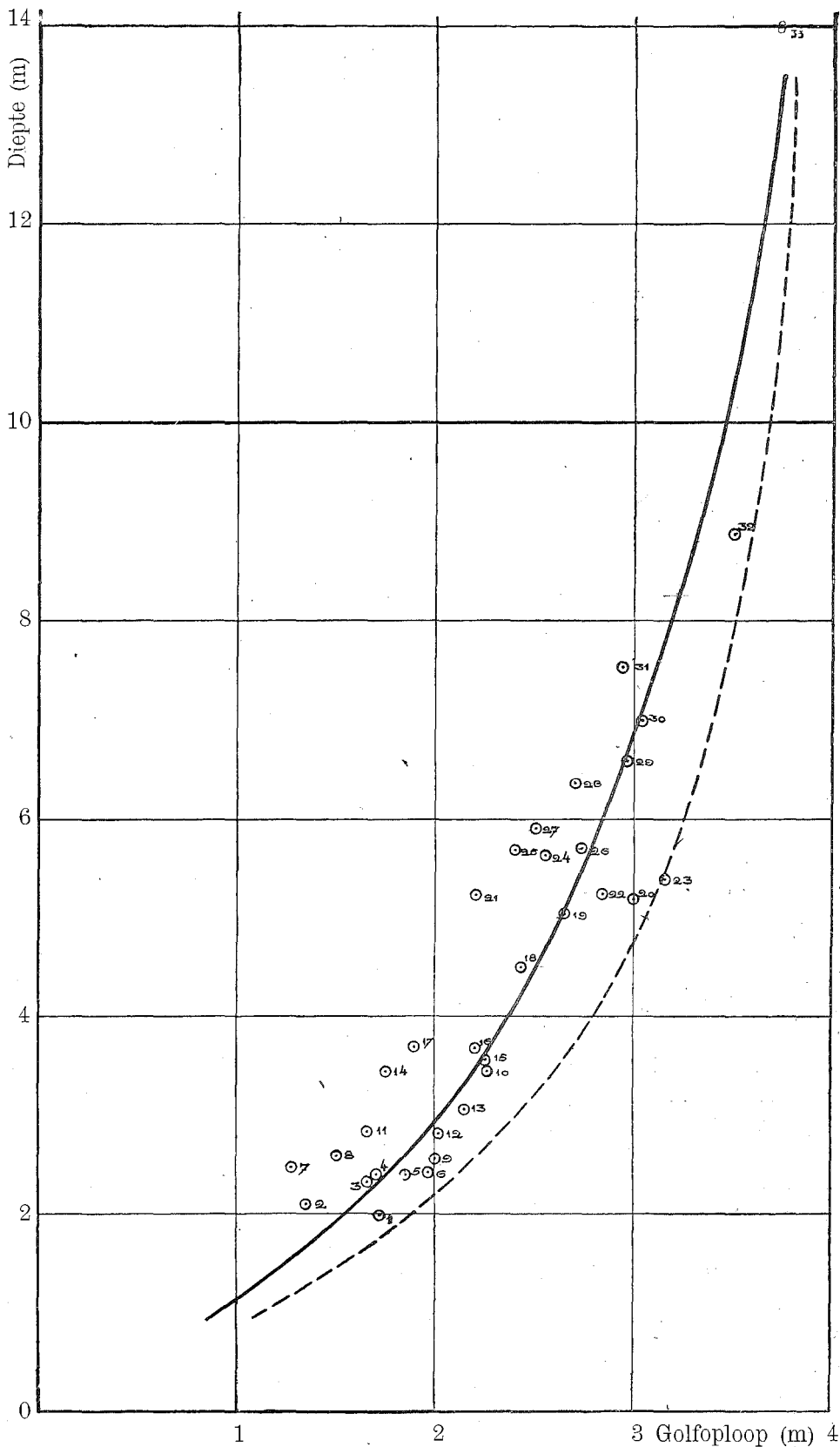
De ordinaten in die voorstelling geven de hierboven bedoelde waterdiepte aan, de abscissen stellen den hoogsten daarbij voorgekomen golfloop, afgeleid uit het waargenomen vloedmerk, voor.

Na het in tekening brengen der verschillende punten bleek met behulp daarvan een regelmatige kromme lijn te kunnen worden getrokken, die de gemiddelde verhouding tusschen waterdiepte en golfloop voorstelt.

De afwijkingen der verschillende punten van de daartusschen getrokken kromme blijken binnen redelijke grenzen te blijven; de grootste afwijking bedraagt, overgebracht van de schaal der tekening, ongeveer 50 cm, terwijl

VERBAND TUSSCHEN GOLFOPLOOP EN WATERDIEPTE.

De bij de punten geschreven cijfers hebben betrekking op de volgnummers van tabel 49.



— Gemiddelde kromme.  
 - - - Omhullende kromme.

Figuur 57.

25 van de 32 punten, d.i. bijna 80 %, minder dan 30 cm buiten de lijn vallen. De belangrijkste afwijkingen zijn voorts zeer wel te verklaren uit de overige factoren welke, naast de waterdiepte vóór den dijk, den grootsten golfloop bepalen. Zoo blijkt o.a. bij het punt 23, dat vrij ver buiten de lijn valt, de aangegeven waterdiepte slechts over ruim 1 km breedte vóór den dijk aanwezig te zijn, terwijl daarbuiten een veel grooter diepte wordt aangetroffen, nl. de diepe geul genaamd het Wagenpad, terwijl aan den anderen kant de punten 7, 11 en 14 behooren tot dijken welke meer naar het Noordoosten, dus niet tegen de streek der hevigste stormen, gekeerd zijn, en de punten 21, 24, 25, 27 en 28 alle zijn gelegen langs den Westerdijk der Vier Noorderkoggen, van welken dijk de buitenglooing is bekleed met zogenaamden Noorschen steen, op de punt gezet en een zeer ruwe oppervlakte vormende, waardoor de golfloop eenigszins vertraagd en verminderd wordt.

Het geringe bedrag der afwijkingen van de getrokken lijn wijst er intusschen op dat bij tegen de stormstreek gekeerde dijken de waterdiepte vóór den dijk verreweg de voornaamste factor is welke den grootsten golfloop beheerscht. Voor een aldus gelegen dijk zal men dan ook niet vermistasten als men voor den hoogsten golfloop aanneemt de waarde welke in verband met de waterdiepte door de getrokken kromme wordt aangegeven.

Wil men intusschen nog meer zekerheid hebben dat de hoogste golfloop in ieder geval zal blijven beneden de uit de grafische voorstelling af te leiden waarde, dan kan daartoe dienen een andere kromme, welke met een gestippelde lijn in figuur 57 is aangegeven en zoodanig is getrokken dat alle punten daarbinnen vallen.

Voor het doel waarmede de Staatscommissie is ingesteld zal het intusschen voldoende zijn, te bepalen welke vermeerdering de hoogste golfloop zal kunnen ondergaan in verband met de vergrooting der waterdiepte die voor de betrokken dijken is te verwachten tengevolge van de verhooging der stormvloeden na de afsluiting der Zuiderzee.

Ook deze vermeerdering is uit de grafische voorstelling op eenvoudige wijze af te leiden, door het verschil te bepalen tusschen den hoogsten golfloop bij de in de toekomst te verwachten waterdiepte en dien bij de thans aanwezige diepte; het blijkt daarbij geen groot verschil te maken of men van de getrokken dan wel van de gestippelde lijn uitgaat.

Uit den aard der zaak is de grafische voorstelling alleen te gebruiken wanneer het geldt dijkvakken die op de stormstreek, d.i. ongeveer van West tot Noord, zijn gelegen en waarvoor de aangegeven waterdiepte over een aanzienlijke breedte aanwezig is.

Met de buiten de afsluiting vallende dijken langs den vasten wal van Friesland en Noordholland en met de zeeweringen langs de noordkust van Wieringen is dit het geval, en voor deze dijken zal dan ook de te verwachten hoogste golfloop zonder eenige correctie met behulp van de krommen van figuur 57 kunnen worden bepaald.

Voor de dijken langs de binnenzijde der Waddeneilanden, die voor het meerendeel niet tegen de stormstreek zijn gekeerd, zouden uit deze krommen te groote waarden voor den golfloop worden gevonden, en hier zal dus naar gelang van de ligging van het betrokken dijkvak eenige reductie op die waarden mogen worden toegepast. Zij kan voor geheel van de stormrichting afgekeerde dijken ongeveer 50 % bedragen en moet natuurlijk ook aan de vergrooting van den golfloop tengevolge van de stormvloedverhooging worden aangebracht.

Deze vergrooting is in tabel 50 bepaald door in het diagram van figuur 57 den golfloop die behoort bij een waterdiepte, gelijk aan de som van de in de kolommen 19 en 11 van tabel 42 geplaatste getallen, te vergelijken met dien welke kan voorkomen bij de diepte, gelijk aan de som van de getallen van kolom 19 en 12 (of, wat op hetzelfde neerkomt, 17) van die tabel, al dan niet na het aanbrenge van bovenbedoelde reductiën. De uitkomsten zijn in kolom 20 van tabel 42 (blz. 200a) opgenomen, terwijl in tabel 50 is aangegeven hoe zij zijn afgeleid.

TABEL 50. Vermeerdering van den golfloop.

| Plaats.                     | Diepte open<br>Zuiderzee. | Diepte afgesl.<br>Zuiderzee. | Golfopl. open<br>Zuiderzee. | Golfopl. afgesl.<br>Zuiderzee. | Vermeerdering<br>golfloop. | Opmerkingen.                              |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|
| Nes . . . . .               | 410                       | 414                          | 120                         | 120                            | 0                          | 0,5 × gemiddelde kromme.                  |
| Grie . . . . .              | 330                       | 342                          | 110                         | 110                            | 0                          | 0,5 × " "                                 |
| Terschelling-haven. . . . . | 890                       | 900                          | 165                         | 165                            | 0                          | 0,5 × " "                                 |
| Vlieland-haven . . . . .    | 587                       | 602                          | 140                         | 140                            | 0                          | 0,5 × " "                                 |
| Posthuis . . . . .          | 260                       | 290                          | 90                          | 100                            | 10                         | 0,5 × " "                                 |
| Volharding . . . . .        | 1275                      | 1305                         | 260                         | 260                            | 0                          | 0,7 × " "                                 |
| Eendragt . . . . .          | 265                       | 306                          | 140                         | 150                            | 10                         | 0,6 × omhullende "                        |
| Oostkaap . . . . .          | 495                       | 571                          | 130                         | 140                            | 10                         | 0,5 × gemiddelde "                        |
| Oude Schild . . . . .       | 404                       | 467                          | 140                         | 150                            | 10                         | 0,5 × omhullende "                        |
| Horntje . . . . .           | 2250                      | 2304                         | 230                         | 230                            | 0                          | 0,6 × gemiddelde "                        |
| Stuifdijk . . . . .         | 2245                      | 2295                         | 270                         | 270                            | 0                          | 0,7 × " "                                 |
| Kaaphoofd. . . . .          | 4250                      | 4291                         | 390                         | 390                            | 0                          | gemiddelde kromme.                        |
| Helder . . . . .            | 3248                      | 3290                         | 385                         | 385                            | 0                          | " "                                       |
| Wierhoofd. . . . .          | 2760                      | 2801                         | 385                         | 385                            | 0                          | " "                                       |
| Oostoever . . . . .         | 260                       | 306                          | 110                         | 125                            | 15                         | 0,5 × omhullende kromme.                  |
| de Kooi. . . . .            | 265                       | 316                          | 90                          | 105                            | 15                         | 0,5 × gemiddelde "                        |
| Balgdijk, midden . . . . .  | 260                       | 322                          | 135                         | 150                            | 15                         | 0,7 × " "                                 |
| van Ewijcksluis. . . . .    | 297                       | 373                          | 140                         | 160                            | 20                         | 0,7 × " "                                 |
| Quarantaine . . . . .       | 545                       | 620                          | 315                         | 330                            | 15                         | omhullende kromme.                        |
| Normerven . . . . .         | 300                       | 379                          | 245                         | 275                            | 30                         | " "                                       |
| Rinkewielsdijk . . . . .    | 250                       | 332                          | 180                         | 215                            | 35                         | gemiddelde kromme.                        |
| ○ Bierdijk. . . . .         | 345                       | 437                          | 240                         | 270                            | 30                         | tusschen gemiddelde en omhullende kromme. |
| den Oever. . . . .          | 435                       | 543                          | 290                         | 315                            | 25                         | omhullende kromme.                        |
| Piaam . . . . .             | 275                       | 399                          | 190                         | 240                            | 50                         | gemiddelde "                              |
| Makkum . . . . .            | 280                       | 393                          | 195                         | 235                            | 40                         | " "                                       |
| Kornwerd . . . . .          | 335                       | 434                          | 215                         | 245                            | 30                         | " "                                       |
| Zurig. . . . .              | 490                       | 579                          | 305                         | 320                            | 15                         | omhullende "                              |
| Harlingen . . . . .         | 793                       | 848                          | 320                         | 325                            | 5                          | gemiddelde "                              |
| Roptazijl . . . . .         | 625                       | 671                          | 290                         | 300                            | 10                         | " "                                       |
| Oosterbierum. . . . .       | 560                       | 581                          | 275                         | 280                            | 5                          | " "                                       |
| Nieuw Bildt . . . . .       | 541                       | 553                          | 270                         | 275                            | 5                          | " "                                       |
| Hallum . . . . .            | 395                       | 402                          | 240                         | 240                            | 0                          | " "                                       |
| Holwerd . . . . .           | 395                       | 399                          | 240                         | 240                            | 0                          | " "                                       |
| Wierum . . . . .            | 400                       | 402                          | 280                         | 280                            | 0                          | omhullende "                              |

maten in centimeters.

## IX. HET AMELANDSCHE WAD.

§ 165. *De invloed van de indijking op de stormstanden in het algemeen.*  
Een indijking van het Amelandsche Wad zal invloed hebben op de hoogste stormvloedstanden, zoowel ten oosten als ten westen van het Wad, wanneer bij den tegenwoordigen toestand bij storm over het Amelandsche Wad een stroom loopt, die na indijking zal vervallen. De invloed van den stroom op de stormvloedstanden zal dan verdwijnen, waardoor die standen zullen worden gewijzigd. De grootte dezer wijzigingen hangt af van de intensiteit van den stroom die thans over het Wad loopt.

Deze stroom wordt veroorzaakt door de gezamenlijke werking van een niveauverschil en van wind.

In den regel is het hoogwater bij storm aan de oostzijde van Ameland hooger dan aan de westzijde, en valt het eenigen tijd later. Gedurende het rijzen van het water is het niveauverschil Oost-West meestal niet groot, maar het neemt snel toe tegen den tijd waarop het hoogste water in het Terschellinger Wad voorkomt. Het maximum verschil wordt bereikt even na den hoogsten stand bij de Lauwerszee.

Het niveauverschil Oost-West is het grootst bij de stormvloeden die bij de Lauwerszee bijzonder hoog oploopen, terwijl bij die, welke achter Terschelling zeer hooge standen geven, meestal geen groot verval voorkomt; een hoogst enkele maal rijst het water bij het Nieuw Bildt dan zelfs hooger dan ten zuiden van Schiermonnikoog.

Voor den waterstand ten westen van Ameland zal worden gebruikt die van de peilschaal aan het Nieuw Bildt, terwijl voor dien aan de oostzijde wordt genomen de stand in de Zoutkamperlaag nabij de ton van den „Moker”, welke stand wordt geschat uit de waarnemingen in de Lauwerszee (Zoutkamp, Friesche sluis, Dokkumer Nieuwe Zijlen en Ezumazijl), op Schiermonnikoog en op Ameland (Nes).

Het grootste niveauverschil bij storm is waargenomen (tabel 4, blz. 68a) den 13den Maart 1906. In de Zoutkamperlaag was de hoogste stand zeer nabij 4 meter + N.A.P., te Nieuw Bildt werd een hoogste stand van 275 cm + N.A.P. genoteerd. Het grootste verschil bedroeg omstreeks 140 cm.

Het zoeven genoemde geval van een tegengesteld verval deed zich den 30sten Januari 1877 voor. Toen bereikte Nieuw Bildt den hoogsten stand van 391, dat is ongeveer 25 cm hooger dan het maximum in de Zoutkamperlaag bij dien storm.

De wind is bij alle stormvloeden tusschen West en NNW. Ruimt de wind nog meer, tot Noord of verder, dan gaat het water vallen. Dit is geen plaatselijk verschijnsel dat aan den invloed van de Zuiderzee is toe te schrijven: het is algemeen in dit deel van de Noordzee en kan b.v. ook op Helgoland worden waargenomen. De reden hiervan is dat dan de windverdeling over de Noordzee minder gunstig wordt voor wateropzet tegen de Nederlandsche en Duitse kust.

De hoofdrichting van de Friesche kust tegenover Ameland is ongeveer WZW—ONO.

Een noordnoordwestenwind zal dus geen stroom evenwijdig aan de kust doen ontstaan; hij veroorzaakt alleen afwaaiing bij Ameland en opwaaiing tegen de Friesche kust.

Terwijl een noordwestelijke, westnoordwestelijke of westelijke storm op zich zelf een stroom in de richting naar de Lauwerszee zou doen ont-

staan, wordt die stroom in het geval van 1877 door het verval versterkt, en in het andere boven onderscheiden geval, als het water in het Oosten het hoogst staat, door het verval verzwakt. In 1906 had zelfs het verval Oost-West zoodanige grootte dat het, zooals de hieronder volgende berekening zal leeren, de overhand had; er was een stroom naar het Westen.

De beide stormen van 1877 en 1906 kunnen, wat de waterbeweging in het Amelandsche Wad betreft, als uitersten worden beschouwd. De verhoogingen die daarvoor worden berekend zullen niet licht noemenswaard worden overschreden.

Uit het in dit verslag gezegde volgt dat ten oosten van een dijk die Ameland met den vasten wal verbindt, een verhooging zal ontstaan als de stroom in het open wad naar het Westen en een verlaging als die stroom naar het Oosten gericht is, en dat aan de westzijde van een dijk het tegengestelde te verwachten is. Daar het alleen op de verhoogingen aankomt wordt in § 166 (oostzijde van de afsluiting) met den storm van 1906 en in § 167 (westzijde) met dien van 1877 gerekend.

De berekening bestaat telkens uit twee deelen. Eerst wordt door toepassing van formules, overeenkomende met (50), (51) en (52) van § 90, uit wind en verval de stroom berekend, en vervolgens wordt daaruit, met behulp van beschouwingen, zooals in §§ 91, 94 en 95 werden gebezigd, de te verwachten verhooging afgeleid.

Er moge nog op worden gewezen, dat, zooals uit het in deze § gezegde blijkt, een naar het Westen loopende stroom in het Amelandsche Wad een zeldzaamheid is. Dit is bevestigd bij de in § 22 vermelde drijvingen, die in 1921 en 1926 bij een viertal stormen werden verricht. Bij deze stormen waren er toevallig twee, die van 23 October 1921 en die van 10 Maart 1926, waarbij de omstandigheden voor een westwaarts gaanden stroom gunstig waren. Bij den eersten was het niveauverschil Oost-West tamelijk groot en de wind stond tijdens het hoogwater vrijwel loodrecht op de kust. Toch is hierbij niets van een doorgaanden westelijken stroom gebleken. Vermoedelijk is, omdat het hoogwater in de Lauwerszee vrij wat later viel dan bij Nieuw Bildt, het niveauverschil eerst kort voor hoogwater ontstaan, zoodat er geen voldoende tijd beschikbaar was voor de ontwikkeling van den stroom. Bovendien waren de waterstanden lager dan in 1906 en was dus de weerstand grooter.

Ook bij den storm van 10 Maart 1926 is de wind zeer ver geruimd, maar zijn toch alle drijvers oostwaarts gegaan.

De Commissie meent dan ook dat slechts in een enkel geval, wanneer, zooals in Maart 1906, het niveauverschil groot is en lang te voren reeds bestaat (door vroeg hoogwater in de Zoutkamperlaag) en bovendien de wind vrij ver is geruimd, rekening met een westwaarts gaanden stroom achter Ameland behoeft te worden gehouden (zie ook § 95).

§ 166. *De stormvloedverhooging bij de Lauwerszee.* De waargenomen hoogwaterstanden in den nacht van 12/13 Maart 1906 zijn de volgende:

TABEL 51.

| Plaats van waarneming.       | Hoogwater<br>cm + N.A.P. | Tijdstip<br>12 Maart 1906 nm. |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Zoutkamp . . . . .           | 424                      | 10 u 55 min                   |
| Friesche sluis . . . . .     | 435                      | 11 u 0 min                    |
| Dokkumer Nieuwe Zijlen . . . | 426                      | 11 u 5 min                    |
| Ezumazijl . . . . .          | 415                      | 11 u 10 min                   |
| Schiermonnikoog . . . . .    | 445 <sup>1)</sup>        | 10 u 0 min                    |
| Nes (Ameland). . . . .       | 356                      | 10 u 45 min                   |
| Nieuw Bildt . . . . .        | 275                      | 11 u 0 min                    |

<sup>1)</sup> In afwijking van de stormvloedverslagen, waar voor hoogte van V.Z. 106 cm + N. A. P. is aangenomen (verg. § 16).

Bij de beoordeeling van den stand te Schiermonnikoog moet in het oog worden gehouden, dat de waarneming, die oorspronkelijk luidde „3½ m + Volzee”, 's nachts verricht is aan een gewone peilschaal. Het buitenbeloop van den dijk in de onmiddellijke nabijheid van de peilschaal werd zwaar beschadigd zoodat de golfslag aanzienlijk moet zijn geweest. Op de waarneming moet dus niet al te veel worden vertrouwd, en voor den vermoedelijken hoogsten stand in de Zoutkamperlaag is dan ook niet meer dan 410 à 415 cm + N. A. P. gesteld.

Het niveauverschil tusschen dit punt en Nieuw Bildt is dus omstreeks  $h = 140$  cm geweest.

Daar de hoogwaters vrijwel gelijktijdig voorkwamen behoeft dit niveauverschil niet te worden vergroot voor faseverschil.

Wat den wind betreft, deze was in den laten avond te Leeuwarden NNW met een druk van 20 kg per m<sup>2</sup>; te Groningen werd om 10 uur WNW en om 11 uur NW waargenomen, de druk was beide malen ongeveer 30 kg per m<sup>2</sup>.

De wind over het wad, die sterker kan zijn dan op het land (getuige de diagrammen van Vlieland en Rottumeroog) zal op omstreeks NW 30 kg per m<sup>2</sup> kunnen worden aangenomen.

Met deze gegevens moet nu worden getracht den stroom te schatten.

Bij den waterstand die bij hoogwater bestond, kan men voor de vier achter elkaar liggende vakken, waarin het gebied kan verdeeld worden, stellen (in cm):

TABEL 52.

| Vak.                                | $l$                | $F$              | $q$ |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|-----|
| Wierumerwad . . . . .               | $8 \times 10^5$    | $24 \times 10^7$ | 550 |
| Amelandsche Wad, oostdeel . . . . . | $10,5 \times 10^5$ | $34 \times 10^7$ | 500 |
| „ „ „ westdeel . . . . .            | $9 \times 10^5$    | $40 \times 10^7$ | 600 |
| Gebied v/d Krommen Balg . . . . .   | $10 \times 10^5$   | $48 \times 10^7$ | 500 |

Rekent men nu de windkracht  $K$  op 29 kg per m<sup>2</sup>, overeenkomende met een windsnelheid van 20 m per seconde, dan is (§ 62)  $\frac{F}{gq} = 16$ . Voor den hoek tusschen windrichting en de as van het gebied kan 60° worden aangenomen, en men vindt nu voor de in § 90 genoemde grootheden, als men voor  $P$  het westelijke en voor  $Q$  het oostelijke einde neemt,

$$h_w = \sum \frac{l}{gq} F_l = 55 \text{ cm}$$

(dit is de opwaaiing die de wind zou kunnen teweegbrengen) en

$$h = h_Q - h_P = 140 \text{ cm}$$

en hieruit

$$h_s = h_w - h = -85 \text{ cm}.$$

Het negatieve teeken van  $h_s$  wijst aan dat de stroom  $s$  naar het Westen gericht is, en de grootte  $Q$  van den stroom wordt nu blijkens (51) bepaald door

$$Q^2 = \frac{C^2 |h_s|}{\sum (l : b^2 q^3)} = \frac{C^2 |h_s|}{\sum (l : F^2 q)}.$$

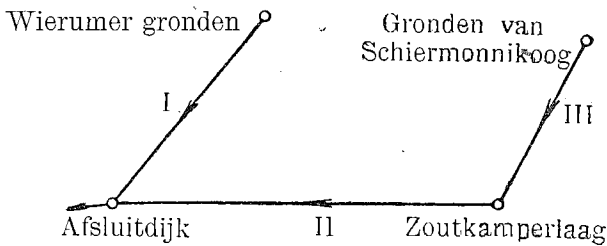
De uitkomst is (met  $C^2 = 250\,000 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ )  $Q = 18 \times 10^9 \text{ cm}^3/\text{sec} = 18\,000 \text{ m}^3$  per sec.

Was in 1906 de Zuiderzee al afgesloten geweest, dan zou de stand in Nieuw Bildt hoogstens 15 cm hooger (tabel 42, blz. 200a) zijn geweest, dus  $h_s = -85 + 15 = -70 \text{ cm}$ , waaruit volgt:

$$Q = 16\,500 \text{ m}^3 \text{ per seconde.}$$

De invloed van het Amelandsche zeegat, de Pinke- en Wierumergaten is hierbij verwaarloosd. Deze invloed is door de onbekendheid met de Noordzeestanden niet in rekening te brengen en is ook niet groot, daar deze gaten dicht bij de uiteinden van het gebied liggen. Inzonderheid het Amelandsche zeegat zal echter waarschijnlijk de  $Q$ 's doen afnemen; alles bijeengenomen zal men dus de gevonden waarden van  $Q$  als maxima mogen beschouwen.

Om nu uit den gevonden stroom de gezochte verhooging af te leiden, moet men het gebied beoosten den oostelijken afsluitdijk (Oerderduin op Ame-



Figuur 58.

land-Friesche kust tusschen Ternaard en Wierum) beschouwen. Men kan dit schematisch voorstellen door een drietal vakken (figuur 58); het gebied bij de oostzijde van den dijk staat nl.

door twee wegen, westelijk en oostelijk van de Engelsmanplaat, in gemeenschap met de Noordzee.

De hoofdmaten van de vakken zijn:

TABEL 53.

| Vak. | Lengte. | Breedte $\times$ diepte + breedte $\times$ diepte + breedte $\times$ diepte. |
|------|---------|--|
| I    | 8       | 0,4 $\times$ 13 + 0,8 $\times$ 9 + 3,3 $\times$ 3                            |
| II   | 8       | 6 $\times$ 5,5   |
| III  | 9       | 1 $\times$ 15 + 5 $\times$ 6   |

lengte en breedte in kilometers, diepte in meters.

De hoogteverschillen moeten nu bepaald worden door de voorwaarde dat de som der daaraan beantwoordende, naar de Noordzee gerichte, verhangstroomen de waarde  $Q$ , d.i. 18000 m<sup>3</sup> per seconde, heeft. Dit geeft voor het verval in I 10 cm, voor dat in II 7 cm, en voor III 3 cm.

Door de afsluiting van het Amelandsche Wad is dus een maximum verhooging van den stormvloed te wachten: aan den oostelijken dijk van 10 cm, in de Zoutkamperlaag en dus ook in de Lauwerszee van 3 cm.

Dat de verhooging zoo gering is vindt zijn oorzaak in de groote lengte en het nauwe profiel van het Amelandsche Wad eenerzijds en den korten ruimen weg door de zeegaten tusschen Ameland en Schiermonnikoog anderzijds.

Wanneer de Zuiderzee afgesloten was geweest zou de stroom, zooals reeds is vermeld, niet 18000 maar 16500 m<sup>3</sup> per sec bereikt hebben. Indien dus het Wad wordt ingedijkt nadat de Zuiderzee is afgesloten zullen beoosten de inpoldering slechts verhoogingen gelijk aan  $\left(\frac{16500}{18000}\right)^2$  van de bovengenoemde, of 8,4 en 2,5 cm verwacht behoeven te worden. De uitwerking van de indijking zal dus in elk geval klein zijn.

Is de invloed van de afsluiting bij hoogwater reeds onbeteekenend, daarvóór en daarna zal hij nog kleiner zijn. De stroom achter Ameland is dan van nog minder invloed: door de lagere waterstanden neemt het profiel van het Amelandsche Wad met zijn zeer geringe diepte dadelijk sterk af, veel meer dan dat van de zeegaten tusschen Ameland en Schiermonnikoog, waar de diepe geulen ook bij lagere standen een groot afvoerend vermogen behouden.

§ 167. *De verhooging in het Terschellinger Wad.* Een geheel analoge redeneering kan worden gevolgd bij de berekening van de verhooging die bij den storm van 30/31 Januari 1877 aan de westzijde van Ameland zou zijn voorgekomen.

In plaats van met de afmetingen van tabel 52 moet thans, daar de waterstanden anders waren dan in 1906, met de getallen van tabel 54 worden gerekend.

TABEL 54.

| Vak.                                | $l$                | $F$              | $q$ |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|-----|
| Wierumerwad . . . . .               | $8 \times 10^5$    | $20 \times 10^7$ | 500 |
| Amelandsche Wad, oostdeel . . . . . | $10,5 \times 10^5$ | $34 \times 10^7$ | 500 |
| „ „ , westdeel . . . . .            | $9 \times 10^5$    | $50 \times 10^7$ | 700 |
| Gebied v/d Krommen Balg . . . . .   | $10 \times 10^5$   | $60 \times 10^7$ | 600 |

De waterstanden aan weerszijden van het Amelandsche Wad waren:

TABEL 55.

| Plaats van waarneming.           | Hoogwater<br>cm + N.A.P. | Tijdstip<br>30 Jan. 1877 nm. |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Zoutkamp . . . . .               | 433                      | 11 u 0 min                   |
| Dokkumer Nieuwe Zijlen . . . . . | 416                      | 11 u 0 min                   |
| Ezumazijl . . . . .              | 383                      | 10 u 45 min                  |
| Nieuw Bildt . . . . .            | 391                      | 9 u 0 min                    |
| Harlingen . . . . .              | 288                      | 10 u 10 min                  |

Op de andere plaatsen ontbreken de waarnemingen. Men kan 375 + aannemen voor de Zoutkamperlaag, zoodat voor het niveauverschil Oost-West ongeveer zou volgen  $h = h_Q - h_P = -20$  cm. Veel waarde mag aan dit getal niet worden gehecht, daar de aflezing van de schalen, vooral bij het Nieuw Bildt, zeer bezwaarlijk moet zijn geweest. Met bijna evenveel recht kan men zeggen dat de waterstand aan het oostelijk einde van het Wad ongeveer even hoog was als aan het westelijk einde.

Van den wind zijn de gegevens uit de stormvloedverslagen niet voetstoots te aanvaarden. De aflezingen van de instrumenten kwamen in dien tijd niet altijd met de tegenwoordige opvattingen overeen (zie § 24). Wel is het zeker, dat het zeer hard heeft gewaaid (§ 26).

Volgens de thans aangenomen wijze van aflezen van den vroegeren winddrukmeter te Helder was op de kritieke uren de wind aldaar WNW met een gemiddelden druk van 90 kg per m<sup>2</sup>. Bij zeer hoogen winddruk neemt echter de opwaaiing slechts betrekkelijk weinig meer toe (§ 20), zoodat de constante van formule (23) (blz. 127) dan te hoog is.

Wanneer de gemiddelde diepte op 5,75 m wordt gesteld kan men voor de opwaaiing rekenen op een bedrag van 120 tot 140 cm. De waarde van  $h_s = h_w - h$  zal dus niet veel van 140 cm verschillen, waaruit voor den oostwaarts gerichten stroom volgt  $Q = 22\,500$  m<sup>3</sup> per sec. Bij afgesloten Zuiderzee moet men, evenals in § 166, met een 15 cm hooger stand bij het Nieuw Bildt rekening houden, waardoor  $h_s = 155$  cm en  $Q = 23\,700$  m<sup>3</sup> per sec wordt.

Thans moet worden berekend welke hoogteverschillen in het gebied bewesten de afsluiting tusschen deze en de Noordzeegaten noodig zouden zijn om een stroom van de sterkte  $Q$  van de afsluiting naar de Noordzee teweeg te brengen. Het gebied is nu het in figuur 37 (blz. 161) voorge-

stelde geulenstelsel met weglating van het noordoostelijke deel en men vindt voor de verhoogingen:

TABEL 56.

| Plaats van waarneming.        | Open Zuiderzee.<br>( $Q = 22500$ ) | Afgesloten Zuiderzee.<br>( $Q = 23700$ ) |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| Kromme Balg . . . . .         | 11,5 cm                            | 12,7 cm                                  |
| Griend . . . . .              | 2,6 "                              | 2,9 "                                    |
| Harlingen . . . . .           | 1,9 "                              | 2,1 "                                    |
| Afsluitdijk Zuiderzee . . . . | ongeveer 1 "                       | ongeveer 1 "                             |

Al is er dus wel een merkbare verhoging, zeer groot is zij niet.

§ 168. *Gevolgen van het verbinden van Terschelling met Friesland.* Wordt de westelijke dijk van de inpoldering niet naar Ameland maar naar Terschelling gericht, dan wordt de verbinding van het Amelandsche zeegat met de Waddenzee verbroken.

De stroom die in dit geval de verandering der stormvloedstanden bepaalt is die over het Terschellinger Wad. Met nauwkeurigheid is zijn sterkte niet te bepalen, daar de benoodigde peilschaalgegevens ontbreken. Aan de westzijde kan de waterstand worden afgeleid uit de waarnemingen van de registreerende peilschalen Harlingen, Roptazijl, Vlieland-haven en sinds 1920 ook Terschelling-haven, maar aan de oostzijde wordt alleen beschikt over de waarnemingen aan de gewone peilschalen van Nieuw Bildt en Nes op Ameland, die slechts een zeer gebrekkig inzicht verschaffen in de standen bij het Amelandsche zeegat. Alleen in de winters 1920/21 en 1921/22 is door de registreerende instrumenten Hollum en Nieuw Bildt een betere schatting mogelijk geweest. Er zijn toen geen zeer hoge stormvloedden voorgekomen.

Uit de diagrammen van die peilschalen te zamen met de aanwijzingen van de reeds vroeger opgestelde peilschalen kan worden afgeleid dat de hoogste standen aan de westzijde en aan de oostzijde van het Wad practisch gelijktijdig voorkomen en dat bij de stormen, die tijdens het hoogste water uit het WNW of NW waaien, de stand over het geheele gebied vrijwel even hoog is (afgezien van afwaaiing onder Terschelling en opwaaiing tegen de Friesche kust) of in het Oosten enkele decimeters hooger.

Bij wester-stormen, zooals in Januari 1916, is de waterstand aan de westzijde het laagst; in 1916 was het verschil ongeveer 35 cm.

In beide gevallen zal voor de windsnelheid 21 m per sec worden genomen.

Rekent men met een gemiddelde diepte van 4,5 m onder stormvloedpeil, met een lengte van 25 km, en neemt men voor elk der zoeven onderscheiden gevallen den hoek tusschen de windrichting en de as van het wad in aanmerking, dan is ongeveer, als men weer het punt  $P$  (§ 166) aan het westeinde en  $Q$  aan het oosteinde kiest, voor den westnoordwesterstorm  $h_w = 45$  cm en voor den wester-storm  $h_w = 80$  cm. Bij den eersten heeft men, zooals zoeven gezegd werd,  $h = h_Q - h_P = 0$  en bij den tweeden  $h = 35$ . Men kan dus voor beide gevallen  $h_s$  op 45 cm stellen.

De stroom, die naar het Oosten gericht is, kan nu worden geschat met de gewone formule, waarbij voor de lengte 25 km, voor het natte profiel 68000 m<sup>2</sup> en voor de diepte 4,5 meter wordt aangenomen. Men vindt dan 30000 m<sup>3</sup> per seconde.

Bij afgesloten Zuiderzee kan  $h_s$  tot 20 cm grooter worden, doordat de waterstanden aan de westzijde meer verhoogden dan aan de oostzijde. (Volgens tabel 42, gemiddelde van Oosterbierum en Roptazijl 30 cm; gemiddelde van Nieuw Bildt en Hollum 10 cm).

De stroom wordt dan 36000 m<sup>3</sup> per sec.

Evenals in § 167 kan de invloed van het wegvallen van dezen stroom op het geulennet van § 89 worden berekend en men vindt dan ongeveer:

TABEL 57.

| Plaats van waarneming.          | Open Zuiderzee.<br>( $Q = 30\,000$ ) | Afgesloten Zuiderzee.<br>( $Q = 36\,000$ ) |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|
| Kromme Balg . . . . .           | 40 cm                                | 60 cm                                      |
| Griend . . . . .                | 10 "                                 | 15 "                                       |
| Harlingen . . . . .             | 7 "                                  | 10 "                                       |
| Afsluitdijk Zuiderzee . . . . . | 3 "                                  | 4 "  |

Tengevolge van het aanleggen van een dijk van de Friesche kust naar de oostpunt van Terschelling is dus, vooral bij afgesloten Zuiderzee, in de Waddenzee een belangrijke verhooging van de waterstanden te verwachten. Juist bij het stormtype dat de hoogste standen veroorzaakt, dat van Januari 1877 (§ 112), is die verhooging zeer groot.

Dat de uitkomsten zooveel hooger zijn dan die van de vorige § staat in verband met het verbreken van de verbinding tusschen Waddenzee en Amelandsche zeegat.

Zooals reeds werd opgemerkt, gelden de berekeningen van de laatste drie paragrafen alleen voor stationaire toestanden. Aan de uitkomsten, die zijn te vergelijken met de getallen van de eerste kolom van tabel 42, zouden alle correcties dus nog moeten worden aangebracht, zoodat zij nog een aanmerkelijke wijziging kunnen ondergaan.

Ook in andere opzichten echter is de berekening zoo globaal dat het aanbrengen van de correcties geen zin heeft en men zal de uitkomsten zoodanig moeten opvatten, dat zij alleen de orde van grootte van de verhooging aangeven.

§ 169. *De veranderingen van het dagelijksche getij.* Ten slotte is nagegaan of bij indijking van het Amelandsche Wad kans bestaat op het uitschuren van een doorgaande geul achter Terschelling tusschen de zeegaten van het Vlie en van Ameland. Daarvoor is een berekening van het hoofdgetij opgezet voor een gebied dat zich uitstrekt van de binnenzijde van het Vlie (Caranan) en Harlingen eenerzijds tot de Zoutkamperlaag anderzijds en dat met de Noordzee in verbinding staat door de zeegaten westelijk en oostelijk van Ameland. Aangenomen wordt dat de verticale getijbeweging op de genoemde plaatsen door de afsluiting van het Amelandsche Wad niet verandert.

Eerst is de berekening opgezet voor den tegenwoordigen toestand, uitgaande van de bekende getijden van Harlingen, Caranan, Hollum, op het Pinkewad en in de Zoutkamperlaag.

Men ziet daarbij de wantijen achter Terschelling, Ameland en de Engelsmanplaat duidelijk optreden.

Ook worden als resultaat van deze berekening gevonden de Noordzee-getijden bij het Bornrif en bij de Wierumergronden, die overeenkomen met wat daar mag worden verwacht.

Na afsluiting van het Amelandsche Wad valt het gebied in twee stukken uiteen; voor elk kan het getij worden berekend: in het westelijke uitgaande van het verticale getij van Harlingen, Caranan en Bornrif, in het oostelijke van Wierumergronden en Zoutkamperlaag.

Volgens de uitkomst van deze berekeningen blijven de wantijen bestaan: de gevonden versterking van den stroom bij het Terschellinger wantij van 1400 tot 1600 m<sup>s</sup> per sec zal zeker geen geulvorming ten gevolge hebben.

Voor het westelijke deel is de berekening nog eenmaal uitgevoerd voor den toestand die na de afsluiting der Zuiderzee wordt verkregen. De hoofd-

getijden van Harlingen en Caranan worden daarbij overeenkomstig de uitkomsten der in § 45 vermelde berekeningen (bijlage 8) gewijzigd.

Ook nu wordt het wantij achter Terschelling weer gevonden, de stroom neemt wel weer iets toe, namelijk tot 1900 m<sup>3</sup> per sec, maar dit staat voornamelijk in verband met de grootere getijrijzing en daarmee gepaard gaande sterkere waterbeweging in het algemeen.

Voor de vorming van een doorgaande geul is geen gevaar en het richten van den westelijken polderdijk van een eventueelen Amelandschen Wadpolder naar Terschelling in plaats van naar Ameland is uit dien hoofde dan ook niet noodzakelijk.

De in § 168 gevonden grootere stormvloedverhoogingen maken die dijkrichting minder gewenscht.

## LITERATUUR.

In onderstaande literatuurlijst zijn in de eerste plaats vermeld de werken naar welke in het verslag is verwezen. Daarbij is gevoegd een aantal geschriften die in den loop van het onderzoek zijn geraadpleegd.

De lijst is verdeeld in een vijftal rubrieken, die intusschen niet scherp van elkander zijn gescheiden; in verschillende van de genoemde werken worden onderwerpen van meer dan één rubriek behandeld.

Uit den aard der zaak wordt geen aanspraak gemaakt op volledigheid. Van de publicaties die over de afsluiting en droogmaking der Zuiderzee handelen is een zeer uitgebreide lijst opgenomen in n<sup>o</sup>. 1 van de „Rapporten en mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken” (’s Gravenhage, Algemeene Landsdrukkerij 1923).

### A. STORMVLOEDEN IN DE ZUIDERZEE.

1. C. LELY. De afsluiting Noordholland—Wieringen—Friesland en de droogmaking van het gedeelte der Zuiderzee binnen die afsluiting. Nota n<sup>o</sup>. 2 van het onderzoek omtrent de afsluiting en droogmaking van de Zuiderzee, de Wadden en de Lauwerszee.  
Uitgegeven door de Zuiderzeevereeniging, Leiden, Brill, 1887.
2. Verslag van de Staatscommissie, benoemd bij Koninklijk Besluit van 8 September 1892, n<sup>o</sup>. 21, tot het instellen van een onderzoek omtrent een afsluiting en een droogmaking van de Zuiderzee.  
’s Gravenhage, Belinfante, 1894.
3. De watervloed van 13/14 Januari 1916.  
Uitgegeven door de Zuiderzeevereeniging, Leiden, Brill, 1916.
4. Weerlegging van bezwaren.  
Uitgegeven door de Zuiderzeevereeniging, Leiden, Brill, 1917.
5. D. R. MANSHOLT. Het wetsontwerp op de afsluiting en indijking der Zuiderzee, eenige kritische beschouwingen.  
Groningen, Werkman, 1916.
6. L. H. MANSHOLT. De afsluiting der Zuiderzee, een ernstig gevaar voor Friesland en Groningen.  
Groningen, Noordhoff, 1916.
7. P. H. GALLÉ. Stormvloeden langs de Noordzee- en Zuiderzeekusten.  
Uitgegeven door de Zuiderzeevereeniging, Leiden, Brill, 1917.
8. J. KOOPER. Nota (aan Gedeputeerde Staten van Groningen) betreffende den te verwachten invloed van de afsluiting der Zuiderzee op de waterstanden langs de Friesche en Groninger kusten (1917).  
Door de Zuiderzeevereeniging uitgegeven te zamen met n<sup>o</sup>. 9.
9. C. W. LELY. Verhooging van de stormvloedstanden op de Friesche kust, tengevolge van de afsluiting der Zuiderzee.  
Uitgegeven door de Zuiderzeevereeniging, Leiden, Brill, 1918.
10. Handelingen van de Tweede Kamer der Staten-Generaal, zitting 1917—1918 blz. 1793—1803, 1878—1898, 1958—1977, 2059—2077 en 2139—2147.
11. C. W. LELY. De invloed van de Zuiderzee op de stormvloedstanden langs de Friesche kust (proefschrift).  
’s Gravenhage, van Langenhuysen, 1921.

## B. STORMVLOEDEN IN HET ALGEMEEN; INVLOED VAN DEN WIND.

12. Verslagen over de stormvloed van 30/31 Januari 1877, 14/15 October 1881, 12/13 December 1883, 9 Februari 1889, 22/23 December 1894, 12/13 Maart 1906, 30 September/1 October 1911 en 13/14 Januari 1916.  
Uitgegeven door het Departement van Waterstaat.
13. Verslagen aan de(n) Koning(in) over de openbare werken.  
(sedert 1853).
14. Verslag van de Staatscommissie, benoemd bij Koninklijk Besluit van 20. Maart 1916 n°. 23 met opdracht een onderzoek in te stellen omtrent de oorzaken van de buitengewoon hooge waterstanden tijdens den stormvloed van 13/14 Januari 1916 voorgekomen op de in Zuidholland gelegen benedenrivieren, meer bepaaldelijk op den Rotterdamschen Waterweg.  
's Gravenhage, van Langenhuisen, 1920.
15. D. A. VAN HEIJST. Aanteekeningen omtrent de gevolgen van zware stormvloed tusschen 1500 en 1825 voorgekomen, voor de dijken en polders langs het zuidwestelijk deel der Zuiderzee.  
Rapporten en Mededeelingen van den Rijkswaterstaat n°. 6, 1916.
16. P. H. GALLÉ. De storm van 13/14 Januari 1916.  
Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, tweede serie, deel XXXIII, afl. 3 a, 1916.
17. P. H. GALLÉ. De stormvloed van 3, 4 en 5 Februari 1825.  
Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, tweede reeks, deel XXXV, afl. 6, 1918.
18. J. P. VAN DER STOK. Das Klima des SO Teiles der Nordsee unweit der niederländischen Küste.  
Mededeelingen en verhandelingen van het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut n°. 13, a, b en c, 1912.
19. F. L. ORTT. De invloed van wind en luchtdruk op de getijden.  
Verhandelingen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1896—1897.
20. F. L. ORTT. De invloed van wind en luchtdruk op den zeestand te Helder.  
Verhandelingen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1897—1898.
21. A. SCHUMACHER und H. THORADE. Die Gezeiten der Sylter Gewässer nach den Beobachtungen im August 1921.  
Aus dem Archiv der deutschen Seewarte. XLI Jahrgang n°. 2, 1923.
22. LEVERKINCK. Ueber den Einfluss des Windes auf die Gezeiten.  
Veröffentlichungen des Observatoriums in Wilhelmshaven, 1915.

## C. GETIJBEWEGING IN DE ZUIDERZEE.

23. C. LELY. Resultaten der terreinwerkzaamheden verricht in 1889 en 1890. Nota n°. 6 van het onderzoek omtrent de afsluiting en droogmaking van de Zuiderzee, de Wadden en de Lauwerszee.  
Uitgegeven door de Zuiderzeevereeniging, Leiden, Brill.
24. H. E. DE BRUIJN. Mededeeling in de vergadering van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs op 11 September 1894 bij de discussie over de voordracht van den heer A. HUET over de meest voordeelige landaanwinning in de Zuiderzee.  
Notulen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs 1894—1895 blz. 27 e. v.
25. H. E. DE BRUIJN. Invloed van de afsluiting van de Zuiderzee op de vloedhoogte buiten den afsluitdijk.  
De Ingenieur, 26<sup>e</sup> jaargang n°. 1, 1911.
26. J. J. DE VRIES. De getijbeweging in de Zuiderzee en de afsluiting en drooglegging van de Zuiderzee.  
Marineblad, 33<sup>e</sup> jaargang n°. 2, 1918.
27. J. J. DE VRIES. Hydrografische beschouwingen over de afsluiting der Zuiderzee.  
Marineblad, 36<sup>e</sup> jaargang n°. 2, 1921.

## D. GETIJBEWEGING IN HET ALGEMEEN.

28. Jaarboeken der waterhoogten.  
Uitgegeven door het Ministerie van Waterstaat sinds 1854.
29. Tienjarig Overzicht der waterhoogten.  
Samengesteld door den Algemeenen Dienst van den Rijkswaterstaat, begonnen met 1851—1860.
30. LAPLACE. *Traité de mécanique céleste*, Livre XIII.  
*Oeuvres de Laplace V*, Paris, Imprimerie Royale, 1846.
31. J. W. LUBBOCK. On the tides (in the port of London).  
*Philosophical transactions of the Royal Society of London*, Vol. 121—127  
1831—1837.
32. H. LENTZ. Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel.  
Hamburg, Meissner, 1879.
33. C. BÖRGEN. Darlegung der Berechnungsweise für die Angaben der „Gezeitentafeln“.  
*Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, XXXV Jahrgang,  
Heft IX, 1907.
34. F. L. ORT. Getijvoorspelling.  
*De Ingenieur*, 12<sup>e</sup> jaargang n<sup>o</sup>. 21, 1897.
35. Getijtafels voor Nederland.  
Bewerkt bij den Algemeenen Dienst van den Waterstaat, uitgegeven door  
het Departement van Waterstaat, sinds 1895.
36. W. THOMSON (LORD KELVIN). *Popular lectures and addresses*, Vol. III,  
Appendix D.  
London, Macmillan, 1891.
37. C. BÖRGEN. Die harmonische Analyse der Gezeitenbeobachtungen.  
Berlin, Mittler, 1885.
38. J. P. VAN DER STOK. Studiën over de getijden in den Indischen Archipel,  
I en II.  
*Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, afdeling Nederlandsch-  
Indië*, 1890—1891 en 1891—1892.
39. H. G. VAN DE SANDE BAKHUYZEN. De getijden te Helder, IJmuiden en  
Hoek van Holland.  
*Verslagen der afdeling Wis- en Natuurkunde van de Koninklijke Akademie van  
Wetenschappen*, deel III, 1894—1895.
40. PH. HATT. Des marées.  
Paris, GAUTHIER—VILLARS, omstreeks 1895.
41. M. LÉVY. *Leçons sur la théorie des marées*.  
Paris, GAUTHIER—VILLARS, 1898.
42. J. P. VAN DER STOK. *Etudes des phénomènes de marée sur les côtes  
néerlandaises I—IV*.  
*Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut n<sup>o</sup>. 90*, 1904, 1905, 1905  
en 1910.
43. G. H. DARWIN. *Scientific Papers. Volume I. Oceanic tides and lunar  
disturbance of gravity*.  
Cambridge, University press, 1907.
44. J. P. VAN DER STOK. *Elementaire theorie der getijden*.  
*Mededeelingen en verhandelingen van het Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch  
Instituut*, 1910.
45. G. H. DARWIN. *The tides and kindred phenomena in the solar system*.  
London, Murray, 1911.
46. M. H. VAN BERESTEIJN. *Getijconstanten voor plaatsen langs de kusten  
en benedenrivieren in Nederland, berekend uit waterstanden van het  
jaar 1906*.  
*Verhandelingen der Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam  
(Eerste sectie)*, deel XI n<sup>o</sup>. 2, 1911.

47. M. H. VAN BERESTEIJN. Getijkrommen van plaatsen aan de Nederlandsche kust en benedenrivieren.  
Uitgegeven door den Algemeenen Dienst van den Waterstaat, 1911.
48. J. L. H. LUIJMES. Overzicht der getijleer ten dienste der hydrographische opneming.  
Uitgegeven voor rekening van het Ministerie van Marine, 1919.
49. R. A. HARRIS. Manual of tides. Part III.  
Appendix n<sup>o</sup>. 7 to the report of the superintendent of the U. S. Coast and Geodetic Survey, 1893–1894.
50. Tafelen benooidigd bij het hydrographisch opnemen.  
Uitgegeven door het Departement van Marine, 1913.
51. J. M. PHAFF. Bijdrage tot de kennis der getijden in de Noordzee. Noord-Hinder.  
Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch Instituut, omstreeks 1900.
52. J. M. PHAFF. Etude sur les courants de la mer du Nord. Noord-Hinder.  
Institut Météorologique Royal Néerlandais, omstreeks 1900.
53. D. F. TOLLENAAR. De getijbeweging in Straat Soerabaja verklaard uit de theorie der lange golven.  
De Ingenieur, 20<sup>e</sup> jaargang, n<sup>o</sup>. 22, 1905.
54. D. F. TOLLENAAR. De rapporten betreffende Straat Soerabaja.  
De Ingenieur, 21<sup>e</sup> jaargang n<sup>o</sup>. 46, 22<sup>e</sup> jaargang n<sup>os</sup>. 1, 12 en 27, 1906–1907.

## E. DIVERSEN.

55. H. LAMB. Hydrodynamics.  
Cambridge, University press, 1924.
56. RIEMANN—WEBER. Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik.  
Braunschweig, Vieweg, 1900.
57. H. DARCY et H. BAZIN. Recherches hydrauliques.  
Paris, Dunod, 1865.
58. V. W. EKMAN. On the influence of the earth's rotation on ocean-currents.  
Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik Band 2 n<sup>o</sup>. 11, 1905–1906.
59. V. W. EKMAN. Dynamische Gesetze der Meeresströmungen.  
Vorträge der Hydro- und Aerodynamik (Innsbruck 1922).  
Berlin, Springer, 1924.
60. H. A. LORENTZ. Het in rekening brengen van den weerstand bij schommelende vloeistofbewegingen.  
De Ingenieur, 37<sup>e</sup> jaargang n<sup>o</sup>. 36, 1922.
61. JAHNKE U. EMDE. Funktionentafeln mit Formeln und Kurven.  
Leipzig und Berlin, Teubner, 1909.
62. K. HAYASHI. Fünfstellige Tafeln der Kreis- und Hyperbelfunktionen sowie der Funktionen  $e^x$  und  $e^{-x}$  mit den natürlichen Zahlen als Argument.  
Berlin und Leipzig, Ver. wiss. Verleger, 1921.
63. W. LIGOWSKI. Tafeln der Hyperbelfunktionen und der Kreisfunktionen.  
Berlin, Ernst und Korn, 1890.
64. W. VERWEY AZ. Waterstaatkundige beschrijving van Nederland (2<sup>e</sup> deel Afd. XIII van Waterbouwkunde door N. H. HENKET, CH. M. SCHOLS en J. M. TELDERS).  
's Gravenhage, van Cleef, 1890.
65. G. HAGEN. Ueber Wellen auf Gewässern von gleichmässiger Tiefe.  
Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1861.
66. H. RAUSCHELBACH. Ueber eine elektrische Pegelfernübertragung.  
Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie, 1924.
67. J. J. DE VRIES. Verplaatsbare zelfregistreerende peilschaal.  
Marineblad, 32<sup>e</sup> jaargang n<sup>o</sup>. 4, 1917–1918.

68. J. J. DE VRIES. Verplaatsbare zelfregistreerende peilschaal.  
De Ingenieur, 33<sup>e</sup> jaargang n<sup>o</sup>. 18, 1918.
69. J. J. DE VRIES. Getijwaarnemingen voor het hydrografisch opnemen ten behoeve van de werken voor de afsluiting van de Zuiderzee.  
Marineblad, 39<sup>e</sup> jaargang n<sup>o</sup>. 3, 1924.
70. V. W. EKMAN. Kurze Beschreibung eines Propellstrommessers.  
Publications de circonstance du Conseil permanent international pour l'exploration de la mer, n<sup>o</sup>. 23, 1905.
71. J. P. JACOBSEN. Der Libellenstrommesser, ein Apparat zur Messung von Strömungen im Meere.  
Publications de circonstance du Conseil permanent international pour l'exploration de la mer, n<sup>o</sup>. 51, 1909.
72. H. F. BEYERMAN en W. DE MAN. De overbrenging van het Amsterdamsch Peil naar Texel en Vlieland.  
Verhandelingen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1878-1879.
73. W. SCHERMERHORN. Bestimmung der Höhenlage der Insel Terschelling.  
Zeitschrift für Vermessungswesen 1926, Heft 14.
74. F. R. HELMERT. Bestimmung der Höhenlage der Insel Wangeroog durch trigonometrische Messungen im Jahre 1888.  
Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1907.
75. F. A. VENING MEINESZ. Observations de pendule dans les Pays Bas.  
Uitgegeven door de Rijksc commissie voor Graadmeting en waterpassing, Delft, 1923.
76. J. VAN DER VEGT. Memorie nopens den vroegeren en tegenwoordigen toestand van Vlieland, van den Vliehors, van het Eijerlandsche gat en van de zeegaten der Zuiderzee in het algemeen.  
Verslag over de Openbare Werken in 1865.
77. J. LORIÉ. De overstromingen in Januari en Februari 1916 geologisch bekeken.  
Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, tweede serie, deel XXXIV, n<sup>o</sup>. 3, 1917.
78. P. C. VAN KERCKHOFF. Voordracht in de vergadering van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs op 9 Juni 1887 over de vorming van de zeegaten tusschen de Noordzee-eilanden in verband met de droogmaking van de Zuiderzee.  
Notulen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1886-1887.
79. C. P. VIJVERBERG. Eenige beschouwingen in verband met de Zuiderzee-plannen.  
's Gravenhage, Belinfante, 1916.
80. D. MERENS. De afsluiting en droogmaking van de Zuiderzee en de landsverdediging.  
Den Haag, Couvée, 1918.
81. A. T. VAN VEEN. Geschiedenis van en eenige beschouwingen over het Marsdiep c. a. (zeegat van Texel).  
Helder, de Boer, 1909.

## REGISTREERENDE PEILSCHALEN MET ELECTRISCHE OVERBRENGING (§ 6).

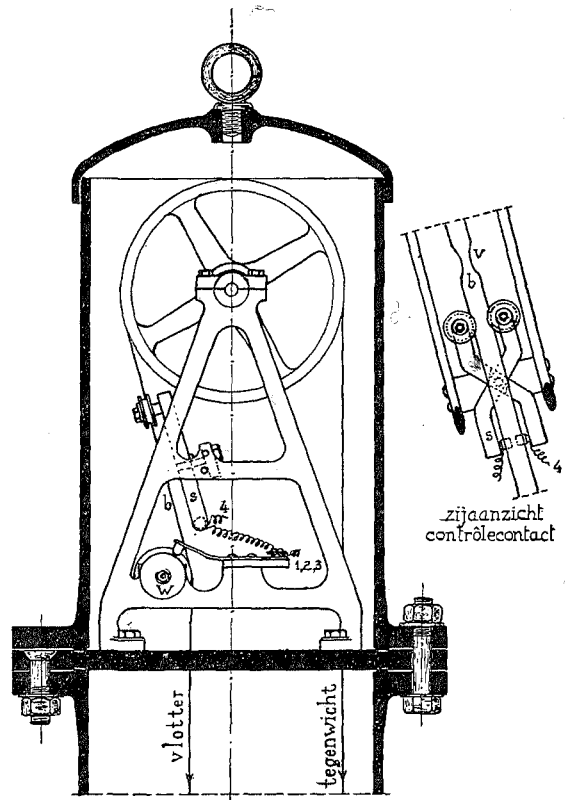
### A. DE GEBRUIKTE INSTRUMENTEN VAN HET TRAPJESTYPE.

De seingever, die in zee is geplaatst, wordt, zooals in figuur 59 schetsmatig is aangegeven, aangebracht boven de verticale buis, waarbinnen de vlotter met den waterspiegel

op en neer gaat. De band *b*, waaraan de vlotter hangt laat een contactwalsje *w* draaien; de inrichting is zoodanig, dat telkens wanneer de waterstand 2 cm is veranderd een ander contact wordt gemaakt.

Het schema (figuur 60) bevat een uitslag van het contactwalsje *w*. Men ziet dat de drie aders van den kabel 1, 2 en 3 afwisselend met de (zwaarder getrokken) retourleiding in contact worden gebracht. In het op den wal geplaatste registreerapparaat worden daardoor drie magneten *I*, *II*, *III* om de beurt bekrachtigd. Het gevolg is dat het anker *a* gaat draaien. Wanneer een rijzing van den waterspiegel een wenteling van de contactwals *w* in de pijlrichting veroorzaakt, geschiedt het draaien van het anker eveneens volgens den daarbij

SEINGEVER VAN HET TRAPJESTYPE (1 : 8).



Figuur 59.

geteekenden pijl en de heugelstang met de schrijfstift *s* gaat naar boven.

Men ziet gemakkelijk in dat bij een tegengestelde beweging van het contactwalsje *w* de schrijfpennen in dalende richting over het op de registreertrommel gespannen papier gaat.

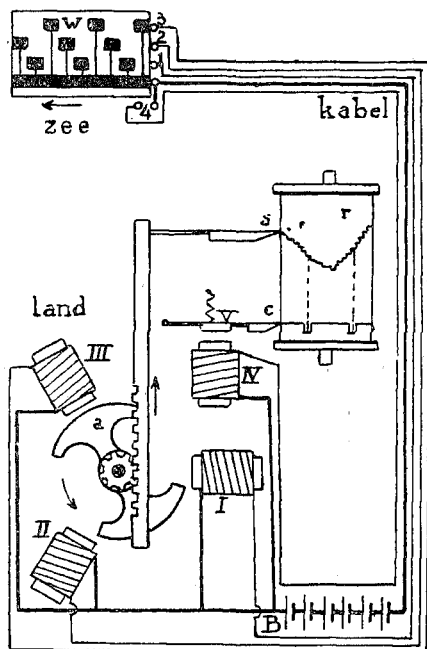
De stroom wordt geleverd door een bij het registreertoestel opgestelde accumulatorenbatterij *B*, die een spanning van omstreeks 12 Volt heeft. De stroomsterkte is ruim een Ampère, zoodat de batterij uit groote cellen moet bestaan en toch veelvuldig moet worden verwisseld.

Zoolang de waterstand geleidelijk verandert geschiedt de beweging zonder storingen. Bij sterke golfbeweging kan het echter voorkomen dat een contact slechts zóó korten tijd gesloten blijft, dat het ankertje nog geen tijd heeft gehad om zich in den nieuwen stand te stellen. Dit opent de mogelijkheid tot ontregeling van het aanwijzemechanisme.

Wanneer bijvoorbeeld in den geteekenden stand het water plotseling 6 cm rijst, worden snel achtereen de contacten 3-1-2-3 gesloten. Is nu de rechtsche pool van het anker niet snel genoeg tegenover magneet *I* gekomen dan zal door de dadelijk volgende bekrachtiging van magneet *II*

niet de linksche, maar de rechtsche pool van *a* worden aangetrokken, zoodat, wanneer contact 3 wordt gemaakt, het anker en dus ook de schrijfpen, weer in den oorspronkelijken stand komt, in plaats van een draaiing van 180° te hebben ondergaan. Er is dus een fout van 6 cm (3 trapjes) gemaakt en gedurende de verdere registratie blijft het instrument 6 cm te laag aanwijzen.

#### SCHEMA TRAPJESTYPE.



Figuur 60.

Bij het uitwerken van het diagram moet blijken dat de lijn van den waterstand op elke ordinaat waarin het controlemerk voorkomt de daarmee overeenkomende hoogte heeft. Is dit niet het geval, dan heeft het instrument „overgeslagen”. Door de controlemerken wordt de fout gelocaliseerd en men doet goed het zoodanig in te richten dat het contact 4 wordt gesloten bij een veelvuldig voorkomenden waterstand, b.v. N. A. P. Ook bestaat er geen bezwaar tegen twee versmallingen in den band *b* te maken, waardoor het controlemerk bij twee waterstanden wordt gemaakt. Eén daarvan, b.v. 150 of 200 cm + N. A. P., kan voor stormvloed dienen.

Het is duidelijk dat de vlotterband vóór en na de wieltjes van *s* goed moet worden geleid; de inrichting daarvoor is in de schets (figuur 59) niet aangegeven.

Dat de op deze wijze ingerichte getijmeters niet hebben voldaan (§ 6) werd hierdoor veroorzaakt dat het „overslaan” bij storm soms zoo veelvuldig gebeurde, dat het niet mogelijk was met eenige zekerheid uit het diagram de waterstanden af te lezen die in het tijdsinterval tusschen twee controlemerken waren voorgekomen.

#### B. DE EERSTE INSTRUMENTEN VAN HET WEERSTANDSTYPE.

Evenals bij de zoo juist beschreven toestellen is er naar gestreefd de constructie in zee zoo eenvoudig mogelijk te houden en de kans op storing door inwerking van zeewater zoo klein mogelijk te maken. De contacten zijn daartoe in een oliebak *b* aangebracht (figuur 61).

De verticale beweging van den vlotter wordt door middel van het vlotterwiel *s* en een conische tandwieloverbrenging omgezet in een draaiing van het asje *a*. Aan dat asje is bevestigd een arm *h* met een contactveer *c*, die strijkt langs een aantal in een cirkel opgestelde contactpennetjes *p* (zie het schema, figuur 62). Deze pennetjes verdeelen een electrischen weerstand *w*

<sup>1)</sup> In den winter van 1918 op 1919 zijn met een onder het wandelhoofd te Scheveningen opgestelde buis met gaatjes proeven genomen om te zien hoever men kon gaan met het dempen van den *golfslag* zonder de andere bewegingen van den *waterspiegel* te onderdrukken.

in een aantal gelijke stukken. Van den weerstand  $w$  behoort het deel  $w_1$  tusschen het eerste pennetje bij  $A$  en de door den vlotter bewogen veer  $c$  tot één stroomkring, het overige deel  $w - w_1$  tot een andere keten.

In elken kring is in den „ontvanger” aan den wal behalve een voorschakelweerstand  $W$  een galvanometerspoeltje geschakeld. De verhouding van de stroomen door de spoeltjes  $I$  en  $II$  is blijkbaar die van de weerstanden in de ketens, nl.  $(w_1 + W) : (w - w_1 + W)$  en wel zoodanig, dat door het spoeltje dat deel uitmaakt van de keten met den minsten weerstand (in dit geval die met  $w_1$ ) de sterkste stroom gaat.

Deze spoeltjes maken deel uit van een BRUGER'S-ohmmeter <sup>1)</sup>. Zij zijn daarin draaibaar geplaatst tusschen de polen van een permanenten magneet en werken elkander tegen in hun streven om zooveel mogelijk krachtlijnen te snijden. Het blijkt dat de stand van de spoeltjes en dus ook van de registreernaald uitsluitend wordt beheerscht door de *verhouding* der stroomen dus door de waarde van  $(w_1 + W) : (w - w_1 + W)$ . Daar  $W$  en  $w$  onveranderlijk zijn wordt deze waarde bepaald door de grootte van  $w_1$ , dus door den stand van het contact  $c$ , die afhankelijk is van den waterstand.

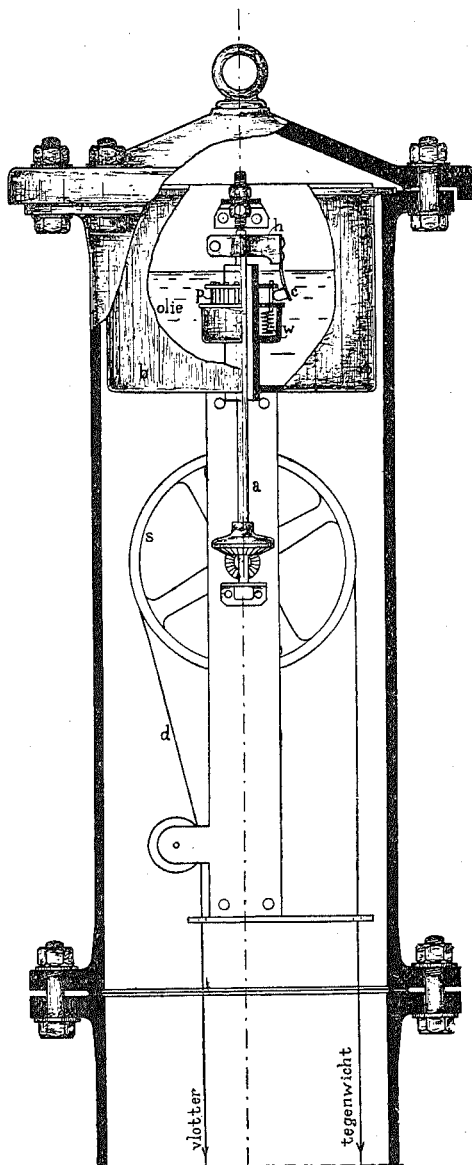
Als het beweegbare contact  $c$  bij  $A$  is, staat aan land de registreernaald boven. Gaat  $c$  door dalen van het water den kring contactpenne rond, dan gaat de wijzer naar beneden en als  $c$  op het contact  $E$  staat geschiedt de registratie geheel onder aan het diagram. Valt het water nog verder, dan komt  $c$  weer op contact  $A$  en de wijzer springt terug in den hoogsten stand, waarna het omlaag gaan weer begint.

Bij de uitgevoerde instrumenten gaat de hefboom  $h$  met contact  $c$  bij een hoogteverandering van 150 cm van den waterstand eenmaal rond; er zijn 75 pennetjes  $p$ , zoodat het interval 2 cm is. De weerstand  $w$  is 1800  $\Omega$ , de voorschakelweerstand  $W$  zijn ieder ruim 5000  $\Omega$ . De batterij  $B$  geeft ook hier 12 Volt spanning, de stroomsterkten zijn dus zeer gering (eenige milliampères).

Ontregelen kan bij deze toestellen niet voorkomen: bij elken vlotter stand behoort een bepaalde stand van de registreerstift. Komt de stift door de een of andere storing (b.v. aanraken met de hand, losmaken van een contact e. d.) in een anderen stand, dan zal zij, wanneer die storing wordt opgeheven, weer naar de met den waterstand overeenkomende plaats teruggaan.

De functie van het contrôlecontact bij het trapjestype wordt hier vervuld door het overspringen bij den overgang van contact  $E$  op contact  $A$  en omgekeerd.

#### SEINGEVER VAN HET WEER- STANDSTYPE (1 : 8).



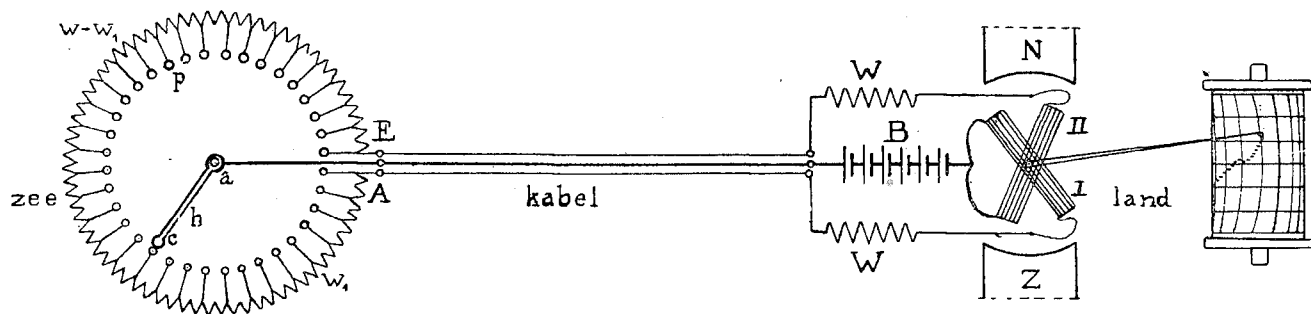
Figuur 61.

<sup>1)</sup> In den handel gebracht door HARTMANN und BRAUN A. G. te Frankfurt a/M.

De aanwijzing is volkomen onafhankelijk van de spanning van de batterij: als men die laat varieren b.v. van 6 tot 15 Volt blijft de registreernaald onbeweeglijk staan.

Kleine registratiefouten worden veroorzaakt door temperatuurwisselingen. Zij uitzen zich hierin dat de met de contacten *A* en *E* overeenkomende merken niet meer precies aan de randen van het diagram liggen maar een weinig verschoven zijn en zij kunnen worden opgeheven door de grootte van de voorschakelweerstand *W* een weinig te veranderen.

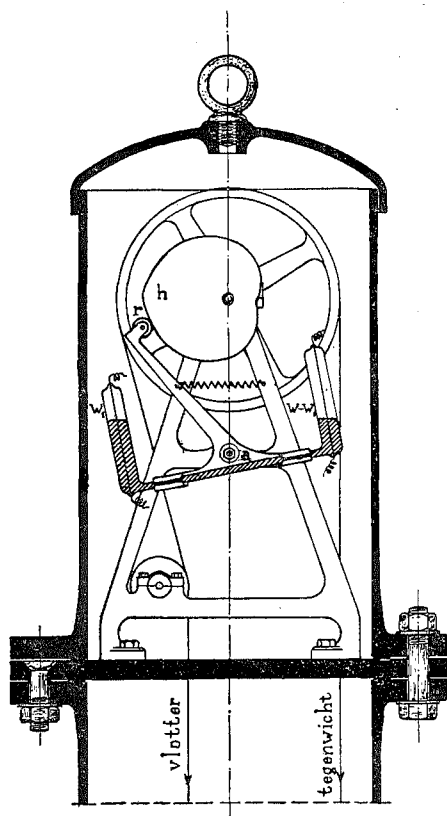
SCHEMA WEERSTANDSTYPE MET OHMMETER.



Figuur 62.

Gewoonlijk is het voldoende dit afregelen tweemaal per jaar te doen, nl. in de lente en tegen den winter.

De voornaamste oorzaak van storingen ligt in het feit dat de kracht die beschikbaar is voor het verstellen van de registreernaald zoo klein is. Daarom is ook een bijzondere wijze van registreeren toegepast, nl. door de naald in den regel geheel vrij te houden SEINGEVER MET KWIKBUIS (1 : 8). en met geregelde tusschenpoozen door een slagraam op een dicht boven het registreerpapier gespannen inktlint te drukken.



Figuur 63.

den nulstand. Wordt aan (190) niet voldaan dan komt het relais in werking: wanneer *C* te laag staat licht het de rem van een (niet geteekende) veer,

Er bestaat een aanwijsapparaat <sup>1)</sup> dat eveneens volkomen ongevoelig is voor verandering in spanning van de batterij en waarbij een grooter kracht beschikbaar is voor het verstellen van de schrijfpen. Dit vormt met de weerstanden  $w_1$  en  $w - w_1$  van den seingever een brug van WHEATSTONE. Het is niet in combinatie met de zoo juist beschreven seingever gebruikt, maar wel met de straks te noemen kwikbuis-SCHOUTE. De schakeling is aangegeven in figuur 64. De schrijfpen *s* is daarbij bevestigd aan een beweegbaar contact *C* dat langs een weerstand *W* kan glijden.

Wanneer de stand van *C* zoodanig is dat

$$W_1 : (W - W_1) = w_1 : (w - w_1) \quad (190)$$

gaat door den brugdraad *c* geen stroom en de daarin geplaatste als relais ingerichte galvanometer *g* bevindt zich in

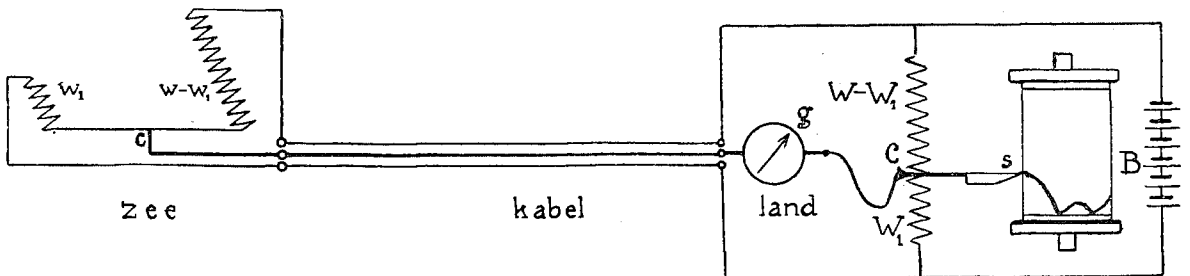
<sup>1)</sup> Fabrikant Cambridge Instrument Cy., London and Cambridge.

die het wagentje waaraan  $C$  bevestigd is omhoog trekt. Staat  $C$  te hoog, dan slaat  $g$  naar den anderen kant uit en geeft aan een tweede veer de gelegenheid om  $C$  omlaag te halen.

### C. DE KWIKBUIS VAN DR. SCHOUTE.

Evenals bij de eerstvermelde seingeverers van het weerstandstype zijn hier in zee twee weerstanden waarvan de som constant is. Deze weer-

#### SCHEMA KWIKBUIS MET BRUG VAN WHEATSTONE.



Figuur 64.

standen worden gevormd door in een U-vormige buis ingesmolten platina-draden. De buis, die gedeeltelijk met kwik is gevuld (figuur 63), wordt om een horizontale as  $a$  gedraaid door middel van een op de as van het vlotterwiel bevestigde hartvormige schijf  $h$ . Daardoor reiken de platinadraden meer of minder ver in het kwik, zoodat de door den stroom te doorloopen lengte, en dus de weerstand, veranderlijk is.

Wanneer de punt van  $h$ , waar de voerstraal het grootst is, bij het rolletje  $r$  staat, bevindt zich de kwikbuis in den meest naar links hellenden stand, de weerstand  $w_1$  wordt zoo klein en  $w-w_1$  zoo groot mogelijk. De schrijfpenn staat dan in den laagsten stand (figuur 64). Bij het draaien van  $h$ , b.v. bij rijzend water, gaat de kwikbuis geleidelijk naar rechts, totdat, wanneer de insnijding met den kleinsten voerstraal bij  $r$  komt, het andere uiterste is bereikt en de pen  $s$  boven aan het diagram staat.

Stijgt het water nog verder dan gaat de kwikbuis en dus ook  $s$  weer terug, er ontstaan op het diagram dus omkeerpunten, die weer als contrôle dienen. Het diagram voorbij de omkeerpunten is als het ware omgeklapt.

De registratie wordt gestoord wanneer de opstelling in zee uit het lood geraakt, zooals bij de Noordzeepeilschalen herhaaldelijk voorkwam.

Het diagram verschuift dan op het registreerpapier naar boven of naar beneden; de grootte van de fout is uit de ligging der omkeerpunten af te leiden. Dit bezwaar kan worden opgeheven door twee kwikbuizen te gebruiken, die tegen elkander in draaien.

De kwikbuis is te Callantssoog gebruikt met een registreerenden Ampèremeter als schrijfinrichting aan den wal. Men moet er dan voor zorgen de spanningveranderingen van de batterij onschadelijk te maken.

Voor alle peilschalen langs de kusten en voor de belangrijkste waarnemingspunten in zee zijn in onderstaande tabel verzameld de gegevens die den vorm van de getijlijn in hoofdzaak bepalen. In de eerste plaats heeft men de niet-harmonische grootheden, waarvan de belangrijkste zijn: H.W. = gemiddeld hoogwater en L.W. = gemiddeld laagwater (in cm t. o. v. N.A.P.) en het hoogteverschil er van  $V$  = het gemiddeld tijverschil (in cm). De middenstand,  $A_0$  (in cm t. o. v. N.A.P.) is alleen aangegeven voor de plaatsen waar de peilschaal is gewaterpast. De grootheid  $A_0 - H$ , de hoogte (in centimeters) waarop de middenstand (§ 16) boven halftij (gemiddelde van hoog- en laagwater) ligt, bepaalt de asymmetrie van de getijlijn. Te IJmuiden is zij negatief: het hoogwater is daar spitsier dan het laagwater. In de nabijheid van Petten en Callantsoog vallen middenstand en halftij vrijwel samen; in het overige deel van het gebied is het laagwater spitsier dan het hoogwater en  $A_0 - H$  in verband daarmee positief.

Voor de stations die niet zijn gewaterpast kan  $A_0$  door interpolatie, aan de hand van figuur 2, worden gevonden (§ 16). H.W. ligt dan  $-(A_0 - H) + \frac{1}{2} V$  hooger en L.W. valt  $+(A_0 - H) + \frac{1}{2} V$  lager. Voorbeeld: Koog  $A_0 = -15$ , dus H.W. =  $-15 - 11 + \frac{1}{2} \times 156 = 52$  cm + N.A.P. en L.W. =  $-15 - (11 + \frac{1}{2} \times 156) = 104$  cm - N.A.P.

Van de harmonische constanten zijn die van één enkel, één dubbel, één viermaal- en één zesmaaldaagsch getij in de tabel opgenomen. Men kan hieruit globaal de andere getijconstanten schatten door aan te nemen dat de verhoudingen der amplituden en de phaseverschillen van de enkeldaagsche getijden onderling in het geheele gebied ongeveer gelijk zijn en een zelfde

onderstelling voor de dubbel-, viermaal- en zesmaaldaagsche getijden te maken. Voor IJmuiden, Helder en Harlingen worden alle bekende constanten gegeven in „Getijconstanten” van VAN BERESTEIJN (literatuuropgave n°. 46).

Van de onderstreepte plaatsen zijn de normale waarden gegeven (§ 11), voor de kolommen 3—7 zijn dit de gemiddelden over de jaren 1901—1920, voor de bepaling van de harmonische constanten zijn tijdvakken van minstens een jaar, zoo mogelijk langer (tot 20 jaar toe) gebruikt.

Van de plaatsen met stippellijnen waren voor enkele grootheden de normale waarden rechtstreeks uit de waarnemingen af te leiden, de andere zijn uit korte waarnemingsreeksen herleid (§ 11).

Op de overige plaatsen zijn alleen zulke korte waarnemingsreeksen beschikbaar; alle gegevens zijn gevonden door ze tot de normale waarden te herleiden.

*Tengevolge van deze herleidingen kan men aannemen dat de geheele tabel geldt voor het gemiddelde over de jaren 1901—1920; hierop moet vooral bij het gebruik van de waarden van H.W., L.W. en  $A_0$  worden gelet.*

De wijze van waarnemen is aangegeven in kolom 16. Daarin beteekent:  $r$  = registreerende peilschaal, normaal type;  $e$  = idem met elektrische overbrenging;  $p$  = gewone peilschaal;  $s$  = slaggaard;  $v$  = vloeipeilschaal;  $d$  = dieptemeter;  $l$  = loodingen.

De duur der gebruikte waarnemingsreeksen is aangegeven in kolom 17 (u = uur, d = dag, j = jaar).

De in kolom 2 vermelde geografische lengte is oosterlengte van Amsterdam.

| Nº. | PLAATS.               | Geografische |           | H.W. | L.W. | V.  | $A_0$ . | $A_0 - H$ | $K_1$ |          | $M_2$ |          | $M_4$ |          | $M_6$ |          | instr. | tijdvak. |
|-----|-----------------------|--------------|-----------|------|------|-----|---------|-----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|--------|----------|
|     |                       | breedte.     | lengte.   |      |      |     |         |           | ampl. | $\kappa$ | ampl. | $\kappa$ | ampl. | $\kappa$ | ampl. | $\kappa$ |        |          |
|     |                       | 1            | 2         |      |      |     |         |           | 8     | 9        | 10    | 11       | 12    | 13       | 14    | 15       |        |          |
|     | <b>I. Noordzee.</b>   |              |           |      |      |     |         |           |       |          |       |          |       |          |       |          |        |          |
| 1   | IJmuiden. . . . .     | 52.27.38     | — 0.19.20 | 74   | — 87 | 161 | — 15    | — 8       | 8     | 352°     | 68    | 115°     | 18    | 155°     | 4     | 252°     | $r$    | 1—20 j   |
| 2   | Petten. . . . .       | 52.46. 5     | — 0.13.45 |      |      | 150 |         | 0         |       |          | 65    | 141°     | 14    | 175°     | 6     | 270°     | $r$    | 2—4 d    |
| 3   | Callantsoog . . . . . | 52.50.17     | — 0.11.47 |      |      | 158 |         | — 3       |       |          | 68    | 147°     | 15    | 180°     | 9     | 275°     | $e$    | 1—4 d    |
| 4   | Haaks . . . . .       | 52.57.52     | — 0.34.38 |      |      |     |         |           |       |          | 70    | 180°     | 4     | 253°     |       |          | $l$    | 5 j      |
| 5   | Koog . . . . .        | 53. 5.55     | — 0. 8.19 |      |      | 156 |         | 11        | 6     | 340°     | 72    | 177°     | 9     | 220°     | 10    | 305°     | $e$    | 14 d     |
| 6   | Vlieland, hoofd 10    | 53.16.26     | + 0. 4.46 |      |      | 178 |         | 6         |       |          | 80    | 190°     | 7     | 260°     | 5     | 310°     | $v$    | 2×12 u   |

| N <sup>o</sup> .                  | PLAATS.                        | Geografische |           | H.W. | L.W.  | V.  | A <sub>0</sub> . | A <sub>0</sub> -H | K <sub>1</sub> |      | M <sub>2</sub> |      | M <sub>4</sub> |      | M <sub>6</sub> |      | instr. | tijdvak.       |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------|------|-------|-----|------------------|-------------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--------|----------------|
|                                   |                                | breedte.     | lengte.   |      |       |     |                  |                   | ampl.          | κ    | ampl.          | κ    | ampl.          | κ    | ampl.          | κ    |        |                |
|                                   |                                |              |           |      |       |     |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      |        |                |
| <b>I. Noordzee.</b>               |                                |              |           |      |       |     |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      |        |                |
| 1                                 | IJmuiden. . . . .              | 52.27.38     | - 0.19.20 | 74   | - 87  | 161 | - 15.            | - 8               | 8              | 352° | 68             | 115° | 18             | 155° | 4              | 252° | r      | 1-20 j         |
| 2                                 | Petten. . . . .                | 52.46. 5     | - 0.13.45 |      |       | 150 |                  | 0                 |                |      | 65             | 141° | 14             | 175° | 6              | 270° | r      | 2-4 d          |
| 3                                 | Callantsoog . . . . .          | 52.50.17     | - 0.11.47 |      |       | 158 |                  | - 3               |                |      | 68             | 147° | 15             | 180° | 9              | 275° | e      | 1-4 d          |
| 4                                 | Haaks . . . . .                | 52.57.52     | - 0.34.38 |      |       |     |                  |                   |                |      | 70             | 180° | 4              | 253° |                |      | l      | 5 j            |
| 5                                 | Koog . . . . .                 | 53. 5.55     | - 0. 8.19 |      |       | 156 |                  | 11                | 6              | 340° | 72             | 177° | 9              | 220° | 10             | 305° | e      | 14 d           |
| 6                                 | Vlieland, hoofd 10 . . . . .   | 53.16.26     | + 0. 4.46 |      |       | 178 |                  | 6                 |                |      | 80             | 190° | 7              | 260° | 5              | 310° | v      | 2×12 u         |
| 7                                 | Terschellingerbank . . . . .   | 53.27. 0     | - 0. 1.27 |      |       |     |                  |                   |                |      | 86             | 213° | 9              | 308° |                |      | l      | 5 j            |
| 8                                 | Terschelling, pl. XI . . . . . | 53.24.28     | + 0.24.48 |      |       | 190 |                  | 7                 |                |      | 83             | 212° | 7              | 295° | 5              | 320° | v      | 2×12 u         |
| <b>II. Texelstroom e. o.</b>      |                                |              |           |      |       |     |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      |        |                |
| 9                                 | Helder. . . . .                | 52.57.53     | - 0. 8.14 | 37   | - 82  | 119 | - 13             | 10                | 6              | 359° | 53             | 168° | 11             | 190° | 6              | 293° | r      | 1-20 j         |
| 10                                | Koopvaarderssluis . . . . .    | 52.57. 0     | - 0. 5.49 | 34   | - 82  | 115 | - 14             | 9                 |                |      | 51             | 178° | 6              | 215° | 6              | 320° | p      | 12 u           |
| 11                                | Vangdam (einde) . . . . .      | 52.57. 0     | - 0. 3.25 | 34   | - 56  | 90  | - 6              | 5                 |                |      | 41             | 192° | 3              | 270° | 4              | 5°   | p      | 12 u           |
| 12                                | Oude Schild . . . . .          | 53. 2.22     | - 0. 1.57 | 34   | - 66  | 100 | - 10             | 6                 |                |      | 43             | 190° | 8              | 205° | 5              | 310° | p      | 20 j<br>1-29 d |
| 13                                | Slenk . . . . .                | 53. 6. 6     | + 0. 4.11 |      |       | 88  |                  | 6                 |                |      | 36             | 204° | 6              | 230° | 4              | 350° | d      | 29 d           |
| 14                                | Riepel . . . . .               | 53. 3.52     | + 0. 9.23 |      |       | 87  |                  | 7                 |                |      | 37             | 216° | 7              | 240° | 5              | 355° | d      | ½-8 d          |
| 15                                | Binnenbreesem. . . . .         | 53. 6.44     | + 0.10.24 |      |       | 88  |                  | 6                 |                |      | 39             | 231° | 5              | 283° | 3              | 75°  | d      | 12 u           |
| 16                                | Balgzand . . . . .             | 52.58.38     | + 0. 2.32 |      |       | 99  |                  | 6                 |                |      | 42             | 195° | 6              | 225° | 3              | 340° | d      | 14 d           |
| 17                                | Lutjeswaard W. . . . .         | 53. 0. 0     | + 0. 3.51 |      |       | 94  |                  | 9                 |                |      | 41             | 197° | 7              | 230° | 6              | 340° | d      | 8 d            |
| 18                                | Breehorn . . . . .             | 52.58. 0     | + 0. 3.27 |      |       | 98  |                  | 11                |                |      | 42             | 202° | 9              | 250° | 4              | 340° | s      | 12 u           |
| 19                                | Lutjeswaard Z. . . . .         | 52.58.46     | + 0. 6.45 |      |       | 75  |                  | 6                 |                |      | 34             | 205° | 6              | 240° | 4              | 345° | d      | 14 d           |
| 20                                | Westerland . . . . .           | 52.53.42     | + 0. 1.29 | 24   | - 51  | 75  | - 7              | 6                 |                |      | 33             | 227° | 5              | 280° | 2              | 30°  | r      | ½-29 d         |
| 21                                | den Oever . . . . .            | 52.56.19     | + 0. 8.52 | 27   | - 58  | 85  | - 8              | 7                 |                |      | 37             | 223° | 6              | 260° | 3              | 15°  | r      | ½-29 d         |
| 22                                | Nesserzand . . . . .           | 53. 0.25     | + 0.10.10 |      |       | 84  |                  |                   |                |      | 36             | 228° |                |      |                |      | d      | enkele d       |
| 23                                | Vlieter Z. . . . .             | 52.57.40     | + 0.11.40 |      |       | 81  |                  | 5                 |                |      | 33             | 235° | 4              | 280° | 2              | 0°   | d      | 14 d           |
| 24                                | van Ewijcksluis . . . . .      | 52.52.51     | - 0. 0. 5 | 24   | - 47  | 71  | - 7              | 4                 |                |      | 31             | 234° | 5              | 305° | 2              | 60°  | p      | 12 u           |
| 25                                | Oostpunt . . . . .             | 52.52.14     | + 0. 1.29 | 25   | - 46  | 71  | - 7              | 4                 |                |      | 32             | 235° | 5              | 280° | 2              | 50°  | p      | 12 u           |
| 26                                | Sloot . . . . .                | 52.50.31     | + 0. 5.35 |      |       | 51  |                  | 3                 |                |      | 25             | 246° | 3              | 305° | 1              | 170° | d      | 14 d           |
| 27                                | Kolhorn . . . . .              | 52.47.48     | + 0. 1.36 |      |       | 65  |                  | 0                 |                |      | 28             | 246° | 2              | 330° | 2              | 135° | p      | 12 u           |
| <b>III. Eierlandsche gat e.o.</b> |                                |              |           |      |       |     |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      |        |                |
| 28                                | Vliehors ZW . . . . .          | 53.12.21     | + 0. 0.41 | 56   | - 81  | 138 |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      | p      | 4 d            |
| 29                                | Vogelzwin . . . . .            | 53.10.17     | 0. 0. 0   |      |       | 141 |                  | 6                 |                |      | 60             | 213° | 7              | 305° | 3              | 335° | d      | 12 u           |
| 30                                | Foksdiep W. . . . .            | 53. 9.14     | + 0. 6.14 |      |       | 132 |                  | 5                 |                |      | 55             | 231° | 4              | 345° | 3              | 30°  | s      | 12 u           |
| 31                                | Foksdiep O . . . . .           | 53. 7.40     | + 0.10. 0 |      |       | 102 |                  | 7                 |                |      | 43             | 237° | 5              | 340° | 4              | 330° | s      | 12 u           |
| 32                                | Vianensveldje . . . . .        | 53.15.44     | + 0. 5.30 | 71   | - 48  | 119 |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      |        |                |
| <b>IV. Vlie e. o.</b>             |                                |              |           |      |       |     |                  |                   |                |      |                |      |                |      |                |      |        |                |
| 33                                | Vlieland, hoofd 62. . . . .    | 53.18.24     | + 0.12.41 | 68   | - 106 | 174 | - 14             | 5                 |                |      | 75             | 213° | 5              | 270° | 6              | 350° | p      | 12 u           |
| 34                                | Noordvaarder . . . . .         | 53.21.23     | + 0.15.12 | 63   | - 103 | 166 | - 13             | 7                 |                |      | 71             | 211° | 8              | 260° | 5              | 350° | p      | 12 u           |
| 35                                | Vlieland, haven . . . . .      | 53.17.46     | + 0.12.27 | 58   | - 93  | 151 | - 12             | 5                 | 5              | 8°   | 69             | 236° | 3              | 297° | 4              | 28°  | r      | 1-20 j         |

| N <sup>o</sup> . | PLAATS.   | Geografische |           | H. W. | L. W. | V                    | A <sub>0</sub> | A <sub>0</sub> -H | K <sub>1</sub> |     | M <sub>2</sub> |      | M <sub>4</sub> |      | M <sub>6</sub> |      | instr. | tijdvak.  |
|------------------|---|--------------|-----------|-------|-------|----------------------|----------------|-------------------|----------------|-----|----------------|------|----------------|------|----------------|------|--------|-----------|
|                  |   | breedte.     | lengte.   |       |       |                      |                |                   | ampl.          | α   | ampl.          | α    | ampl.          | α    | ampl.          | α    |        |           |
|                  |   | 1            | 2         |       |       |                      |                |                   | 8              | 9   | 10             | 11   | 12             | 13   | 14             | 15   |        |           |
| 36               | West-Terschelling .                                 | 53.21.40     | + 0.20. 3 | 63    | - 102 | 165                  | - 11           | 8                 | 6              | 4°  | 71             | 230° | 7              | 265° | 4              | 15°  | r      | 1 d - 1 j |
| 37               | Caranan . . . . .                                   | 53.18.40     | + 0.16.10 |       |       | 171                  |                | 6                 |                |     | 72             | 220° | 6              | 255° | 4              | 350° | s      | 2 × 12 u  |
| 38               | Uitlegger . . . . .                                 | 53.17.19     | + 0.16.13 |       |       | 163                  |                | 7                 |                |     | 69             | 221° | 7              | 255° | 5              | 350° | d      | 12 u      |
| 39               | Langezand . . . . .                                 | 53.15.31     | + 0.16.35 |       |       | 142                  |                | 6                 |                |     | 63             | 227° | 5              | 270° | 3              | 15°  | d      | 12 u      |
| 40               | Oude Vlie . . . . .                                 | 53. 9. 7     | + 0.17.44 |       |       | 121                  |                | 4                 |                |     | 56             | 252° | 3              | 0°   | 3              | 120° | d      | 14 d      |
| 41               | Blauwe Slenk . . . .                                | 53.14.11     | + 0.18.26 |       |       | 144                  |                | 5                 |                |     | 66             | 235° | 5              | 290° | 3              | 50°  | s      | 12 u      |
| 42               | Hendr. Tjaarsplaat .                                | 53.13.24     | + 0.20. 2 |       |       | 138                  |                | 4                 |                |     | 62             | 246° | 4              | 285° | 2              | 95°  | d      | 14 d      |
| 43               | Pollendam . . . . .                                 | 53.11.31     | + 0.27.17 |       |       | 121                  |                | 3                 |                |     | 54             | 258° | 4              | 45°  | 4              | 170° | s      | 12 u      |
| 44               | Harlingen . . . . .                                 | 53.10.12     | + 0.31.54 | 56    | - 71  | 127                  | - 5            | 3                 | 5              | 27° | 57             | 260° | 4              | 55°  | 3              | 170° | r      | 1 - 20 j  |
| 45               | Roptazijl . . . . .                                 | 53.12.36     | + 0.33.12 | 62    | - 72  | 134                  | - 4            | 1                 | 5              | 27° | 61             | 262° | 5              | 70°  | 4              | 168° | r      | 1 - 20 j  |
| 46               | Westmeep . . . . .                                  | 53.17.39     | + 0.23.19 |       |       | 149                  |                | 9                 |                |     | 67             | 240° | 3              | 305° | 4              | 35°  | s      | 12 u      |
| 47               | Oostmeep . . . . .                                  | 53.17.25     | + 0.32.34 |       |       | 144                  |                | 4                 |                |     | 63             | 259° | 3              | 4°   | 3              | 160° | d      | 12 u      |
| 48               | Abt. . . . .  | 53.17.48     | + 0.37.46 |       |       | 150                  |                | - 1               |                |     | 67             | 269° | 5              | 85°  | 1              | 115° | s      | 12 u      |
| 49               | Nieuw Bildt . . . .                                 | 53.18. 5     | + 0.42. 8 | 69    | - 79  | 148                  | - 7            | - 2               |                |     | 66             | 280° | 10             | 125° | 1              | 220° | e      | 2 × 12 u  |
|                  | <b>V. Friesehe en Gro-<br/>ningsche Wadden enz.</b> |              |           |       |       |                      |                |                   |                |     |                |      |                |      |                |      |        |           |
| 50               | Borndiep . . . . .                                  | 53.26.40     | + 0.41.50 |       |       | 187                  |                | 6                 |                |     | 86             | 241° | 2              | 290° | 7              | 60°  | s      | 12 u      |
| 51               | Hollum . . . . .                                    | 53.25. 0     | + 0.46.38 |       |       |                      |                |                   |                |     | 85             | 261° | 8              | 315° | 4              | 100° | e      | 28 d      |
| 52               | Holwerd . . . . .                                   | 53.22.45     | + 1. 0.22 |       |       | 197                  |                | 15                |                |     | 89             | 275° | 9              | 50°  | 6              | 125° | d      | 14 d      |
| 53               | Schiermonnikoog . .                                 | 53.27.32     | + 1.17.33 |       |       | 193                  |                | 6                 |                |     | 97             | 262° | 5              | 0°   | 1              | 35°  | e      | 1 d       |
| 54               | Oostmahorn . . . . .                                | 53.22.46     | + 1.16.45 |       |       | 203                  |                | 15                |                |     | 101            | 273° | 13             | 10°  | 2              | 135° | d      | 14 d      |
| 55               | Zoutkamp . . . . .                                  | 53.20.16     | + 1.24.46 | 96    | - 126 | 222                  | - 1            | 14                | 6              | 27° | 99             | 289° | 13             | 36°  | 4              | 156° | r      | 1 - 20 j  |
| 56               | Noordpolderzijl <sup>1)</sup> . .                   | 53.26. 0     | + 1.41.55 | 102   |       | (geknepen laagwater) |                |                   |                |     | 110            | 292° | 12             | 50°  | 5              | 170° | r      | 2 × 12 u  |
| 57               | Delfzijl . . . . .                                  | 53.19.43     | + 2. 2.42 | 110   | - 162 | 272                  | - 8            | 18                | 7              | 32° | 125            | 317° | 15             | 115° | 6              | 303° | r      | 1 - 20 j  |
| 58               | N. Statenzijl <sup>2)</sup> . . .                   |              |           | 128   |       | (geknepen laagwater) |                |                   |                |     | 118            | 350° | 12             | 188° | 5              | 50°  | r      | 1 - 20 j  |
|                  | <b>VI. Overgangsgebied.</b>                         |              |           |       |       |                      |                |                   |                |     |                |      |                |      |                |      |        |           |
| 59               | Scheurrak . . . . .                                 | 53. 5.32     | + 0.19. 4 |       |       | 100                  |                | 7                 |                |     | 47             | 226° | 4              | 245° | 3              | 71°  | s      | 12 u      |
| 60               | Robbenzand . . . . .                                | 53. 3.11     | + 0.14.26 |       |       | 84                   |                | 5                 |                |     | 37             | 221° | 5              | 260° | 3              | 335° | d      | 14 d      |
| 61               | Doove Balg 15 . . . .                               | 53. 2.42     | + 0.19. 4 |       |       | 76                   |                | 4                 |                |     | 34             | 241° | 2              | 285° | 1              | 100° | s      | 12 u      |
| 62               | Doove Balg 18 . . . .                               | 53. 3.29     | + 0.22.12 |       |       | 87                   |                | 3                 |                |     | 39             | 250° | 2              | 10°  | 2              | 110° | d      | 12 u      |

|                                   |                                   |          |           |    |      |     |      |   |   |                                    |      |      |      |      |      |      |           |        |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|----|------|-----|------|---|---|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|--------|
| 63                                | Zuidostrak . . . . .              | 53. 6. 8 | + 0.23.32 |    |      | 102 |      | 4 |   | 48                                 | 252° | 2    | 0°   | 2    | 155° | d    | 14 d      |        |
| 64                                | Zurig . . . . .                   | 53. 6.35 | + 0.29.48 | 47 | — 63 | 110 | — 5  | 3 |   | 49                                 | 253° | 3    | 35°  | 3    | 150° | d    | 14 d      |        |
| 65                                | Makkumerwaard . . .               | 53. 3.23 | + 0.28.10 |    |      | 83  |      | 2 |   | 37                                 | 251° | 3    | 355° | 2    | 125° | d    | 14 d      |        |
| 66                                | Makkum . . . . .                  | 53. 3.11 | + 0.31. 5 | 38 | — 45 | 83  | — 2  | 2 |   | 41                                 | 271° | 4    | 70°  | 3    | 215° | r    | 14 d—4 j  |        |
| 67                                | Breezand N. . . . .               | 53. 1.59 | + 0.18.36 |    |      | 74  |      | 4 |   | 33                                 | 246° | 2    | 280° | 1    | 80°  | d    | 14 d      |        |
| 68                                | Ipendam . . . . .                 | 52.57. 2 | + 0.12.31 |    |      |     |      |   |   | 24                                 | 237° |      |      |      |      | s    | 12 u      |        |
| 69                                | Breezand M. . . . .               | 52.59.15 | + 0.19.43 |    |      | 74  |      | 3 |   | 32                                 | 249° | 2    | 280° | 2    | 100° | d    | 12 u      |        |
| 70                                | Piaam . . . . .                   | 53. 2. 0 | + 0.29. 0 | 31 | — 40 | 71  | — 3  | 2 |   | 32                                 | 248° | 1    | 315° | 1    | 110° | d    | 14 d      |        |
| 71                                | Hindeloopen . . . . .             | 52.56.42 | + 0.31. 0 | 30 | — 27 | 57  | 3    | 2 | 3 | 36°                                | 26   | 244° | 2    | 345° | 2    | 138° | r         | 1—20 j |
| 72                                | Stavoren . . . . .                | 52.53.16 | + 0.28.27 | 21 | — 25 | 47  | 0    | 2 | 2 | 45°                                | 21   | 242° | 2    | 335° | 2    | 140° | r         | 1—20 j |
| 73                                | Kreil . . . . .                   | 52.50.33 | + 0.22.37 |    |      | 47  |      | 0 |   | 21                                 | 252° | 1    | 0°   | 1    | 150° | d    | 24 u      |        |
| 74                                | Kreupel . . . . .                 | 52.48.44 | + 0.18.41 |    |      | 49  |      | 2 |   | 21                                 | 260° | 3    | 330° | 1    | 170° | d    | 24 u      |        |
| 75                                | Medembik . . . . .                | 52.46.20 | + 0.13.35 | 26 | — 34 | 60  | — 2  | 2 |   | 26                                 | 253° | 3    | 340° | 3    | 155° | r    | div. per. |        |
| <b>VII. Kom van de Zuiderzee.</b> |                                   |          |           |    |      |     |      |   |   |                                    |      |      |      |      |      |      |           |        |
| 76                                | Enkhuizen . . . . .               | 52.42. 0 | + 0.24.35 | 10 | — 21 | 31  | — 4  | 2 | 2 | 91°                                | 12   | 292° | 1    | 11°  | 1    | 204° | r         | 1—20 j |
| 77                                | Lemmer . . . . .                  | 52.50.35 | + 0.49.40 | 12 | — 8  | 20  | 4    | 2 | 2 | 111°                               | 4    | 337° | 1    | 95°  | 0    | 249° | r         | 1—20 j |
| 78                                | Kraggenburg . . . . .             | 52.39.13 | + 1. 3.27 | 15 | — 9  | 25  | 4    | 1 | 2 | 110°                               | 6    | 2°   | 1    | 117° | 1    | 353° | r         | 1—20 j |
| 79                                | Schokland . . . . .               | 52.37.15 | + 0.53.30 | 18 | — 3  | 21  | 8    | 1 | 2 | 123°                               | 6    | 18°  | 1    | 114° | 1    | 312° | r         | 1—20 j |
| 80                                | Urk . . . . .                     | 52.39.46 | + 0.42.15 | 10 | — 10 | 20  | 1    | 1 | 2 | 114°                               | 7    | 350° | 1    | 98°  | 1    | 285° | r         | 1—20 j |
| 81                                | Hoorn . . . . .                   | 52.38.40 | + 0.10.50 | 12 | — 20 | 32  |      |   |   |                                    |      |      |      |      |      | p    | 20 j      |        |
| 82                                | Edam <sup>3)</sup> . . . . .      | 52.31. 0 | + 0.11.20 | 6  | — 23 | 29  | — 8? | 1 |   |                                    | 11   | 354° | 1    | 185° |      | p    | 1 j       |        |
| 83                                | Elburg . . . . .                  | 52.27.15 | + 0.56.30 | 15 | — 15 | 30  | 0    | 0 | 2 | 116°                               | 10   | 24°  | 1    | 295° | 1    | 326° | r         | 1—20 j |
| 84                                | Durgerdam . . . . .               | 52.22.48 | + 0. 7. 0 |    |      |     |      |   | 2 | 134°                               | 13   | 13°  |      |      |      | r    | 5—20 j    |        |
| 85                                | Oranjesluizen <sup>4)</sup> . . . | 52.22.55 | + 0.4 .38 | 18 | — 24 | 42  | — 2  | 0 | 2 | 122°                               | 14   | 10°  | 1    | 215° | 1    | 46°  | p         | 1—20 j |
| 86                                | Muiden . . . . .                  | 52.20.20 | + 0.11. 3 |    |      |     |      |   |   | nagenoeg gelijk aan Oranjesluizen. |      |      |      |      |      |      | e         |        |
| 87                                | Nijkerk . . . . .                 | 52.15.25 | + 0.35. 0 | 15 | — 24 | 39  | — 4  | 0 | 3 | 120°                               | 14   | 22°  | 1    | 242° | 0    | 97°  | r         | 1—20 j |

<sup>1)</sup> Voor harmonische constanten lage standen gegist.

<sup>2)</sup> Voor harmonische constanten geregistreerde lage standen.

<sup>3)</sup> Driemaaldaagsche waarnemingen (8 v, middag en 4 n).

<sup>4)</sup> Uurwaarnemingen.

## BEREKENING VAN ASTRONOMISCHE STANDEN

(§§ 17, 2C, 27, 47, 65).

De met de methode der harmonische analyse uit de constanten berekende getijlijnen beantwoorden des te nauwkeuriger aan de werkelijkheid naarmate er meer partieele getijden in aanmerking worden gebracht.

Men kan daarmee niet al te ver gaan, daar de berekeningen door het groote aantal getijden spoedig te bewerkelijk worden om nog practisch te kunnen worden toegepast.

De te beschouwen partieele getijden kunnen worden ondergebracht in een viertal groepen, nl. die van lange periode (veel langer dan een dag), enkeldaagsche getijden, waarvan de periode niet veel van een etmaal verschilt, dubbeldaagsche, die een periode van omstreeks 12 uur hebben en eindelijk getijden met korte periode ( $\frac{1}{4}$  etmaal en korter).

Van de *getijden van lange periode* heeft het jaarlijksche getij *Sa* de grootste amplitude. Het uit zich door het verschijnsel dat in het najaar (Sept.—Oct.) de waterstanden omsteeks 15 cm hooger zijn dan in de lente (Maart—April) en in verband daarmee is de amplitude van *Sa* in het geheele gebied ongeveer 7 cm en het kappagetal omstreeks  $240^\circ$ .

Alle overige getijden van lange periode: de halfjaarlijksche, vier-, drie-, één-, en halfmaandelijksche zijn veel kleiner en bovendien onvoldoende bekend. Hun constanten veranderen van jaar tot jaar soms zeer sterk, een gevolg van meteorologische storingen.

Bij het berekenen van een getijlijn van een bepaalden dag hebben al deze getijden invloed op den gemiddelden stand van dien dag, zij maken dat deze stand in meerdere of mindere mate van den middenstand over een lange periode afwijkt.

Het beste doet men den gemiddelden dagstand te schatten met behulp van de gegevens die voorkomen in de Etudes van VAN DER STOK (literatuur-opgave n°. 42). Men kan daartoe de cijfers nemen van tableau VI (l.c. p. 34 en 35) van deel IV maar nog gemakkelijker is het de krommen te gebruiken die in deel I van genoemd werk in de op blz. 17 voorkomende figuur zijn geteekend. Deze krommen kunnen iets worden „geregulariseerd” omdat het gebleken is dat in andere lange perioden het algemeen verloop wel hetzelfde blijft, maar de details, b.v. het minimum in November, veranderen.

De *enkeldaagsche getijden* die in aanmerking komen zijn vier in getal. Het grootste is *O*, dan volgen  $K_1$ , *Q* en *P*. Van deze getijden valt op te merken dat het hoogwater van  $K_1$  en van *P* op iederen datum van het jaar op een vast tijdstip valt. Op de plaatsen waar de kappagetallen  $0^\circ$  zijn heeft  $K_1$  in den nieuwjaarsnacht hoogwater omstreeks halftwaalf; het tijdstip valt iedere maand twee uur vroeger, dus 1 Februari om halftien enz. Met *P* is het juist andersom: 1 Januari halféén 's morgens en dan iedere maand 2 uur later.

Daar in de Waddenzee de kappagetallen van  $K_1$  tusschen  $0^\circ$  en  $30^\circ$  liggen komen de hoogwaters 0—2 uur later, voor *P* ( $\approx 345^\circ$  à  $20^\circ$ ) is hoogwater tusschen een uur vroeger en een uur later. Dit alles is van belang bij het beantwoorden van de vraag hoe hoog de astronomische stand gedurende het stormseizoen kan worden: het is duidelijk dat  $K_1$  en *P* met

het dubbeldaagsche zonsgetij  $S_2$ , dat elken dag op hetzelfde uur hoogwater heeft, alleen in sommige deelen van het jaar kunnen samenwerken. Zoo valt het maximum van  $K_1$  met dat van  $S_2$  samen in de tweede helft van Maart (avondtij) en van September (morgentij), terwijl  $P$  begin November (avondtij) en begin Mei (morgentij) het hoogwater van  $S_2$  verhoogt. In Januari kan men dus noch van  $K_1$ , noch van  $P$  een belangrijke bijdrage tot een hoog springtij verwachten.

De dubbeldaagsche (halfdaagsche) getijden zijn in Noord- en Zuiderzee het belangrijkste. Het zijn, beginnend met de grootste,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N$ ,  $\mu$  of  $2MS$ ,  $L$ ,  $K_2$ ,  $\nu$  en  $\lambda$ . Deze hebben in de Waddenzee amplituden van meer dan 2 cm, sommige aanmerkelijk grooter. Bij zeer nauwkeurige berekeningen kan men nog  $2SM$  en  $T$ , met amplituden tusschen 2 en 1 cm, in rekening brengen, terwijl  $R$ , dat kleiner dan 1 cm is, steeds wordt verwaarloosd.

Voor  $K_2$  geldt hetzelfde wat voor  $K_1$  en  $P$  is gezegd: het hoogwater valt op een bepaalden datum elk jaar weer op hetzelfde tijdstip; evenals bij  $K_1$  schuift het iedere maand 2 uur terug. In verband met het feit dat overal de kappagetallen van  $K_2$  en  $S_2$  gelijk zijn (het verschil is nergens meer dan enkele graden) werkt  $K_2$  op 21 Maart en 22 September met  $S_2$  samen, terwijl het op 21 Juni en 21 December dat getij verzwakt. Dit veroorzaakt het overal ter wereld bekende verschijnsel van de buitengewoon sterke springtijden gedurende de dag- en nachteveningen, waardoor ook het tij van den stormvloed van 12/13 Maart 1906 (§ 25) zoo sterk was.

Wat de hoogte bij springtij (samenwerken van  $M_2$  en  $S_2$ ) betreft, komt ook het getij  $2MS$  in aanmerking. Het verschil tusschen de hoeksnelheid van  $S_2$  en  $M_2$  is even groot als dat tusschen de hoeksnelheden van  $M_2$  en  $2MS$ ; dit heeft ten gevolge dat bij elk tijdsverschil tusschen de hoogwaters van  $S_2$  en  $M_2$  een bepaald tijdsverschil tusschen de maxima van  $M_2$  en  $2MS$  behoort. In den regel is de toestand zoodanig dat wanneer de  $S_2$ -golf met de  $M_2$ -golf samenvalt (springtij) het getij  $2MS$  tegengestelde phase heeft. Dit wordt uitgedrukt door een betrekking tusschen de kappagetallen van die drie getijden:

$$\kappa_{S_2} + \kappa_{2MS} + 180^\circ = 2\kappa_{M_2}.$$

Het nulpunt der kappagetallen is nl. zoo gekozen, dat wanneer zij alle drie nul waren, de hoogwaters in de drie gevallen op hetzelfde tijdstip zouden vallen. In Nederland gaat de zoeven genoemde betrekking tusschen de kappagetallen vrij goed door, zoodat een springtij steeds wordt verzwakt door  $2MS$ , dat daarentegen het doortij versterkt.

Een dergelijke afhankelijkheid bestaat ook tusschen  $N$  en  $L$ . De betrekking luidt daarvoor:

$$\kappa_N + \kappa_L = 2\kappa_{M_2},$$

want het nul zijn van de drie kappagetallen heeft bij deze getijden een andere beteekenis dan zoeven. De definitie van de astronomische argumenten is hier zoodanig, dat in dit geval op die tijdstippen waarop  $N$  of  $L$  één van beide met  $M_2$  samenwerkt het andere tegengestelde phase zou hebben.

Bij  $\nu$  en  $\lambda$ , die eveneens gelijke verschillen in hoeksnelheid (in tegengestelden zin) met  $M_2$  vertoonen, is de toestand dezelfde als bij  $N$  en  $L$ ; de voorwaarde voor het tegenwerken is dus:

$$\kappa_\nu + \kappa_\lambda = 2\kappa_{M_2}.$$

Ook aan de beide laatstgenoemde formules wordt in onze omgeving ten naasten bij voldaan.

Uit het voorgaande volgt dat bij het zoeken naar de hoogst mogelijke astronomische hoogwaters rekening moet worden gehouden met het feit dat wanneer  $S_2$ ,  $N$  en  $\nu$  het hoogwater verhoogden  $2MS$ ,  $L$  en  $\lambda$  juist een verlagenden invloed hebben.

De getijden met korte periode zijn z.g. ondiepwatargetijden. Zij ontstaan zoodra, om welke reden dan ook, de niet lineaire termen in de bewegings-

vergelijkingen zich doen gevoelen, zoodat het superpositiebeginsel niet meer geldt. Dit is met name bij kleine waterdiepten het geval (slot van § 41).

Wanneer men de ondiepwatergetijden volledig in rekening wil brengen komt men er toe een werkwijze toe te passen die de geheele berekening der astronomische standen aanmerkelijk vereenvoudigt, en die hieruit bestaat dat men verschillende getijden waarvan de frequenties slechts weinig van elkander verschillen tot één enkel getij met één bepaalde frequentie samenvat. Dit berust hierop dat, indien  $n$  en  $n'$  weinig verschillen, functiën als

$$h = a \cos (nt - p) \quad \text{en} \quad h' = a' \cos (n't - p')$$

in de nabijheid van een bepaald tijdstip  $t_0$  weinig uiteenloopen, indien voor

$$t = t_0: \quad h' = h \quad \text{en} \quad \frac{dh'}{dt} = \frac{dh}{dt}$$

is, met behulp van welke vergelijkingen men  $a$  en  $p$  uit  $a'$  en  $p'$  kan afleiden.

Gaat men van  $t_0$  tot een naburige waarde  $t$  over, dan verandert de phase van de eene trilling met  $n(t-t_0)$  en die van de andere met  $n'(t-t_0)$ . De beide functiën zullen zoo goed als samenvallen zoolang het verschil dezer grootheden  $(n'-n)(t-t_0)$  klein is t. o. v.  $\frac{1}{2} \pi$ . Is  $n'-n$  veel kleiner dan  $n$  of  $n'$  ieder op zich zelf, dan kan het samenvallen vóór en na  $t_0$  zich over een betrekkelijk lang tijdsverloop uitstrekken.

Een groep van getijden die men op deze wijze kan samenvatten vormen de halfdaagsche  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N$ ,  $\mu$  of  $2MS$ ,  $L$ ,  $K_2$ ,  $\nu$  en  $\lambda$ .

Eveneens kan men met elkander vereenigen de getijden die door combinatie van deze twee aan twee ontstaan, en welker frequentie de som is van de frequenties der twee primaire getijden. Men kan daar nog bijvoegen getijden als  $M_4$  en  $S_4$ , die dubbel zoo groote frequentie als  $M_2$  en  $S_2$  hebben, en in zekeren zin aan de combinatie van  $M_2$  of van  $S_2$  met zich zelf kunnen worden toegeschreven (bovengetijden). Zoo komt men tot de volgende groep (secundaire getijden):

$$\begin{array}{lll} M_4 (M_2 + M_2); & MS (M_2 + S_2); & S_4 (S_2 + S_2); \\ MN (M_2 + N); & ML (M_2 + L); & N + N; \\ M_2 + K_2; & N + S_2; & \text{enz.} \end{array}$$

(Het combineeren van getijden wordt symbolisch voorgesteld door een + teeken).

Ook getijden met een frequentie driemaal zoo groot als die van de primaire groep (tertiaire getijden) kunnen worden samengevat, b.v.

$$M_6 (M_2 + M_2 + M_2); \quad M_4 + S_2; \quad M_2 + S_4.$$

Het samenstellen van al de secundaire getijden, en eveneens van al de tertiaire, wordt zeer vereenvoudigd door de omstandigheid dat tusschen de amplituden en phasen der tot een zelfde groep behoorende boven- en combinatiegetijden en die van de primaire getijden waaruit zij ontstaan, zekere met groote benadering geldende betrekkingen bestaan, van welke de theorie rekenschap kan geven. Daardoor wordt het mogelijk, als men de primaire halfdaagsche getijden kent, alles wat de secundaire te zamen geven uit  $M_4$  alleen, en wat de tertiaire opleveren uit  $M_6$  af te leiden.

Stel dat in het gebied waar de ondiepwatergetijden ontstaan een getij binnendringt, dat (in den diepen oceaen) door de formule

$$h = a \cos (nt - p) \quad (191)$$

kan worden voorgesteld. Men kan daaruit op dergelijke wijze als in hoofdstuk VI gedaan werd, de beweging in een punt van het ondiepe gebied afleiden. Rekent men met een lineaire weerstandswet, met een geschikt gekozen coëfficiënt (die zoo noodig van punt tot punt kan veranderen) en verwaarloost men ook verder alle niet lineaire termen in de bewegings-

vergelijkingen, dan vindt men voor een willekeurig punt  $Q$  een uitdrukking van den vorm

$$h_Q = \alpha_Q a \cos (nt - p - \beta_Q). \quad (192)$$

De grootheden  $\alpha_Q$  en  $\beta_Q$  hebben voor elk punt bepaalde waarden, onafhankelijk van  $a$  en  $p$ , daar de amplitudeverhoudingen en de phaseverschillen geheel door de vergelijkingen bepaald worden.

Daaruit volgt dat wanneer uit den oceaan een tweede getij van dezelfde frequentie binnenkomt, nl.

$$h' = \sigma a \cos (nt - p - \varphi), \quad (193)$$

met betrekking tot het eerste gekenmerkt door de amplitudeverhouding  $\sigma$  en het phaseverschil  $\varphi$ , daardoor in  $Q$  zal worden teweeggebracht

$$h'_Q = \alpha_Q \sigma a \cos (nt - p - \varphi - \beta_Q), \quad (194)$$

zoodat men, als (191) en (193) tegelijk bestaan, voor de verandering der hoogte in  $Q$  zal hebben

$$\mathbf{h}_Q = \alpha_Q a \cos (nt - p - \beta_Q) + \alpha_Q \sigma a \cos (nt - p - \varphi - \beta_Q). \quad (195)$$

Hierbij zou het blijven als de vergelijkingen werkelijk lineair waren. Zijn er echter termen van den tweeden graad, stel termen met  $\mathbf{h}^2_Q$ , dan kan men zich van de methode der residueele krachten (§ 38) bedienen. Na de uitdrukkingen daarvoor opgemaakt te hebben kan men bij de bepaling van hun uitwerking weder van de niet lineaire termen afzien.

De residueele kracht <sup>1)</sup> kan worden voorgesteld door

$$b_Q \mathbf{h}^2_Q,$$

waarin  $b_Q$  voor elk punt  $Q$  een bepaalde, van de daar bestaande omstandigheden afhankelijke, waarde heeft. Substitueert men hierin de waarden van (195), dan vindt men drie deelen der residueele kracht, nl.:

$$\begin{aligned} & b_Q \alpha^2_Q a^2 \cos^2 (nt - p - \beta_Q), \\ & 2 b_Q \alpha^2_Q \sigma a^2 \cos (nt - p - \beta_Q) \cos (nt - p - \varphi - \beta_Q), \\ & b_Q \alpha^2_Q \sigma^2 a^2 \cos^2 (nt - p - \varphi - \beta_Q). \end{aligned}$$

Elk dezer uitdrukkingen kan gesplitst worden in een gedeelte dat onafhankelijk van  $t$  is (en dat dus uitsluitend invloed heeft op den middenstand) en een tweede met de frequentie  $2n$ . Beperkt men zich tot dit laatste, dan heeft men in de drie gevallen:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{2} b_Q \alpha^2_Q a^2 \cos (2nt - 2p - 2\beta_Q), \\ & b_Q \alpha^2_Q \sigma a^2 \cos (2nt - 2p - 2\beta_Q - \varphi), \\ & \frac{1}{2} b_Q \alpha^2_Q \sigma^2 a^2 \cos (2nt - 2p - 2\beta_Q - 2\varphi). \end{aligned} \right\} \quad (196)$$

De uitwerkingen van deze drie krachten, of liever krachtenstelsels (in elk punt  $Q$  een residueele kracht), vertoonen veel overeenkomst met elkaar. Stel nl. dat in ieder punt  $Q$  een residueele kracht

$$b_Q \alpha^2_Q \cos (2nt - 2\beta_Q)$$

bestond. Dan zou daardoor in een willekeurig punt  $R$  een verticaal getij met bepaalde amplitude en bepaalde phase worden teweeggebracht, stel

$$\gamma_R \cos (2nt - \delta_R),$$

waarbij  $\gamma_R$  en  $\delta_R$  van de ligging van  $R$  afhangen. Daar nu bij vermenigvuldiging van alle residueele krachten met een zelfden constanten factor ook de hoogteverandering in  $R$  met dien factor wordt vermenigvuldigd, en verandering der phase van alle resulterende krachten met een zelfde bedrag een gelijke verandering der phase van de teweeggebrachte water-

<sup>1)</sup> Strikt genomen zou men de *componenten* van de residueele kracht in het oog moeten vatten en nagaan of zij niet veeleer van de tweede macht van een stroom  $s$  of van een product  $sh$ , dan wel van  $h^2$  afhangen. Op de gevolgtrekkingen heeft dit alles echter geen invloed. Daarom kan eenvoudigheidshalve de uiteenzetting beperkt blijven tot hetgeen nu volgt.

verhoogingen ten gevolge heeft, kan men voor de door de drie krachten (196) in  $R$  veroorzaakte getijden schrijven

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma_R a^2 \cos(2nt - 2p - \delta_R), \\ \sigma \gamma_R a^2 \cos(2nt - 2p - \delta_R - \varphi), \\ \frac{1}{2} \sigma^2 \gamma_R a^2 \cos(2nt - 2p - \delta_R - 2\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (197)$$

terwijl blijkens (192) en (194) de primaire getijden in dat zelfde punt geven

$$\begin{aligned} \alpha_R a \cos(nt - p - \beta_R), \\ \sigma \alpha_R a \cos(nt - p - \beta_R - \varphi). \end{aligned}$$

Duidt men deze primaire getijden door 1 en 2 aan, dan is

$$\frac{\text{ampl}_2}{\text{ampl}_1} = \sigma$$

en bestaat tusschen de kappagetallen het verschil

$$\kappa_2 - \kappa_1 = \varphi.$$

De in (197) aangegeven secundaire getijden kunnen door 11, 12 en 22 worden voorgesteld. Men ziet nu dat de volgende betrekkingen bestaan:

$$\text{ampl}_{11} : \text{ampl}_{12} : \text{ampl}_{22} = 1 : 2\sigma : \sigma^2 \quad (198)$$

$$\kappa_{12} - \kappa_{11} = \kappa_2 - \kappa_1; \quad \kappa_{22} - \kappa_{11} = 2(\kappa_2 - \kappa_1). \quad (199)$$

Men kan deze betrekkingen met de waarnemingen vergelijken door b.v. uit de waargenomen amplituden en kappagetallen van 1, 11 en 2 die van 12 en 22 af te leiden. Voor Helder komt men tot de volgende uitkomsten (telkens amplitude en kappagetal):

Voor 1 wordt genomen het getij  $M_2$ , en dus voor 11 het getij  $M_4$ . Volgens de waarnemingen (bijlage 2, n<sup>o</sup>. 9) heeft men

$$M_2 \quad 53 \text{ cm, } 168^\circ; \quad M_4 \quad 11 \text{ cm, } 190^\circ.$$

Voor 2 kan men nemen een der getijden  $S_2, N, 2MS, L, K_2, \nu$  en  $\lambda$ , zooals de waarneming ze heeft doen kennen. Men vindt dan achtereenvolgens:

$$S_2 \quad 14,5 = 0,27 \times 53 \text{ cm, } 234^\circ = 168^\circ + 66^\circ$$

$$MS \quad 2 \times 0,27 \times 11 = 6 \text{ cm, } 190^\circ + 66^\circ = 256^\circ \text{ (waarneming 6 cm, } 247^\circ)$$

$$S_4 \quad 0,27^2 \times 11 = 0,8 \text{ cm, } 190^\circ + 2 \times 66^\circ = 322^\circ \text{ (waarneming ong. } \frac{1}{2} \text{ cm, } 330^\circ)$$

$$N \quad 8,8 = 0,16 \times 53 \text{ cm, } 157^\circ = 168^\circ - 11^\circ$$

$$MN \quad 2 \times 0,16 \times 11 = 3,5 \text{ cm, } 190^\circ - 11^\circ = 179^\circ \text{ (waarneming 4,0 cm, } 165^\circ)$$

$$N + N \quad 0,16^2 \times 11 = 0,3 \text{ cm, } 190^\circ - 2 \times 11^\circ = 168^\circ \text{ (niet waargenomen).}$$

$$\mu \text{ of } 2MS \quad 6,4 = 0,12 \times 53 \text{ cm, } 260^\circ = 168^\circ + 92^\circ$$

$$M_2 + \mu \text{ (meestal aangeduid door } M_6 - S_2) \quad 2 \times 0,12 \times 11 = 2,6 \text{ cm, } 190^\circ + 92^\circ = 282^\circ \text{ (waarneming 1,9 cm, } 286^\circ).$$

$$L \quad 5,2 = 0,095 \times 53 \text{ cm, } 158^\circ = 168^\circ - 10^\circ$$

$$ML \quad 2 \times 0,095 \times 11 = 2,1 \text{ cm, } 190^\circ - 10^\circ = 180^\circ \text{ (waarneming 2,3 cm, } 187^\circ).$$

$$K_2 \quad 4,6 = 0,085 \times 53 \text{ cm, } 236^\circ = 168^\circ + 68^\circ$$

$$M_2 + K_2 \quad 2 \times 0,085 \times 11 = 1,9 \text{ cm, } 190^\circ + 68^\circ = 258^\circ \text{ (waarneming 2,2 cm, } 231^\circ).$$

Andere combinatiegetijden zijn niet uit de waarnemingen afgeleid, maar men ziet dat er een bevredigende overeenstemming is. Men moet hierbij bedenken, dat in de „waargenomen” constanten, vooral van de kleine getijden, vrij groote onzekerheden bestaan.

Van de combinatiegetijden waarbij  $M_2$  geen rol speelt is  $NS$  het grootste. Blijkens (198) moet de amplitude daarvan zijn

$$2 \frac{\text{ampl}_N}{\text{ampl}_{S_2}} \times \text{ampl}_{S_4},$$

of, volgens het zoeven gevondene,  $2 \times 0,27 \times 0,16 = 0,086$  van die van  $M_4$ , dus nog geen centimeter. Het is evenmin als de bovengetijden van  $N, 2MS$  enz. uit de waarnemingen afgeleid.

Dergelijke betrekkingen als boven voor de secundaire getijden werden gevonden bestaan ook voor de „tertiaire”, die elk een frequentie hebben gelijk aan de som der frequenties van drie met elkaar gecombineerde primaire getijden, waarbij twee hiervan of alle drie hetzelfde kunnen zijn. Men kan nl. de tertiaire getijden opvatten als teweeggebracht door residueele krachten, evenredig met  $h^3_0$ . Heeft men met de boven beschouwde primaire getijden 1 en 2 te doen, dan valt zulk een kracht blijkens (195) in vier deelen uiteen, die tot de getijden 111, 112, 122 en 222 leiden. Om deze te vinden moet men elke grootheid van den vorm  $\cos^3(nt-s)$  of  $\cos^2(nt-s) \cos(nt-s')$  splitsen in een deel van de frequentie  $n$  en een deel van de frequentie  $3n$ . Het laatste deel, waarop het aankomt, is  $\frac{1}{4} \cos(3nt-3s)$  of  $\frac{1}{4} \cos(3nt-2s-s')$  en men vindt nu de met (198) en (199) overeenkomende betrekkingen:

$$\text{ampl}_{111} : \text{ampl}_{112} : \text{ampl}_{122} : \text{ampl}_{222} = 1 : 3\sigma : 3\sigma^2 : \sigma^3$$

en

$$\alpha_{112} - \alpha_{111} = \alpha_{122} - \alpha_{112} = \alpha_{222} - \alpha_{122} = \alpha_2 - \alpha_1.$$

Zoo kan men b.v. uit  $M_2$  en  $S_2$  afleiden:  $M_6$ ,  $M_4 + S_2$  (of  $M_2 + M_2 + S_2$ ),  $M_2 + S_4$  (of  $M_2 + S_2 + S_2$ ) en  $S_6$ . Te Helder, waar  $M_6$  de constanten 6 cm en  $293^\circ$  heeft, moet  $M_4 + S_2$  een amplitude van  $3 \times 0,27 \times 6 = 5$  cm en een kappagetal van  $293^\circ + 66^\circ = 359^\circ$  hebben. De waarnemingen geven 6 cm en  $342^\circ$ , er is dus voldoende overeenstemming.

Dit getij is bijna zoo groot als  $M_6$  zelf; bij de achtmaaldaagsche getijden wordt het eerste combinatiegetij  $M_6 + S_2$  al grooter dan  $M_6$  omdat de factor hier  $4 \times 0,27 = 1,08$  is.

De achtmaaldaagsche getijden te zamen worden bij springtij van belang en mogen niet worden verwaarloosd, al is  $M_6$  op zich zelf klein.

Op grond van de boven aangewezen betrekkingen kan men bij het berekenen van de getijlijn voor een kort tijdvak, b.v. een dag, alle viermaaldaagsche getijden tegelijk in rekening brengen door de dubbeldaagsche getijden te vereenigen tot één sinusoïde, die men het beste de periode van  $M_2$  kan geven, en de amplitude en phase van die sinusoïde te vergelijken met de overeenkomstige waarden van  $M_2$  alleen. Is de amplitudeverhouding  $m$  en het phaseverschil  $\Delta$ , dan vindt men de som van de viermaaldaagsche getijden te zamen door  $m^2$  maal de amplitude van  $M_4$  te nemen en dit getij  $2\Delta$  in tijd te verschuiven.

Denzelfden regel kan men op de zesmaaldaagsche getijden toepassen, alleen wordt de amplitude nu  $m^3$  maal die van  $M_6$  en de phaseverschuiving ten opzichte van dit getij  $3\Delta$ .

De bij de berekeningen van de astronomische getijden gevolgde methode komt dus hierop neer, dat men de getijden van eenzelfde soort steeds vervangt door één enkel. De getijden van lange periode worden voorgesteld door de afwijking van den middenstand; de enkeldaagsche getijden worden vereenigd tot één sinusoïde die de frequentie van  $M_1$  heeft (de frequenties van  $O$ ,  $K_1$ ,  $Q$  en  $P$  zijn resp. 0,96; 1,04; 0,92 en 1,03 maal zoo groot); in plaats van de dubbeldaagsche getijden neemt men een enkele sinusoïde met de hoeksnelheid van  $M_2$  (frequenties van  $S_2$ ,  $N$ ,  $2MS$ ,  $L$ ,  $K_2$ ,  $\nu$  en  $\lambda$  zijn 1,04; 0,98; 0,96; 1,02; 1,04; 0,98 en 1,02 maal zoo groot); de viermaaldaagsche worden met behulp van  $M_2$  en  $M_4$  uit de dubbeldaagsche afgeleid; voor de zesmaaldaagsche geschiedt dit met behulp van  $M_2$  en  $M_6$  en voor de achtmaaldaagsche met  $M_2$  en  $M_8$ .

Het is duidelijk dat men zich op deze wijze rekenschap geeft van alle boven- en combinatiegetijden van de dubbeldaagsche golven, maar evenzeer dat het samenvoegen van alle enkeldaagsche en van alle dubbeldaagsche getijden tot één sinusoïde alleen voor een enkel oogenblik juist is. Men kan voor dit oogenblik het midden van het tijdvak kiezen. De fout wordt grooter naarmate men zich verder van dat oogenblik verwijderd; een afzonderlijke berekening heeft doen zien dat de fouten binnen de grenzen der

nauwkeurigheid blijven wanneer men niet verder gaat dan 12 uur vroeger of later.

Om de berekeningswijze op de proef te stellen zijn onder anderen voor Helder en Harlingen eenige getijlijnen berekend voor dagen met mooi weer, zoodat de berekende lijn met de geregistreerde kromme kon worden vergeleken.

In fig. 65 en 66 zijn de berekende en waargenomen lijnen geteekend voor een dag met springtij en voor een dag met doodtij. In het eerste geval heerschte een westelijke wind die iets grotere sterkte had dan de gemiddelde wind (§ 19). Dit heeft ten gevolge dat de werkelijk voorgekomen getijlijn te Harlingen op een iets hoger niveau ligt dan de berekende; te Helder is dit nauwelijks merkbaar. Op den dag met doodtij had het omge-

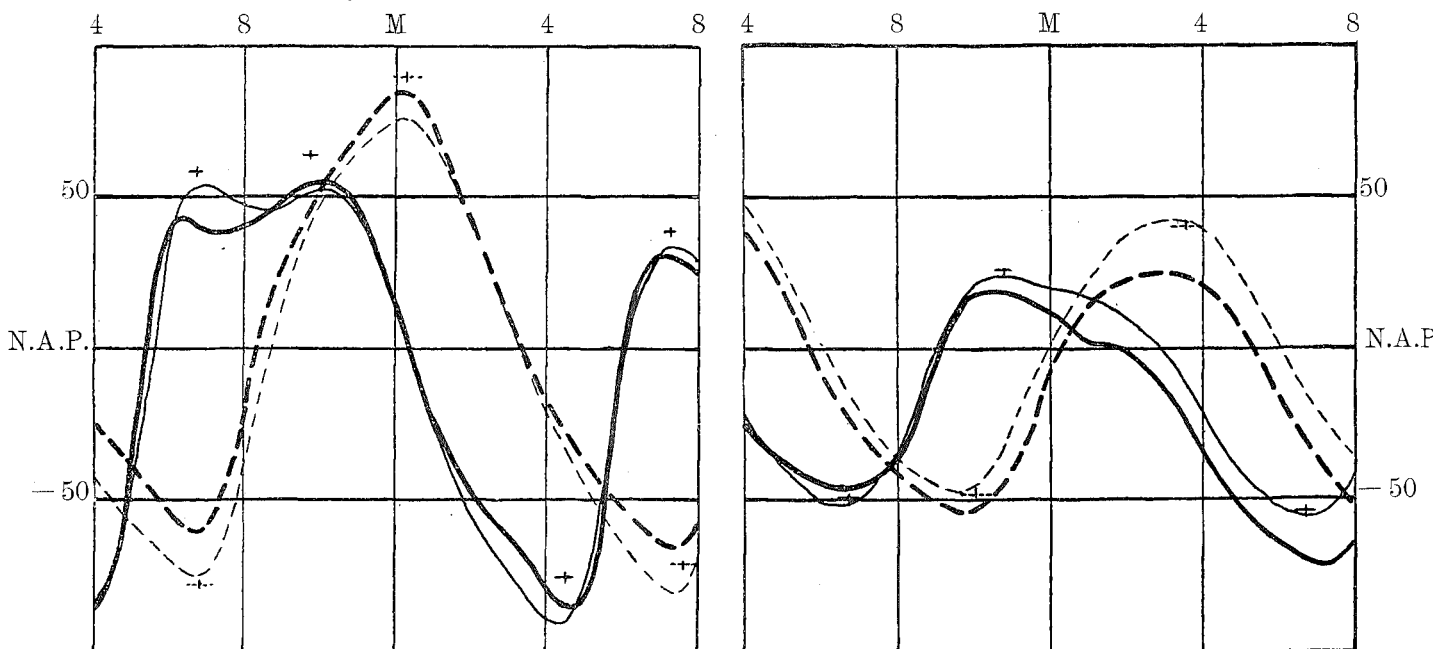
#### GETIJLIJNEN VAN HELDER (GETROKKEN) EN HARLINGEN (GESTREEPT).

Waargenomen (dik) en berekende (dun) krommen.

Kruisjes zijn de in de getijtafels voorspelde hoog- en laagwaters.

Springtij (18 Juli 1923).

Doodtij (10 October 1921).



Figuur 65.

Figuur 66.

keerde plaats: de wind was toen oostelijk, waardoor de waargenomen lijnen onder de berekende liggen. Het verschil neemt in den loop van den dag in verband met het aanwakkeren van den wind toe.

Men ziet dat voor Harlingen de overeenstemming goed is, zeker even goed als de, eveneens aangegeven, voorspelling van de getijtafels. Te Helder wordt de eerste vloedkop niet goed aangegeven, dit is het verschil waarvan reeds in § 41 werd gesproken. Overigens leidt de werkwijze ook voor deze plaats tot goede resultaten. De gebruikelijke methode, waarbij de partieele getijden alle afzonderlijk worden berekend, geeft veel grotere afwijkingen van de waargenomen lijnen, tengevolge van het minder volledig in rekening brengen van de getijden van korte periode.

Als voorbeeld van de berekeningswijze moge hier de bepaling van de astronomische standen van 18 Juli 1923 (springtij) te Harlingen volgen.

De middenstand (bijlage 2 en figuur 2, blz. 31) is te stellen op 5 cm — N.A.P.; de afwijking bedraagt midden Juli volgens de figuur op blz. 17 van Etudes I (literatuuropgave n<sup>o</sup>. 42) + 2 cm.

Voor den middag worden nu de fasen van de partieele getijden bepaald, waarbij is gebruik gemaakt van de tafels van HARRIS (literatuuropgave n<sup>o</sup>. 49). Men vindt daarin voor elk getij achtereenvolgens het astronomisch argument bij den aanvang van het jaar 1923, de verandering daarvan tusschen 1 Januari en 1 Juli, die tusschen den eersten en achttienden dag



## Men vindt voor de waterstanden:

| $t$        | -120   | -105   | -90    | -75    | -60    | -45   | -30   | -15   | 0     | 15    | 30    | 45    | 60     | 75     | 90     | 105    | 120    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $M$ . . .  | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0 | - 3,0 | - 3,0 | - 3,0 | - 3,0 | - 3,0 | - 3,0 | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0  | - 3,0  |
| $I$ . . .  | - 5,6  | - 2,9  | 0,0    | 2,9    | 5,6    | 8,0   | 9,8   | 10,9  | 11,3  | 10,9  | 9,8   | 8,0   | 5,6    | 2,9    | 0,0    | - 2,9  | - 5,6  |
| $II$ . . . | - 30,9 | - 57,7 | - 69,1 | - 62,0 | - 38,2 | - 5,4 | 30,9  | 57,7  | 69,1  | 62,0  | 38,2  | 5,4   | - 30,9 | - 57,7 | - 69,1 | - 62,0 | - 38,2 |
| $IV$ . . . | 6,0    | 5,3    | 0,7    | 6,0    | 5,3    | 0,7   | 6,0   | 5,3   | 0,7   | 6,0   | 5,3   | 0,7   | 6,0    | 5,3    | 0,7    | 6,0    | 5,3    |
| $VI$ . . . | - 3,4  | 5,2    | 3,4    | - 5,2  | - 3,4  | 5,2   | 3,4   | - 5,2 | - 3,4 | 5,2   | 3,4   | - 5,2 | - 3,4  | 5,2    | 3,4    | - 5,2  | - 3,4  |
| $VIII$ . . | - 0,7  | - 1,4  | 2,1    | - 0,7  | - 1,4  | 2,1   | - 0,7 | - 1,4 | 2,1   | - 0,7 | - 1,4 | 2,1   | - 0,7  | - 1,4  | 2,1    | - 0,7  | - 1,4  |
| $B$ . . .  | - 37,6 | - 54,5 | - 67,3 | - 74,0 | - 45,7 | 7,6   | 46,4  | 64,3  | 75,4  | 68,4  | 41,7  | 8,0   | - 26,4 | - 48,7 | - 67,3 | - 79,8 | - 56,9 |
| $W$ . . .  | - 19   | - 36   | - 50   | - 60   | - 30   | 23    | 51    | 72    | 84    | 73    | 43    | 9     | - 19   | - 41   | - 55   | - 65   | - 44   |
| $V$ . . .  | 19     | 18     | 17     | 14     | 16     | 15    | 5     | 8     | 9     | 5     | 1     | 1     | 7      | 7      | 12     | 15     | 13     |

$t$  is de tijd in graden van de frequentie van  $M_1$  ( $14\frac{1}{2}$  in een uur); het nulpunt van tijdtelling is 's middags 12 uur. De middenstand van den dag staat op den regel  $M$ , de enkel-, dubbel-, viermaal- enz. -daagsche getijden op de regels  $I$ ,  $II$ ,  $IV$  enz.

De som  $B$  is de berekende stand. Het verschil  $V$  met de waarneming  $W$  is gemiddeld bijna 11 cm, dit is het reeds genoemde positieve wind-effect. De grootste afwijking van het gemiddelde bedraagt 10 cm, de middelbare waarde van de afwijking is 5,6 cm. Het berekende tijverskil is iets (7 cm) groter dan het waargenomene, wat ook op figuur 65, waarin de lijnen van dezen dag zijn weergegeven, duidelijk is te zien.

Ondanks deze verschillen mag de overeenstemming zeer bevredigend worden genoemd.

De astronomische standen zijn in de eerste plaats berekend voor verschillende stormvloeddagen, om het windeffect (§ 17) te kunnen bepalen. In de tweede plaats hebben de berekeningen gediend om te komen tot de verhooging van hoogwater door de afsluiting der Zuiderzee.

Gevraagd is voor een aantal plaatsen gemiddeld hoogwater bij open en afgesloten Zuiderzee en bovendien de hoogst mogelijke astronomische standen gedurende het stormseizoen (15 October—15 April) in die beide gevallen.

Gegeven zijn de getijconstanten voor open Zuiderzee en de wijze waarop die tengevolge van de afsluiting veranderen.

Het gemiddeld hoog- en laagwater wordt vrijwel geheel bepaald door de getijden van de  $M$ -groep:  $M_2$ ,  $M_4$ ,  $M_6$  en  $M_8$ . Op dezelfde wijze als in de „Getijkrommen” van v. BERESTEIJN (literatuuropgave n°. 47) kan men deze getijden samenstellen en bij de uitkomst den middenstand voegen.

Men vindt zodoende de gemiddelde getijlijn. Het maximum en het minimum daarvan zijn echter niet gemiddeld hoog- en laagwater. Dit wordt veroorzaakt door wat men zou kunnen noemen de verscherping van de hoog- en laagwaters, die grootendeels van meteorologischen oorsprong is, maar ook in verband staat met het optreden van andere getijden. Het verschijnsel is uitvoerig behandeld door HARRIS (literatuuropgave n°. 49, blz. 140—142); op deze plaats moge worden volstaan met het feit te vermelden dat aan de Nederlandsche kust door de verscherping het gemiddeld hoogwater omstreeks 10 % hooger boven den middenstand ligt dan het maximum van de gemiddelde kromme, terwijl het laagwater ook 10 % lager ligt dan het minimum van die kromme. Men kan zich hiervan met de cijfers in de „Getijkrommen” overtuigen.

Om gemiddeld hoogwater te vinden wordt dus eerst het maximum van de  $M$ -kromme gezocht, de hoogte hiervan boven den middenstand wordt met 10 % vermeerderd en daarna wordt de hoogte van den middenstand bij de uitkomst geteld. Een overeenkomstige handeling geeft gemiddeld laagwater.

De bewerking verloopt voor de belangrijkste plaatsen als volgt:

| Open<br>Zuiderzee. | Getijconstanten. |          |       |          |       |          |       |          | Maximum        |       | Minimum |       | $h_1$<br>+ | $h_2$<br>+ | $A_0$ | H.W. | L.W. |
|--------------------|------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|----------------|-------|---------|-------|------------|------------|-------|------|------|
|                    | $M_2$            |          | $M_4$ |          | $M_6$ |          | $M_8$ |          | van de kromme. |       |         |       |            |            |       |      |      |
|                    | H                | $\alpha$ | H     | $\alpha$ | H     | $\alpha$ | H     | $\alpha$ | $h_1$          | $t_1$ | $h_2$   | $t_2$ | 10%        | 10%        |       |      |      |
| Helder . .         | 53,5             | 168°     | 11,5  | 190°     | 6,3   | 293°     | 2,1   | 340°     | 44,2           | 118°  | -60,7   | 12°   | 48,5       | -66,8      | -13   | 36   | -80  |
| den Oever .        | 37               | 223°     | 6     | 280°     | 3     | 30°      | 1,2   | 100°     | 32,1           | 225°  | -44,8   | 56°   | 35,3       | -49,3      | -8    | 27   | -57  |
| Piaam . .          | 32               | 248°     | 1     | 315°     | 1     | 110°     | 1     | 300°     | 32,2           | 253°  | -32,4   | 68°   | 35,4       | -35,7      | -3    | 32   | -39  |
| Zurig . .          | 49               | 253°     | 3     | 35°      | 3     | 150°     | 1     | 310°     | 48,0           | 257°  | -50,1   | 90°   | 52,8       | -55,1      | -5    | 48   | -60  |
| Harlingen .        | 57,1             | 260°     | 4,5   | 55°      | 3,5   | 170°     | 1,0   | 310°     | 55,7           | 261°  | -55,7   | 98°   | 61,2       | -65,6      | -5    | 56   | -71  |
| Vlieland .         | 69               | 236°     | 3     | 297°     | 4     | 28°      | 1     | 296°     | 69,9           | 243°  | -74,7   | 57°   | 76,9       | -82,4      | -12   | 65   | -94  |

In de tabel zijn  $H$  en  $\alpha$  de amplituden en kappagetallen van de getijden. De hoogte van het maximum van de som der vier sinusoiden boven den middenstand is  $h_1$ , de tijd waarop dit hoogste punt voorkomt wordt in graden overeenkomende met de frequentie van  $M_2$  uitgedrukt door  $t_1$ . Voor het laagste punt van de kromme worden deze grootheden gegeven door  $h_2$  en  $t_2$ . In de volgende kolommen zijn  $h_1$  en  $h_2$  met 10% vergroot; de som van de nu gevonden grootheden en den middenstand  $A_0$  is hoogwater en laagwater.

De waarden van  $t_1$  wijken weinig af van het kappagetal van  $M_2$ , alleen Helder maakt daarop een uitzondering. Dit wordt veroorzaakt door de groote bovengetijden  $M_4$  en  $M_6$ : er ontstaat een dubbele vloedkop, waarvan het eerste gedeelte het hoogste is. Ook het tijdsverschil tusschen laag- en hoogwater ( $t_1 - t_2$ ), dat bij de andere stations ten naasten bij 180° is, wijkt voor Helder sterk daarvan af.

De berekende hoog- en laagwaters komen over het algemeen goed met de waargenomene van bijlage 2 overeen; de afwijkingen zijn driemaal 0, zesmaal 1, terwijl verschillen van 2, 3 en 7 cm elk éénmaal voorkomen. Het verschil van 7 cm heeft betrekking op het hoogwater in de haven van Vlieland, waar de berekening eigenlijk geen waarde heeft. In de perioden waaruit de getijconstanten zijn afgeleid was de diepte van de Vliesloot, die de haven met de diepe geulen verbindt, gemiddeld belangrijk grooter dan in het tijdvak waarvoor de middenstand, gemiddeld hoog- en gemiddeld laagwater zijn berekend. Bij den gebruikten middenstand behooren dus andere getijconstanten, de amplitude van  $M_2$  is tegenwoordig waarschijnlijk kleiner dan 65 cm.

Met uitzondering van dit eene geval mag men de uitkomst zeer bevredigend noemen en daarom werd de methode ook toegepast voor den toestand zooals die volgens de getijberekeningen bij afgesloten Zuiderzee ontstaat. De voor dat geval geldende getijconstanten zijn vermeld in tabel 11 (§ 47).

Men heeft nu:

| Afgesloten<br>Zuiderzee. | Getijconstanten. |          |       |          |       |          |       |          | Maximum        |       | Minimum |       | $h_1$<br>+ | $h_2$<br>+ | $A_0$ | H.W. | L.W. |
|--------------------------|------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|----------------|-------|---------|-------|------------|------------|-------|------|------|
|                          | $M_2$            |          | $M_4$ |          | $M_6$ |          | $M_8$ |          | van de kromme. |       |         |       |            |            |       |      |      |
|                          | H                | $\alpha$ | H     | $\alpha$ | H     | $\alpha$ | H     | $\alpha$ | $h_1$          | $t_1$ | $h_2$   | $t_2$ | 10%        | 10%        |       |      |      |
| Helder . .               | 55,5             | 177°     | 10    | 197°     | 4,5   | 298°     | 2     | 340°     | 45,6           | 180°  | -63,5   | 14°   | 50,2       | -69,8      | -13   | 37   | -83  |
| den Oever .              | 69               | 230°     | 7,5   | 275°     | 3     | 35°      | 1     | 120°     | 63,1           | 237°  | -77,9   | 55°   | 69,4       | -85,7      | -9    | 60   | -95  |
| Piaam . .                | 73               | 245°     | 5,5   | 20°      | 2     | 160°     | 1     | 320°     | 70,0           | 245°  | -73,7   | 75°   | 77,0       | -81,1      | -8    | 69   | -89  |
| Zurig . .                | 76               | 260°     | 6     | 45°      | 2     | 220°     | 2     | 340°     | 73,6           | 256°  | -76,0   | 95°   | 81,0       | -83,6      | -8    | 73   | -92  |
| Harlingen .              | 77               | 265°     | 5     | 60°      | 2,5   | 200°     | 1     | 0°       | 75,1           | 264°  | -77,4   | 102°  | 82,6       | -85,1      | -6    | 77   | -91  |
| Vlieland .               | 70               | 239°     | 3     | 300°     | 5     | 45°      | 1     | 300°     | 71,5           | 247°  | -76,1   | 63°   | 78,6       | -83,7      | -12   | 67   | -96  |

De verschillen van deze uitkomsten met die bij open Zuiderzee in de vorige tabel zijn verkregen, kunnen worden beschouwd als de veranderingen van het gewone getij door de afsluiting. Het hoogwater is overal gestegen, in de zeegaten slechts met een enkelen centimeter, in de Waddenzee zelf echter belangrijk: te Piaam 37 cm. Deze verschillen zijn opgenomen in § 47.

Het laagwater is sterk gedaald, het meest in Piaam, waar het verschil zelfs 50 cm is. Dit is van belang voor het afspuien van het IJsselmeer.

De tijdstippen van hoog- en laagwater zijn weinig veranderd; alleen bij Helder is een groot verschil. Dit wordt veroorzaakt door een geringe vervorming van den vloedkop, waardoor de grootste hoogte komt in den z.g. tweeden vloedkop, die eerst drie centimeter lager was dan de eerste.

Er rest nu nog de berekening van den in het stormseizoen hoogst mogelijken astronomischen stand. Strikt genomen moet men hiervoor een zeer uitgebreid onderzoek instellen en bijvoorbeeld ook vergelijken jaren met een groote helling van de maansbaan op den equator, waarin de hoofdgetijden zwak maar de z.g. declinatiegetijden  $K_1$ ,  $O$ ,  $P$ ,  $K_2$  groot zijn, met jaren waarin die helling klein is, zoodat het omgekeerde het geval is.

Dergelijke complicaties zijn niet in rekening gebracht omdat het hoogste getij dat men op deze wijze vindt zóó zeldzaam kan voorkomen, dat men daarvan kan afzien. Men heeft zich ten doel gesteld een stand te vinden die wel zeer hoog is, maar toch nu en dan, b.v. eens per jaar, kan voorkomen.

Het bleek al spoedig dat de hoogste standen in het begin van het stormseizoen, in October, voorkomen. Wel kan de *sterkte* van het getij door de werking van  $K_1$  en  $K_2$  (blz. 283) in Maart grooter zijn, maar de *hoogte* van hoogwater is dan toch lager, omdat de middenstand in het voorjaar lager is dan in den herfst. De berekening is daarom gebaseerd op half October, als de middenstand ongeveer 8 cm boven het gemiddelde ligt.

Van de enkeldaagsche getijden kan  $O$  bij springtij meewerken,  $K_1$  echter niet geheel. Dit laatste getij kan het ochtendtij met omstreeks 70% van zijn amplitude verhoogen.

$P$  daarentegen verhoogt in dezen tijd van het jaar het avondtij en oefent op het morgentij een verlagenden invloed uit, en zal een mogelijke verhooging door  $Q$  dus gedeeltelijk ongedaan maken. Voor alle enkeldaagsche getijden te zamen kan men dus rekening houden met een verhooging van de amplitude van  $O$  vermeerderd met ruim de helft van de amplitude van  $K_1$ .

Bij de dubbeldaagsche getijden werken  $M_2$  en  $S_2$  volledig samen, dit is trouwens de opzet van de geheele berekening. Het „toegevoegde” getij  $2MS$  werkt dan echter tegen (blz. 283). Er wordt verder op gerekend dat ook  $N$  met zijn volle amplitude het hoogwater verhoogt; men moet dan de amplitude van  $L$  er weer aftrekken. Ook tusschen  $\nu$  en  $\lambda$  bestaat, zooals op blz. 283 is gezegd, een dergelijk verband; het verschil van hun amplituden is zoo klein, dat het is verwaarloosd, evenals de invloed van  $2SM$ ,  $T$ , enz.

Bij  $K_2$  kan alleen sprake zijn van gedeeltelijke samenwerking met  $S_2$ : niet veel meer dan de helft van de amplitude mag in rekening worden gebracht.

Men kan nu nagaan hoe sterk de samengestelde golf is ten opzichte van  $M_2$  alleen, dus hoe groot de verhouding  $m$  van blz. 287 e. v. is.

Drukt men alle amplituden uit in die van  $M_2$ , dan komt er voor de plaatsen waarvoor de constanten van de partieele getijden alle bekend zijn:

|                               | IJmuiden | Helder | den Oever | Harlingen | Vlieland | Terschelling | Delfzijl |
|-------------------------------|----------|--------|-----------|-----------|----------|--------------|----------|
| Amplitude van $M_2$ . . . .   | 1,000    | 1,000  | 1,000     | 1,000     | 1,000    | 1,000        | 1,000    |
| „ „ $S_2$ . . . .             | 0,250    | 0,276  | 0,266     | 0,256     | 0,257    | 0,268        | 0,245    |
| af: Amplitude van $2MS$ . .   | —0,124   | —0,118 | —0,118    | —0,113    | —0,112   | —0,087       | —0,104   |
| Amplitude van $N$ . . . .     | 0,141    | 0,161  | 0,144     | 0,171     | 0,159    | 0,156        | 0,157    |
| af: amplitude van $L$ . . . . | —0,119   | —0,093 | —0,093    | —0,099    | —0,080   | —0,099       | —0,075   |
| ruim de halve ampl. van $K_2$ | 0,040    | 0,050  | 0,040     | 0,050     | 0,045    | 0,045        | 0,045    |
| $m$                           | 1,188    | 1,276  | 1,239     | 1,265     | 1,269    | 1,283        | 1,268    |

De lage waarde van  $I$  muiden wordt veroorzaakt door een zeer kleine  $N$  en een groote  $L$ ; het gemiddelde van de andere stations is bijna 1,27. Er is reden voor om dit getal nog iets te verhoogen, daar o. a. het tegenwerken van  $2MS$  en  $L$  niet volledig plaats heeft en zoo kan men voor het dubbeldaagsche getij de verhouding

$$m = 1,28$$

aannemen.

Hierdoor zijn ook de getijden van korte periode bepaald. Deze zijn nu immers:  $m^2M_4$ ,  $m^3M_6$  en  $m^4M_8$ , d. w. z.: 1,64  $M_4$ , 2,10  $M_6$  en 2,69  $M_8$ .

Op dezelfde wijze als bij de berekening van gemiddeld hoogwater wordt het dubbeldaagsche getij gecombineerd met zijn bovenharmonischen. Deze spelen nu relatief een veel belangrijker rol, zoodat de getijlijn veel meer dan de gemiddelde van een sinusoïde afwijkt. Dit verschijnsel treedt in werkelijkheid duidelijk op; men ziet b.v. dat de dubbele vloedkop te Helder in de getijlijn voor springtij van figuur 65 sterk ontwikkeld is, terwijl hij in de lijn voor doottij van figuur 66 geheel ontbreekt.

Bij het maximum van de lijn die de dubbeldaagsche en kortere getijden voorstelt wordt de bijdrage van de enkeldaagsche getijden gevoegd; de middenstand wordt verhoogd met de afwijking daarvan in October en de som van dit alles geeft den hoogsten waterstand waarop men practisch kan rekenen. Een verscherping van den vloedkop, zooals bij gemiddeld hoogwater, heeft hier natuurlijk niet plaats.

| Open<br>Zuiderzee. | Max. versterkte<br>dubbeld. en kortere<br>getijden ( $m = 1,28$ ). | Enkeld.<br>$O + (\frac{1}{2} \text{ à } \frac{3}{4}) K_1$ . | Afw.<br>middenst.<br>October. | $A_0$ | Hoogste<br>stand. |
|--------------------|--|---|-------------------------------|-------|-------------------|
| Helder . .         | 63   | 12  | 8                             | -13   | 70                |
| den Oever .        | 40   | 9   | 7                             | - 8   | 48                |
| Piaam. . .         | 41   | 7   | 7                             | - 3   | 52                |
| Zurig . . .        | 62   | 9   | 7                             | - 5   | 73                |
| Harlingen .        | 73   | 10  | 8                             | - 5   | 86                |
| Vlieland . .       | 92   | 10  | 8                             | -12   | 98                |

Het gevonden getal voor Vlieland is om dezelfde reden als bij het gemiddelde hoogwater te groot; overigens geven de uitkomsten de maat aan, tot welke de waterstand zonder windeffect nu en dan kan stijgen. Dat een enkele maal een nog iets hoogere stand kan voorkomen is in § 65, *a* vermeld. Ook de factor  $m$  kan een enkele maal grooter dan 1,28 zijn: op 12/13 Maart 1906 was hij b.v. 1,336. Een uiterste is in dit opzicht wel het getij van 23 September 1922, toen  $m$  te Harlingen 1,385 en te Helder zelfs 1,390 was. De bereikte standen waren dien dag op deze beide plaatsen 86 en 59 cm + N.A.P., de berekende hoogten 86 en 65 cm.

De afwijking te Helder wordt veroorzaakt door den verkeerden vorm dien in de berekende kromme de eerste vloedkop heeft; in werkelijkheid is die wat lager, waaruit volgt dat ook de berekende hoogste stand van 70 cm + N.A.P. voor die plaats eenige centimeters te hoog is.

Bij afgesloten Zuiderzee kan dezelfde berekening worden uitgevoerd. Wat over het samentreffen van de getijden bij open Zuiderzee is gezegd gaat nu ook op: de fasen van de verschillende partieele getijden veranderen zoo weinig dat er practisch geen verschil komt in de mogelijkheden en de data van samenvallen en tegenwerken.

Als uitgangspunt dienen nu de getijconstanten en de middenstand bij afgesloten Zuiderzee.

Deze uitkomsten zijn in § 47 vermeld en vergeleken met die bij open Zuiderzee; zij zijn gebruikt bij de berekeningen volgens de eerste methode (§ 65).

| Afgesloten<br>Zuiderzee. | Max. versterkte<br>dubbeld. en kortere<br>getijden ( $m = 1,28$ ). | Enkeld.<br>$0 + (\frac{1}{2} \text{ à } \frac{3}{4}) K_1$ . | Afw.<br>middenst.<br>October. | $A_0$ | Hoogste<br>stand. |
|--------------------------|--|---|-------------------------------|-------|-------------------|
| Helder . . .             | 56   | 13  | 8                             | -13   | 64                |
| den Oever . .            | 80   | 14  | 7                             | - 9   | 92                |
| Piaam. . . .             | 88   | 15  | 7                             | - 8   | 102               |
| Zurig . . . .            | 95   | 14  | 7                             | - 8   | 108               |
| Harlingen . .            | 97   | 12  | 8                             | - 6   | 111               |
| Vlieland . . .           | 96   | 11  | 8                             | -12   | 103               |

Dat de hoogste stand te Helder lager is dan bij open Zuiderzee is een fout van de berekeningsmethode. De verkeerd weergegeven eerste vloedkop bevatte bij open Zuiderzee het hoogste punt; nu echter niet meer. Men kan voor Helder alleen de conclusie trekken dat er geen sprake is van een verhooging van de astronomische standen van eenig belang.

## BEPALING VAN DE CONSTANTE VAN EYTELWEIN (§ 14).

Het verhang werd bepaald tusschen Helder (registreerende peilschaal) en Oude Schild (waarnemingen aan de gewone peilschaal in de haven), afstand 10 700 m. Aan het waargenomen hoogteverschil moeten de volgende correcties worden aangebracht:

*a. Voor de aardrotatie.* Helder ligt rechts van de richting van den vloedstroom, Oude Schild links. Bij vloedstroom wijst de peilschaal te Helder dus hooger dan de stand in de as van het zeegat, die te Oude Schild lager dan in het midden van den Texelstroom. De afstand tot de as van den stroom is op beide plaatsen ongeveer een kilometer; de stroomsnelheden, die de grootte van de correctie bepalen, kunnen met behulp van de uurkaartjes van bijlage 12 met voldoende nauwkeurigheid worden afgeleid. De grootte van de correctie is met deze gegevens te bepalen (§ 33).

*b. Voor de snelheidshoogte  $\frac{v^2}{2g}$*  (kracht van BERNOULLI). In het zeegat wordt door de kracht van BERNOULLI de stand ongeveer met  $\frac{v^2}{2g}$  verlaagd. Daarbij is  $v$  de gemiddelde snelheid die op het beschouwde oogenblik in het zeegat bestaat en die ligt tusschen de bij Kaaphoofd in 42 meter diepte en meer naar het Oosten in 24 meter gemeten snelheid; deze snelheden zijn uit de uurkaartjes van bijlage 12 af te lezen. Bij Oude Schild is de toestand eenigszins anders: door de aanwezigheid van een uitgestrekt wateroppervlak met kleine stroomsnelheden aan de overzijde van den Texelstroom wordt de uitwerking van de kracht van BERNOULLI belangrijk verminderd.

Men kan dit met behulp van de reciprociteitsstelling (§§ 39 en 133) berekenen en vindt dan dat in een dergelijk geval de verlagende invloed ongeveer de helft is van  $\frac{v^2}{2g}$ . De stroomsnelheid  $v$  bij Oude Schild kon gedeeltelijk dadelijk uit de metingen worden genomen; voor de dagen waarop het meetvaartuig niet bij die plaats was verankerd moesten de kaartjes van bijlage 12 weder worden gebruikt.

*c. Voor de centrifugaalkracht.* Bij Oude Schild vertoont de Texelstroom een buigpunt, er treedt hier dus geen centrifugaalkracht op. Bij Helder daarentegen zijn de stroomlijnen gebogen met de bolle zijde naar de Helderse kust. De kromtestraal  $r$  volgt uit de waarneming dat de stroomrichting, die bij Kaaphoofd OtN is, over ruim vijf kilometer  $30^\circ$  in richting verandert. De grootte van  $v^2$  is dezelfde die bij de bepaling van de kracht van BERNOULLI werd gebruikt. Het quotient  $\frac{v^2}{r}$  moet nog worden gedeeld door de versnelling  $g$  van de zwaartekracht en vermenigvuldigd met de halve breedte van het zeegat.

Van de drie correcties is de tweede het grootst, de laatste is bijna te verwaarloozen; hun gezamenlijke waarde is bij de uitgevoerde metingen niet grooter geweest dan 7 cm.

Van de reeksen van metingen zijn er slechts twee die voor de bepaling van  $C$  hebben kunnen dienen. De meeste keeren kon de stroommeting door het opsteken van wind niet lang genoeg worden doorgezeten.

Ook is eenige malen van een gunstige gelegenheid niet voldoende gebruik gemaakt, omdat men toen nog niet goed inzag hoe de meting het best kon worden gedaan.

Bij de twee gebruikte series is gemeten met den JACOBSEN-stroommeter (§ 12), het instrument van EKMAN werd voor contrôle gebruikt. Uit den oppervlaktestroom (drijvers), den gemeten stroom op 1, 5, 10, 15, 20, 25 (en 30) m diepte en zoo dicht mogelijk bij den bodem is telkens de gemiddelde stroomsnelheid over de volle diepte afgeleid, die als  $v$  in de tabellen is vermeld.

De meting geschiedde elk half uur, de verandering per tijdseenheid  $\frac{\partial v}{\partial t}$  is gelijk gesteld aan het verschil van de vorige en de volgende meting, gedeeld door 3600. Het met de versnelling overeenkomende verhang  $i_a$  is  $\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$  (zie tabel 2, § 14).

De metingen waarbij de versnellingsterm een overwegende rol speelt zijn uitgeschakeld, de andere zijn behandeld als waarnemingen van gelijk gewicht.

Om de bij vloed en bij eb gemeten constanten onderling gelijk te maken moest beide malen een positieve correctie aan het verhang worden aangebracht (zie de voorlaatste regels van onderstaande tabellen). Wanneer alle hoogtecorrecties juist waren en de opwaaiing was geheel te verwaarloozen, zou dit beteekenen dat de peilschaal te Oude Schild 1 à 2 cm te hoog aanwijst.

Men zou de metingen kunnen beschouwen als een waterpassing over het water (§ 16) die dan een verschil van 1 à 2 cm geeft met de waterpassing „door de lucht” (§ 15, bijlage 5). Het is duidelijk dat bij de grootte die de hoogtecorrecties in dit geval hebben de methode niet op groote nauwkeurigheid aanspraak kan maken. Het verschil verdwijnt, wanneer men b.v. voor de BERNOULLI-correctie te Oude Schild niet, zooals bij  $b$  is gedaan,  $\frac{1}{2} \frac{v^2}{2g}$  maar  $\frac{1}{3} \frac{v^2}{2g}$  zou nemen. Intusschen zou dit op de gevonden waarde van  $C$  practisch geen invloed hebben.

De beide metingen volgen hieronder.

### 1. Stroommeting op 18 Augustus 1921 dwars van Oude Schild.

$$q = 33 \text{ m}$$

| Amsterdamsche tijd.             | 5½  | 6     | 6½    | 7    | 7½   | 8     | 8½    | 9     | 9½    | 10    | 10½   | 11    | 11½   | 12    | 12½   | 1     | 1½   |
|---------------------------------|-----|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Snelheid $v$ . . . . .          | 102 | 99    | 98    | 88   | 86   | 64    | 35    | 10    | -10   | -44   | -78   | -95   | -104  | -117  | -109  | -119  | -121 |
| Stand Helder $H$ . . .          | —   | +28   | +30   | +32  | +30  | +24   | +15   | -3    | -19   | -37   | -52   | -62   | -70   | -78   | -86   | -94   | —    |
| Stand Oude Schild $O$ .         | —   | +19   | +24   | +28  | +31  | +31   | +26   | +17   | +2    | -13   | -25   | -35   | -44   | -54   | -65   | -73   | —    |
| Verval $H-O$ . . . . .          | —   | +9    | +6    | +4   | -1   | -7    | -11   | -20   | -21   | -24   | -27   | -27   | -26   | -24   | -21   | -21   | —    |
| Correctie CORIOLIS. . .         | —   | -2    | -2    | -2   | -2   | -2    | -1    | 0     | 0     | +1    | +2    | +2    | +3    | +3    | +3    | +3    | —    |
| „ BERNOULLI. . . . .            | —   | +4    | +3    | +2   | +2   | +1    | +2    | +2    | +4    | +5    | +5    | +4    | +4    | +3    | +2    | +1    | —    |
| „ centrifugaalkr. . . . .       | —   | 0     | 0     | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | —    |
| Gecorrigeerd verval . . .       | —   | +11   | +7    | +4   | -1   | -8    | -10   | -18   | -17   | -18   | -20   | -22   | -20   | -19   | -17   | -18   | —    |
| $i \times 10^6$ . . . . .       | —   | +10,3 | +6,5  | +3,7 | -0,9 | -7,5  | -9,3  | -16,8 | -15,9 | -16,8 | -18,7 | -20,5 | -18,7 | -17,7 | -15,9 | -16,8 | —    |
| $i_a \times 10^6$ . . . . .     | —   | -0,8  | -3,1  | -3,4 | -6,8 | -14,4 | -15,3 | -12,8 | -15,3 | -19,3 | -14,5 | -7,4  | -6,2  | -1,4  | -0,6  | -3,4  | —    |
| $i_w \times 10^6$ . . . . .     | —   | +11,1 | +9,6  | +7,1 | +5,9 | +6,9  | +6,0  | -4,0  | -0,6  | +2,5  | -4,2  | -13,1 | -12,5 | -16,3 | -15,3 | -13,4 | —    |
| $(i_w + 1) \times 10^6$ . . . . | —   | +12,1 | +10,6 | +8,1 | +6,9 | +7,9  | +7,0  | -3,0  | +0,4  | +3,5  | -3,2  | -12,1 | -11,5 | -15,3 | -14,3 | -12,4 | —    |
| $C$ . . . . .                   | —   | 494   | 520   | 537  | —    | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 474   | 532   | 519   | 501   | 588   | —    |

gem. 517

gem. 523

$$C = 520$$

2. Stroommeting op 10 Juli 1923 dwars van directiekeet Prins-Hendrikpolder.

$$q = 25\frac{1}{2} \text{ m}$$

| Amsterdamsche tijd.                                      | 4½   | 5     | 5½     | 6      | 6½     | 7      | 7½     | 8      | 8½     | 9      | 9½     | 10     | 10½    | 11    | 11½    | 12     | 12½    | 1      | 1½     | 2      | 2½    | 3      | 3½     | 4    |
|--|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------|
| Snelheid <i>v</i> . . . . .                              | + 58 | + 46  | + 39   | 0      | - 25   | - 51   | - 66   | - 85   | - 92   | - 96   | - 92   | - 88   | - 99   | - 76  | - 75   | - 38   | 0      | + 35   | + 75   | + 83   | + 89  | + 93   | + 90   | + 83 |
| Stand Helder <i>H</i> . . .                              | —    | + 4   | - 2    | - 14   | - 28   | - 44   | - 56   | - 65   | - 70   | - 73   | - 77   | - 78   | - 77   | - 70  | - 55   | - 26   | 0      | + 18   | + 24   | + 27   | + 28  | + 29   | + 29   | —    |
| Stand Oude Schild <i>O</i> .                             | —    | + 12  | + 9    | + 2    | - 7    | - 22   | - 33   | - 43   | - 49   | - 54   | - 58   | - 63   | - 64   | - 65  | - 56   | - 43   | - 19   | + 1    | + 14   | + 19   | + 21  | + 21   | + 23   | —    |
| Verval <i>H-O</i> . . . . .                              | —    | - 8   | - 11   | - 16   | - 21   | - 22   | - 23   | - 22   | - 21   | - 19   | - 19   | - 15   | - 13   | - 5   | + 1    | + 17   | + 19   | + 17   | + 10   | + 8    | + 7   | + 8    | + 6    | —    |
| Correctie CORIOLIS. . .                                  | —    | - 1   | - 1    | 0      | + 1    | + 1    | + 2    | + 2    | + 2    | + 2    | + 2    | + 2    | + 2    | + 2   | + 2    | + 1    | + 0    | - 1    | - 2    | - 2    | - 2   | - 2    | - 2    | —    |
| „ BERNOULLI . . . . .                                    | —    | + 1   | 0      | + 1    | + 2    | + 4    | + 5    | + 5    | + 4    | + 4    | + 3    | + 2    | + 1    | + 1   | 0      | + 2    | + 5    | + 6    | + 6    | + 5    | + 5   | + 4    | + 4    | —    |
| „ centrifugaalkr. . . . .                                | —    | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | - 1    | - 1    | - 1    | - 1    | - 1    | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | - 1   | - 1    | - 1    | —    |
| Gecorrigeerd verval . . .                                | —    | - 8   | - 12   | - 15   | - 18   | - 17   | - 16   | - 15   | - 16   | - 14   | - 15   | - 12   | - 11   | - 2   | + 3    | + 20   | + 24   | + 22   | + 14   | + 11   | + 9   | + 9    | + 7    | —    |
| <i>i</i> × 10 <sup>6</sup> . . . . .                     | —    | - 7,5 | - 11,2 | - 14,0 | - 16,8 | - 15,9 | - 14,9 | - 14,0 | - 14,9 | - 13,1 | - 14,0 | - 11,2 | - 10,3 | - 1,9 | + 2,8  | + 18,7 | + 22,5 | + 21,6 | + 13,1 | + 10,3 | + 8,4 | + 8,4  | + 6,5  | —    |
| <i>i</i> <sub>a</sub> × 10 <sup>6</sup> . . . . .        | —    | - 5,4 | - 13,0 | - 18,1 | - 14,4 | - 11,6 | - 9,6  | - 10,2 | - 3,1  | 0      | + 2,3  | - 2,0  | + 3,4  | + 6,8 | + 10,7 | + 21,1 | + 20,6 | + 21,2 | + 13,6 | + 4,0  | + 2,8 | + 0,3  | - 2,8  | —    |
| <i>i</i> <sub>w</sub> × 10 <sup>6</sup> . . . . .        | —    | - 2,1 | + 1,8  | + 4,1  | - 2,4  | - 4,3  | - 5,3  | - 3,8  | - 11,8 | - 13,1 | - 16,3 | - 9,2  | - 13,7 | - 8,7 | - 7,9  | - 2,4  | + 1,9  | + 0,4  | - 0,5  | + 6,3  | + 5,6 | + 8,1  | + 9,3  | —    |
| ( <i>i</i> <sub>w</sub> + 2) × 10 <sup>6</sup> . . . . . | —    | - 0,1 | + 3,8  | + 6,1  | - 0,4  | - 2,3  | - 3,3  | - 1,8  | - 9,8  | - 11,1 | - 14,3 | - 7,2  | - 11,7 | - 6,7 | - 5,9  | - 0,4  | + 3,9  | + 2,4  | + 1,5  | + 8,3  | + 7,6 | + 10,1 | + 11,3 | —    |
| <i>C</i> . . . . .                                       |      |       |        |        |        |        |        |        | 580    | 569    | 480    | 651    | 573    |       |        |        |        |        |        | 570    | 639   | 579    | 529    | —    |

gem. 571

gem. 579

$$C = 575$$

## DE WATERPASSING VAN HELDER NAAR TERSCHELLING (§ 15).

1. *Inleiding.* Het werk is in den zomer van 1922 grotendeels uitgevoerd door personeel van den Algemeenen Dienst van den Rijkswaterstaat, onder leiding van den heer Ir. W. SCHERMERHORN <sup>1)</sup>, die daartoe als deskundige aan de Staatscommissie werd toegevoegd.

De aansluitingspunten voor deze waterpassing waren eenerzijds het oude hoofdmerk in de Koopvaardersschutsluis te Helder en anderzijds een in 1921 geplaatste ronde bout in den vuurtoren „Brandaris” te West-Terschelling.

De moeilijkheid bij de waterpassing van dit sluitstuk van den kring rondom de Zuiderzee is gelegen in den overgang over de drie zeegaten Helseur, Eierlandsche gat en Vlie. Daarover handelt deze bijlage dan ook hoofdzakelijk.

De bij vorige overgangen ondervonden bezwaren waren de volgende:

*a.* Het elimineeren van den invloed der ontregelingsfouten van de instrumenten door standplaatsverwisseling is niet afdoende, daar deze fouten tengevolge van allerlei oorzaken vrij willekeurig en plotseling kunnen veranderen.

*b.* De invloed der atmosferische refractie is tamelijk groot, verandert op onregelmatige wijze en verloopt doorgaans niet symmetrisch van *A* naar *B* en van *B* naar *A*. Het onderzoek naar deze asymmetrie is in de gegeven omstandigheden niet streng door te voeren.

*c.* De meteorologische omstandigheden beperken het aantal uren dat men kan waarnemen.

Zonder in te gaan op alle andere mogelijke werkwijzen met hun voor- en nadeelen worden hier de methoden vermeld, die gekozen zijn met het oog op bovengenoemde bezwaren.

2. *Opzet der metingen.* Het elimineeren van den invloed der ontregelingsfouten geschiedt op de eenvoudigste wijze door het meten met een instrument met reversieniveau bij twee standen van den kijker. De hoek tusschen richtlijn en vizierlijn behoeft dan slechts constant te zijn gedurende den tijd die verloopt tusschen de metingen bij de beide kijkerstanden. Om een eventueelen hoek tusschen de richtlijnen onschadelijk te maken moet het niveau na ieder paar waarnemingen op den kijker omgezet worden. De mogelijkheid hiertoe heeft men in het z.g. compensatie-reversieniveau van BREITHAUPT. De gebruikte instrumenten van F. W. BREITHAUPT & SOHN te Cassel hadden zulke niveau's gemonteerd op een kijker met 510 mm brandpuntsafstand, 41 mm objectief en 40-voudige vergrooting.

Het is bekend dat de grootte der refractie in sterke mate afhangt van het verschil in temperatuur van de lucht en de onderliggende aardoppervlakte, hetzij land of water. Aangezien de refractie onschadelijk is, indien deze symmetrisch werkt, zal men de standplaatsen zóó hebben te kiezen, dat men met groote waarschijnlijkheid kan aannemen dat bovengenoemd temperatuurverschil of hetzelfde is langs de verbindingslijn der twee waarnemingsstations, of ten minste een symmetrisch verloop heeft.

<sup>1)</sup> Thans Professor Ir. W. SCHERMERHORN.

Practisch wil dit zeggen, dat de intrekkende vloedstroomen en de uittrekkende ebstroomen beide symmetrisch moeten loopen ten opzichte van de middelloodlijn van de lijn van waarneming. Hoewel dit nooit mathematisch zuiver zal zijn te krijgen, is hieraan toch zóóveel waarde te hechten, dat men desnoods een grooteren afstand der twee waarnemingstations aanvaardt, indien ten naasten bij aan deze voorwaarde kan worden voldaan. Daar verder het water ten allen tijde een grootere gelijkmatigheid biedt dan de vaste wal, moet men de standplaatsen der instrumenten zoo dicht mogelijk aan de lijn van hoogwater plaatsen en dan nog op een flinke hoogte boven het strand.

Als markant punt in de uitvoering dezer overgangen valt te vermelden dat de gelijktijdige wederkeerige waarnemingen zijn gedaan aan 4 instrumenten, waarvan er 2 op ieder station op een onderlingen afstand van 0,30 m, en 3,50 m boven hoogwater op den kop van één koningspaal waren opgesteld.

De voordeelen hiervan zijn in de eerste plaats dat men fouten tengevolge van slechte waarnemingen en eigenaardigheden van de instrumenten kan onderscheiden van variaties in de aflezingen tengevolge van verandering der refractie.

Verder krijgt men aldus eenig inzicht in het verloop der refractie, terwijl het den waarnemers een zeker zelfvertrouwen geeft en hen tot nauwkeurigheid aanspoort.

Als meetmethode is om verschillende redenen gekozen die volgens COHEN STUART, waarbij men den kijker instelt op een punt van de baak en de beluiteinden van het niveau afleest. In de eerste plaats verkrijgt men daarmee een kleinere middelbare fout in de enkele aflezing dan b.v. door het aflezen bij inspelende bel. Neemt men daarbij op het diafragma van den kijker 2 horizontale draden, waartusschen men een zwart vak van de baak instelt, dan heeft men van ondulatie weinig hinder en vergroot aldus het aantal uren per dag waarop gemeten kan worden. Bij deze overgangen is dientengevolge ook midden op den dag bij fellen zonnenschijn met goed gevolg waargenomen. Dit was echter nog niet mogelijk geweest, indien de baken niet uit platen matglas hadden bestaan, waarop in zwarte verf 4 vakken waren aangebracht. Ook bij waarnemen tegen de zon in teekenden deze vakken zich scherp af tegen het doorvallende licht. Van de 3 overgangen waren de zwarte vakken resp. 10, 10 en 30 cm, op afstanden hart op hart van resp. 30, 30 en 80 cm. De breedte dier vakken was 50 cm.

Er werd op 3 vakken ingesteld met niveau boven en onder den kijker en dat werd in omgekeerde volgorde herhaald. Deze aflezingen vormen samen één „stel” van 2 volledige „waarnemingen” en vier stellen vormen één „serie”.

Om de constante fouten tengevolge van den invloed van waarnemers, instrumenten en de plaats van deze te elimineeren, zijn in 8 op elkander volgende series de plaats van waarnemers en instrumenten geheel symmetrisch gevarieerd. Deze 8 series vormen een volledige „overgang”. Men ziet dus, dat het overvaren der instrumenten wel behouden is, doch de beteekenis er van is door het gebruik van het reversieniveau geheel gewijzigd.

3. *Berekeningen.* De herleiding van de niveau-aflezingen tot aflezingen bij inspelende bel op de baak is in duplo geschied. De eerste berekening is direct na de metingen in de meetregisters uitgevoerd, zonder de hoekwaarde der niveau's te gebruiken.

De tweede berekening is later in afzonderlijke rekencahiers gemaakt, uitgaande van de te voren bepaalde hoekwaarde der niveau's. In de rekencahiers zijn uit deze aflezingen en uit plaatselijke hulpwaarnemingen de eenzijdig gemeten hoogteverschillen  $h$  afgeleid. Noemt men de standplaatsen  $A_L$ ,  $A_R$ ,  $B_L$  en  $B_R$ , dan zijn in de cahiers  $A_L$  en  $B_L$  berekend de hoogteverschillen  $H_1$  en  $H_2$ , waarbij  $h$  uit  $B_R$ , resp.  $A_R$  werd overgenomen. In de cahiers  $A_R$  en  $B_R$  is  $h$  uit  $B_L$  resp.  $A_L$  overgenomen en het verschil

in  $h$  voor de naast elkaar staande instrumenten berekend. Met het oog op constante fouten is dit verschil  $v$  verminderd met de gemiddelde waarde er van per serie; de overblijvende schijnbare fout is  $y$ . Thans kan men op 3 wijzen een middelbare fout in de enkele „waarneming” berekenen en wel:

1<sup>o</sup>. Uit de verschillen der naast elkaar staande instrumenten:

$$m_v^2 = \frac{[y y]}{2(n-1)}.$$

2<sup>o</sup>. Uit de eenzijdig gemeten hoogteverschillen in iedere serie:

$$m_h^2 = \frac{[x_h x_h]}{n-1}.$$

3<sup>o</sup>. Uit de schijnbare fouten  $x_H$  in bovengenoemde hoogteverschillen  $H_1$  en  $H_2$  per serie:

$$m_H^2 = \frac{[x_H x_H]}{\frac{1}{2}(n-1)}.$$

Hierin is  $n$  het aantal waarnemingen per serie, d. i. 8.

Deze drie middelbare fouten geven eenigen kijk op het verloop der refractie in iedere serie. Immers, in  $m_v$  komt de invloed er van in het geheel niet tot uiting, in  $m_h$  daarentegen tot het volle bedrag der verandering er van gedurende de serie, terwijl eindelijk in  $m_H$  het gedeelte van die verandering zich doet gevoelen, dat in het gemiddelde der wederkerige waarnemingen niet is geëlimineerd. In ideale omstandigheden is  $m_H = m_v$  en is nu  $m_H$  zeer veel grooter dan  $m_v$  dan wijst dat op een onsymmetrisch verloop der refractie. Aldus krijgt men, dank zij het gebruik van een dubbel stel instrumenten nog eenig inzicht in de betrouwbaarheid der resultaten.

Om de middelbare fout in het eindresultaat te vinden, moet men niet uitgaan van de enkele waarneming, omdat daarin alle foutenbronnen, die gedurende een serie constant zijn, uitgeschakeld zijn. Deze fout is op twee andere manieren berekend, nl. uit de resultaten der volledige overgangen van 8 series en door bij elkander te nemen alle series met dezelfde plaats der instrumenten. De laatste methode is niet geheel juist, omdat men daarbij aanneemt dat alleen de instrumenten constante fouten tot gevolg hebben, maar het heeft als voordeel dat men de m.f. berekent uit een grooter aantal gegevens.

4. *Vastlegging.* Reeds in 1921 waren ter weerszijden van iederen overgang in den grond betonpalen aangebracht van 60 cm middellijn met een lengte van meerdere meters, afhankelijk van de terreingesteldheid. In het bovenvlak is een bronzen bout ingelaten, die zich ongeveer 40 cm onder het maaiveld bevindt. De waarde van zulk een hoogtemerk, hoe goed ook opgesteld, zal zeer gering zijn, zoolang geen andere merken aanwezig zijn ter vergelijking. Een aantal van b.v. 6 gewone bouten in goede bouwwerken op een lijn van 1 km lengte, die aldus te zamen de ligging van het vergelijkingsvlak bepalen, schijnt te verkieszen boven dure geïsoleerde merken. Hier had men echter niet overal bouwwerken in de nabijheid, zoodat men voor eenige punten wel op kunstmatige merken was aangewezen.

5. *Uitvoering.* De metingen werden begonnen 29 Mei 1922 in Helder en eindigden 9 September 1922.

De moeilijkste overgang, d. i. die over het Vlie is het laatst uitgevoerd ten einde bij de beide andere nog ervaringen te kunnen opdoen. Onderstaande kleine tabel geeft een overzicht van de uitvoering van de overgangen.

| Overgang.                  | Begin.  | Einde.             | Aantal meet-dagen. | Aantal series. | Slaglengte in m. |
|----------------------------|---------|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Helsdeur . . . . .         | 31 Mei  | 9 Juni             | 5                  | 22             | 2158,89          |
| Eierlandsche gat . . . . . | 23 Juni | 13 Juli            | 11                 | 40             | 2273,37          |
| Vlie . . . . .             | 17 Aug. | <del>17 Aug.</del> | 13                 | 58             | 6155             |

Bij de eerste twee overgangen vond de gemeenschap tusschen de twee stations uitsluitend plaats door middel van seinvlaggen, bij die over het Vlie met de lastige communicatie was er ook radio-telegrafische verbinding aanwezig.

Ten einde de invloed der refractie zooveel mogelijk een toevallig karakter te geven, zijn de metingen over minstens 5 verschillende dagen verdeeld. Daarbij is dan nog gemeten onder de meest verschillende weersomstandigheden en op elk tijdstip van den dag.

6. *Uitkomsten.* Bij de berekening is de meeste zorg besteed aan de bepaling van de betrouwbaarheid van het gevonden hoogteverschil van de merken op ieder waarnemingstation. Daarom werd op verschillende manieren de middelbare waarde der toevallige fouten berekend en werd een onderzoek ingesteld om eventueele regelmatige fouten op te sporen. Dit laatste is voor den overgang over het Vlie scherp doorgevoerd; het groote belang er van rechtvaardigt volkomen de groote hoeveelheid rekenarbeid die dit met zich brengt.

Bij den overgang over de Helsdeur zijn ter berekening van de m. f. in het eindresultaat geen volledige combinaties van 8 series gevormd, omdat het aantal series te gering is. Men heeft de metingen waarbij de instrumenten denzelfden stand hadden als onafhankelijke waarnemingen beschouwd en nam bij elkaar de nummers 2 met 3, en 1 met 4. Noemt men de 4 mogelijke standen der instrumenten I, II, III en IV, dan geeft de volgende tabel de resultaten in die standen in cm.

| Groep.        | $H$            | $[xx]$     |
|---------------|----------------|------------|
| I . . . . .   | 345,93         | 9,7187     |
| II . . . . .  | 343,88         | 11,5984    |
| III . . . . . | 346,76         | 12,5217    |
| IV . . . . .  | 343,36         | 15,3990    |
|               | 344,98         | 49,2378    |
|               | $28 \times 32$ | 0,0534     |
|               |                | $M = 0,23$ |

Merkt men op dat de resultaten der groepen resp. I en II, III en IV met dezelfde instrumenten zijn verkregen, maar verwisseld van station, dan ziet men dat de instrumenten regelmatige fouten vertoonen. Immers, het verschil in  $H$  voor I — II en III — IV is resp. + 2,05 en + 3,40 cm. Dat de gemiddelden dier groepen onderling echter slechts 0,16 cm verschillen is een aanduiding van het feit dat deze fouten werkelijk regelmatig zijn en dus voldoende geëlimineerd worden.

De meest waarschijnlijke waarde van het hoogteverschil  $H$  is volgens de tabel 344,98 cm; voor de middelbare fout  $M$  in die waarde wordt 0,23 cm gevonden.

Aan het Eierlandsche gat zijn wederom zulke combinaties gemaakt, thans echter nr. 1 met nr. 3 en nr. 2 met nr. 4. Verder zijn in alle berekeningen voor dezen overgang de series 1—16 en 17—40 afzonderlijk behandeld omdat na serie 16 de instrumenten geheel uit elkaar zijn genomen en geregeld. Aanleiding hiertoe gaven de eigenaardige, onverklaarde afwijkingen die nr. 4 in de aflezingen gaf, in vergelijking tot het instrument dat er naast was opgesteld. Deze afwijkingen zijn ook te zien in de tabel die het gemiddelde hoogteverschil voor de 4 combinaties geeft.

| Comb.  | <i>H</i> in cm. |        |        |
|--|-----------------|--------|--------|
|  | Series.         | 1—16   | 17—40  |
| I . . . . .                                      |                 | 61,34  | 58,64  |
| II . . . . .                                     |                 | 55,44  | 58,26  |
| $v_1 = \text{II} - \text{I}$ . . . . .           |                 | — 5,90 | — 0,38 |
| III . . . . .                                    |                 | 58,42  | 57,80  |
| IV . . . . .                                     |                 | 58,93  | 58,84  |
| $v_2 = \text{IV} - \text{III}$ . . . . .         |                 | 0,51   | 1,04   |
| $\frac{1}{2} (\text{I} + \text{II})$ . . . . .   |                 | 58,39  | 58,45  |
| $\frac{1}{2} (\text{III} + \text{IV})$ . . . . . |                 | 58,68  | 58,32  |

De invloed van de regeling na serie 16 komt in  $v_1$  wel sterk tot uiting. Toch heeft deze fout ook hier een regelmatig karakter, wat blijkt uit in de gemiddelden der combinaties I en II.

In de thans volgende tabel is gegeven de middelbare fout in cm in het eindgemiddelde van de in kolom 1 genoemde series. In kolom 2 is deze berekend uit de gemiddelde waarde van 2 opeenvolgende series, waarbij de 4 combinaties der 4 instrumenten als onafhankelijk zijn beschouwd. De waarde uit kolom 5 is gevonden uit de 4 gemiddelden dier combinaties en is dus niet zeer betrouwbaar. In kolom 3 is uitgegaan van de 10 volledige overgangen, ieder van 8 series, terwijl in kolom 4 daarbij van de 2 gelijktijdig gemeten overgangen het gemiddelde genomen is. Men ziet dat de m.f. in het eindresultaat op 0,18 cm kan worden gesteld.

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1—40  | 0,179 | 0,185 | 0,264 | 0,074 |
| 1—16  | 0,393 | 0,484 |       |       |
| 17—40 | 0,154 | 0,100 | 0,117 |       |

Aangezien aan het Vlie een grooter aantal series is gemeten, konden daaruit zooveel volledige overgangen gevormd worden, dat de berekening van de m.f. in het resultaat er met een voldoende zekerheid uit kon volgen. De combinatie der metingen naar den stand der instrumenten is hier dan ook achterwege gelaten. Er zijn 6 volledige overgangen en nog een overschot van 12 series, die wel geen overgang vormen maar toch als zoodanig behandeld zijn. Uit deze 7 gemiddelden vindt men een m.f. in het resultaat van 0,34 cm. Beschouwt men de combinaties  $A_L$  met  $B_R$  en  $A_R$  met  $B_L$  als onafhankelijke overgangen, dan vindt men voor genoemde m.f. uit 14 overgangen 0,40 cm. Dit resultaat is in verband met de groote slaglengte alleszins bevredigend te achten, immers in hoekmaat komt het overeen met 0",13.

7. *Onderzoek van den invloed der refractie.* In de eerste plaats kan men hieromtrent aanwijzingen krijgen uit de reeds onder 3 genoemde drie berekeningen van de m.f. in de enkele waarnemingen. De resultaten (in cm en in sec) daarvan voor de drie overgangen zijn:

|                 | Helsdeur. |      | Eierlandsche gat. |      | Vlie. |      |
|-----------------|-----------|------|-------------------|------|-------|------|
|                 | cm        | sec  | cm                | sec  | cm    | sec  |
| $m_v$ . . . . . | 1,14      | 1,09 | 0,64              | 0,58 | 2,42  | 0,81 |
| $m_h$ . . . . . | 1,12      | 1,07 | 0,73              | 0,65 | 2,74  | 0,92 |
| $m_H$ . . . . . | 1,10      | 1,05 | 0,65              | 0,59 | 2,08  | 0,70 |

Men ziet dat aan het Eierlandsche gat en aan het Vlie  $m_h$  het grootste is.

Zeer sterk komt ook de ongeoeffendheid van de waarnemers aan de Helsdeur uit, daar de grootere middelbare fout  $m_v$  bezwaarlijk aan een andere oorzaak kan worden toegeschreven. Dit maakt dat men aan de verhouding  $m_v : m_H$  hier betrekkelijk weinig waarde mag hechten. Alleen voor het Eierlandsche gat beantwoorden de cijfers aan de verwachtingen voor het geval dat de verandering der refractie gedurende de meting van één serie volkomen wordt geëlimineerd. Hier schijnen er in de einduitkomst geen regelmatige fouten uit dien hoofde te zijn.

Aan het Vlie heeft men zelfs de eigenaardigheid dat  $m_H$  merkbaar kleiner wordt dan  $m_v$ . Daaruit zou volgen dat de refractieverandering voor de beide naast elkaar staande instrumenten niet dezelfde is, terwijl deze voor de tegenover elkaar staande instrumenten wél geheel of gedeeltelijk gelijk is en uit  $H$  geëlimineerd wordt. Merkt men verder op dat voor station  $A$ , d. i. Vlieland,  $m_v = 2,16$  cm en voor  $B$ , d. i. Noordvaarder,  $m_v = 2,66$  cm is dan blijkt ook daar dat de plaats van opstelling en waarneming toch blijkbaar de m.f. beïnvloedt. Ofschoon hier dus nog wel onzekere factoren te constateeren vallen, kan men ook zien dat de verhouding  $m_v : m_H$  nergens een onsymmetrische verandering der refractie doet vermoeden.

In verband met het feit dat zoowel de kringsluiting rondom de Zuiderzee (die overigens op zich zelf vrijwel zonder waarde zou zijn) als de vergelijking tusschen het berekende resultaat der waterpassing en waarnemingen aan hulpeilschalen aan het Vlie (bijlage 6) tot verschillen van ongeveer 7 cm voerden, is voor den overgang over het Vlie dit onderzoek nog verder uitgestrekt.

Om eenigszins te beoordeelen in hoeverre de refractie symmetrisch is geweest, kan men nagaan hoe het bij verplaatsing in verticale richting van het punt waarop is ingesteld, met de verandering der refractie gesteld is. Richt men op de standplaats  $A$  op drie punten  $P_1, P_2, P_3$  van een in  $B$  geplaatste baak, dan kan men uit de aflezingen afleiden in hoeverre de refractie bij de voortplanting van het licht langs de wegen  $P_1A, P_2A, P_3A$  verschillend is. Aldus leert men de verandering kennen, die de refractie ondergaat als het uiteinde  $B$  van den weg  $BA$  in verticale richting verplaatst wordt. Evenzoo kan men uit waarnemingen op de standplaats  $B$  de verandering der refractie voor den weg  $AB$  bij verticale verplaatsing van het uiteinde  $A$  afleiden.

De voor deze beide veranderingen gevonden waarden verschilden slechts zeer weinig van elkaar; het verschil is zelfs nog kleiner dan dat hetwelk men verkrijgt door de waarden die men voor de twee in  $A$  naast elkander opgestelde instrumenten vond met elkander te vergelijken. Dit is gunstig voor de onderstelling van een symmetrischen luchttoestand.

De gezette discussie der hier bedoelde waarnemingen <sup>1)</sup> heeft het dan ook zeer onwaarschijnlijk gemaakt, dat het bij het Vlie bij de waterpassing en de overbrenging over het water gevonden verschil van 7 cm geheel op rekening der refractie zou kunnen worden gesteld.

8. *Fouten door instrumenten, waarnemers en opstelling.* Na de berekeningen betreffende de refractie is getracht de constante fouten tengevolge van instrument, waarnemer en opstelling te bepalen. Door bepaalde combinaties van de naast elkaar staande instrumenten binnen drie opvolgende series gelukte het deze foutenbronnen van elkander te scheiden. De gemiddelde verschillen in cm voor den geheelen overgang over het Vlie zijn ( $p_1$  enz. wijst den waarnemer aan):

|                                     | A      | B      |
|-------------------------------------|--------|--------|
| $p_2$ (of $p_5$ ) — $p_1$ . . . . . | + 1,32 | + 1,96 |
| $p_4$ — $p_3$ . . . . .             | + 0,64 | + 1,77 |
| Instr. 2 — Instr. 1 . . . . .       | + 2,58 | — 0,25 |
| „ 4 — „ 3 . . . . .                 | + 3,79 | + 4,51 |
| Links—Rechts . . . . .              | — 0,58 | + 0,80 |

Wat den waarnemer  $p_1$  en de instrumenten 3 en 4 betreft, blijken er regelmatige fouten te bestaan, die echter voor beide richtingen gelijk, en dus onschadelijk zijn. Uit de opvolging der teekens blijkt, dat er ook in de overige verschillen wel eenige regelmaat is; maar toch houdt men op beide stations onderling nog verschillen over. Zonder er hier verder op in te gaan zij vermeld, dat het gedeelte van deze fouten dat aldus niet geëlimineerd wordt door de verwisseling, op ten hoogste 1 cm gesteld kan worden, wat met de m.f. van 0,40 cm zeer goed overeenstemt.

Eindelijk zijn de gebruikte niveau's nog grondig onderzocht, zoowel vóór als na de uitvoering der waterpassing. De conclusie waartoe men daarbij kwam is deze, dat tengevolge van het groote aantal waarnemingen, waarbij de instrumenten zich in sterk wisselende omstandigheden bevonden, de fouten in de niveau's practisch geen invloed op de uitkomst hadden. De volgende punten die bij dit onderzoek bleken, verdienen evenwel vermelding:

- 1°. de niveau's waren van goed fabrikaat en zorgvuldig gemonteerd;
- 2°. gedurende de waterpassing in 1922 is de hoekwaarde der niveau's omstreeks 1,5 % kleiner geworden;
- 3°. de bepaling op den verticalen rand van een universaal-instrument leverde de hoekwaarde zonder aan te wijzen oorzaak 1,6 % te klein;
- 4°. De hoekwaarde kan niet berekend worden uit aflezingen op een baak, omdat daarbij de verandering der refractie met de hoogte een merkbare rol speelt;
- 5°. De geheel gedemonteerde glasbuis gaf een 0,2 grootere hoekwaarde, wat bewijst dat de montage niet geheel spanningvrij was.

9. *Invloed van den vorm van de geoïde.* Men zou zich wellicht van het bovengenoemde verschil van 7 cm rekenschap kunnen geven door nauwkeurig na te gaan, welke de hoogteverschillen zijn, die men met de in deze bijlage behandelde waarnemingen bepaalt, en hoe de uitkomsten samenhangen met bijzonderheden in den vorm van de geoïde. Daarbij kan men gebruik maken van de studie over schietloodafwijkingen, die Dr. Ir. F. A. VENING MEINESZ gepubliceerd heeft <sup>2)</sup>. Intusschen zou dat hier te ver voeren en kan worden volstaan met de mededeeling dat gebleken is dat de schietloodafwijkingen in de omgeving van het zeegat van Terschelling

<sup>1)</sup> Literatuuropgave n°. 73.

<sup>2)</sup> „ „ n°. 75.

groot zijn en sterk van punt tot punt veranderen. Het gevolg van deze onregelmatigheid is dat er in de uitkomst van de waterpassing een onzekerheid van verscheidene centimeters ontstaat.

In verband met deze onzekerheid komt men tot het besluit dat de vergelijking der nulpunten van peilschalen door waterpassing bij zeer groote slagwijdte (b.v. meer dan 2 à 3 km) geen aanbeveling verdient. Men zal wanneer de plaatsen van de peilschalen door watervlakten van die breedte van elkander worden gescheiden zijn toevlucht moeten nemen tot de „middenstandmethode” (§ 16).

## DE INVLOED VAN DE ASWENTELING DER AARDE OP DE WATERSTANDEN IN HET VLIË (§ 33).

Naar aanleiding van de waterpassing over het Vlie zijn in October 1922 en April 1923 aan weerszijden van het zeegat waarnemingen van den waterstand verricht. Daartoe werden twee tijdelijke peilschalen opgesteld: één op Vlieland bij strandhoofd 62 en de andere op den Noordvaarder bij strandpaal II 3400. Het doel was om door vergelijking der nulpunten van deze peilschalen volgens de middenstandmethode (zie § 16) een contrôle te verkrijgen op de uitgevoerde waterpassing.

Uit de waarnemingen bleek dat wel is waar de middenstand, over een geheel getij genomen, aan weerszijden op dagen zonder wind dezelfde was, doch dat de getijlijnen onderling systematische verschillen vertoonden. Van 2½ à 3 uur vóór tot ongeveer 2 uur na hoogwater (dat ter plaatse ruim 5 uur vóór maansdoorgang valt) was de waterstand op Vlieland hooger; vóór en na deze periode waren de verschillen gedurende een zeker tijdsverloop zeer gering, terwijl in den overigen tijd de stand aan de Terschellingsche zijde het hoogst was. Dientengevolge is het tijverschil aan de peilschaal op Vlieland aanmerkelijk grooter dan bij den Noordvaarder.

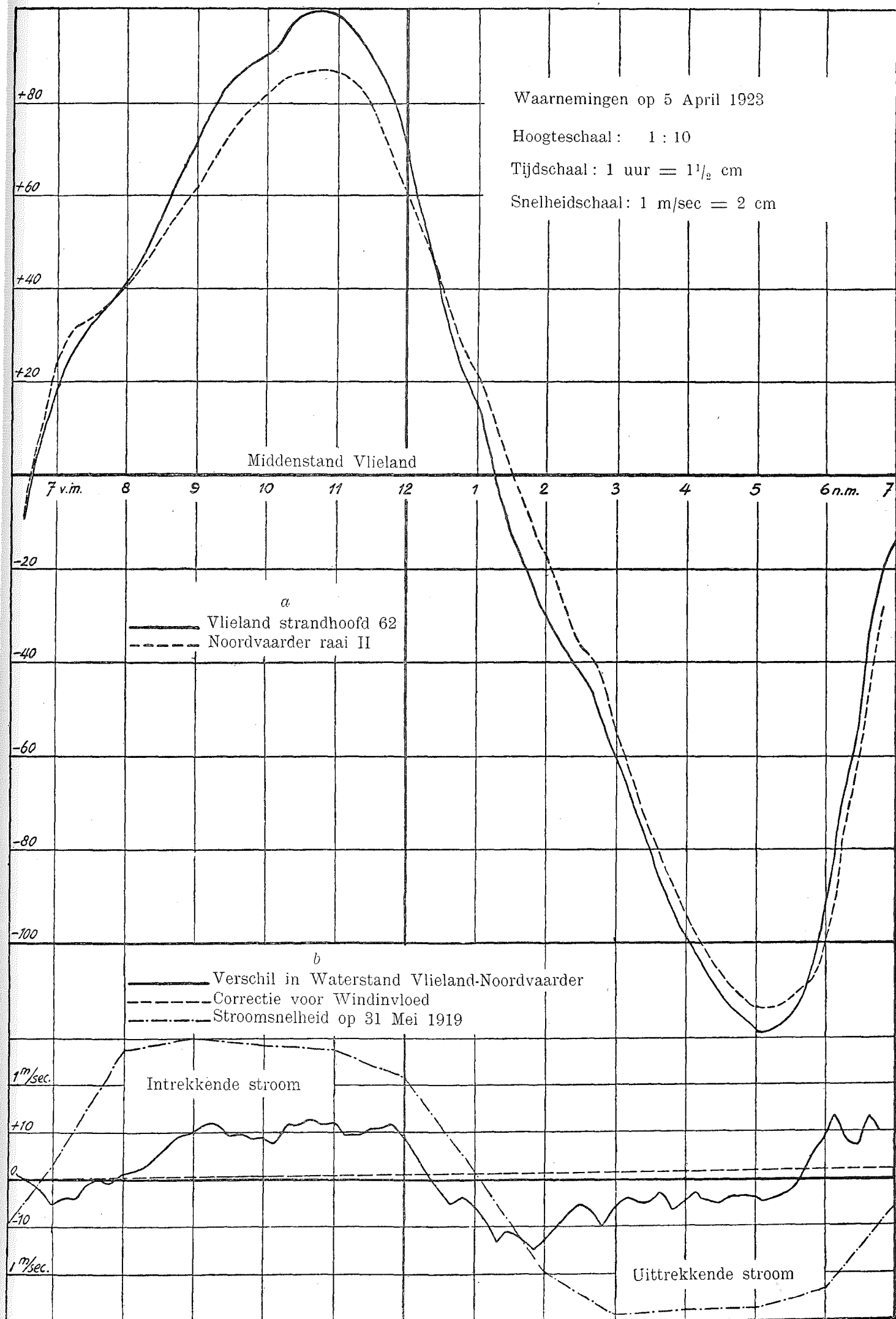
De beide beschouwde punten liggen nagenoeg volkomen symmetrisch ten opzichte van het tusschengelegen zeegat (om deze reden is bij de waterpassing de slag over het Vlie tusschen deze punten gelegd, zie bijlage 5), en andere oorzaken dan de aardrotatie voor een regelmatig verschil in waterstand zijn dus zoo goed mogelijk uitgeschakeld.

Uit de stroomkaartjes van bijlage 12 kan worden afgelezen dat de stroom in het zeegat intrekking is van 9 uur tot 3 uur vóór maansdoorgang: dus van bijna 4 uur vóór tot ruim 2 uur na het hoogwater ter plaatse. De waarnemingen leeren dus dat bij intrekkingen stroom een dwarsverhang van Vlieland naar Terschelling bestaat, terwijl bij uittrekkingen stroom de waterstand aan den Noordvaarder hooger is dan aan de Vlielandsche zijde, juist zooals wgens de Corioliskrachten moest worden verwacht.

Als voorbeeld is hier gegeven een voorstelling van de waarnemingen op 5 April 1923. Het was toen nagenoeg springtij, zoodat de verschijnselen sterk spreken. Rekening moet daarbij worden gehouden met den op dien dag vrij krachtigen en veranderlijken wind (de sterkte was 5 à 6 BEAUFORT, terwijl de richting varieerde van OZO bij het begin tot OtN bij het eindigen der waarnemingen.) Daardoor werd een opwaaiing van Terschelling naar Vlieland veroorzaakt, welker grootte volgens formule (23) gedurende de waarnemingsperiode van 0 tot 2 cm toenam, en gemiddeld 1 cm bedroeg. In figuur 67,*a* vertoont dientengevolge de kromme voor Vlieland een middenstand welke 1 cm hooger ligt dan die van de andere getijlijn.

De verschillen tusschen deze beide krommen zijn geteekend in figuur 67,*b*. Een deel hiervan, voorgesteld door de gestreepte rechte lijn, moet worden toegeschreven aan de geleidelijk toenemende opwaaiing, zoodat de verschillen tengevolge van de kracht van CORIOLIS worden aangegeven door de ordinaten tusschen de getrokken en de gestreepte lijn.

In dezelfde figuur is ook aangegeven de waargenomen stroomsnelheid op 31 Mei 1919 (toen het getij iets sterker was dan op 5 April 1923) in een meer naar binnen gelegen punt van het zeegat. De bovenvermelde overeenstemming treedt hierbij duidelijk aan den dag.



Figuur 67.

Ook de grootte van het verschil klopt bevredigend met de theorie. Op de ongeveer 6,1 km breede watervlakte tusschen de beide punten moet een snelheid van  $v$  cm/sec, een dwarsverval doen ontstaan van:

$$\frac{4 \pi \times v \times \sin 53^{\circ} 20' \times 610\,000}{24 \times 60 \times 60 \times 981,2} = 0,073 v \text{ cm.}$$

Een maximum snelheid van 150 cm/sec, zooals onder de gegeven omstandigheden ongeveer zal zijn voorgekomen, zou dus een maximum waterstandsverschil hebben moeten veroorzaken van 11 cm.

De geconstateerde maximum verschillen bedragen 12 en 16 cm.

Dat het waargenomen dwarsverval op verscheidene oogenblikken eenigszins afwijkt van hetgeen verwacht zou worden, behoeft niet alleen aan de bij de vrij woelige zee onvermijdelijke waarnemingsfouten te worden geweten. Ook het feit dat de stroomrichting niet steeds overal loodrecht op de verbindingslijn der beide peilschalen zal staan, zooals bij de formule is aangenomen, kan merkbare afwijkingen ten gevolge hebben.

In elk geval is de gevonden overeenstemming zoodanig, dat deze waarnemingen ongetwijfeld een uitstekende bevestiging leveren van de omtrent den invloed der aardrotatie in het verslag voorkomende beschouwingen.

## UITVOERING VAN EEN GETIJBEREKENING (§ 46).

De formules (123) (§ 142) voor de geulconstanten moeten daartoe zoodanig worden vervoemd, dat de factoren waarmede  $h_0$  en  $s_0$  in (122) moeten worden vermenigvuldigd om  $h_1$  en  $s_1$  te vinden, gemakkelijk kunnen worden berekend.

Hierbij komt het allereerst aan op de bepaling van de waarde van  $u$ , die in het meest algemeene geval wordt gegeven door (120):

$$u^2 = \frac{b_0 n}{\Sigma \frac{b g q}{-n + i k}}$$

(De breedte van de geheele geul wordt hier, anders dan in § 142,  $b_0$  genoemd).

Door invoeren van den hulphoek  $\vartheta = b g t g \frac{k}{n}$  kan dit worden vervoemd tot:

$$u^2 = \frac{b_0 n^2 : g}{\Sigma \frac{b g}{-1 + i t g \vartheta}} = \frac{-b_0 n^2 : g}{\Sigma f \cos^2 \vartheta + i \Sigma f \cos^2 \vartheta t g \vartheta},$$

waarin  $f$  voor elk deel van de geul het product  $b g$ , dus de natte doorsnede voorstelt.

Is voor één der naast elkaar gelegen geulen  $v_m$  zoo goed mogelijk aangenomen, dan kan met behulp der formules (127)–(130) de waarde van  $\vartheta$  voor alle geulen worden bepaald. Een tafel van de functie  $t g \vartheta : \cos \vartheta$  kan hierbij goede diensten bewijzen.

Men heeft dan alle gegevens om de termen  $G = \Sigma f \cos^2 \vartheta$  en  $K = \Sigma f \cos^2 \vartheta t g \vartheta$ , benevens den daardoor bepaalden hoek  $\vartheta_0 = b g t g \frac{K}{G}$ , te berekenen.

De uitdrukking voor  $u^2$  gaat dan over in:

$$u^2 = \frac{-b_0 n^2 : g}{G (\cos \vartheta_0 + i \sin \vartheta_0)} \cos \vartheta_0 = -\frac{b_0 n^2 \cos \vartheta_0}{G g} (\cos \vartheta_0 - i \sin \vartheta_0),$$

zoodat voor  $u$  kan worden geschreven:

$$\begin{aligned} u &= i \sqrt{\frac{b_0 n^2 \cos \vartheta_0}{G g}} (\cos \frac{1}{2} \vartheta_0 - i \sin \frac{1}{2} \vartheta_0) = \\ &= \sqrt{\frac{b_0 n^2 \cos \vartheta_0}{G g}} (\sin \frac{1}{2} \vartheta_0 + i \cos \frac{1}{2} \vartheta_0), \end{aligned}$$

wat overeenkomt met de voor een enkelvoudige geul geldende uitdrukking (116, § 140).

Voor het complexe getal  $u$  kan men schrijven:

$$u = R (\sin \varphi + i \cos \varphi) = \sigma + i r,$$

waarin dus:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{\frac{b_0 n^2 \cos \vartheta_0}{G g}} & \varphi &= \frac{1}{2} \vartheta_0 \\ r &= R \cos \varphi & \sigma &= R \sin \varphi. \end{aligned}$$

Nu kunnen de uitdrukkingen  $\frac{1}{2} (e^{ul} + e^{-ul})$  en  $\frac{1}{2} (e^{ul} - e^{-ul})$  van (123) worden berekend, en wel het eenvoudigst door toepassing van goniometrische en hyperbolische functies.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (e^{ul} + e^{-ul}) &= \frac{1}{2} e^{\sigma l} (\cos r l + i \sin r l) + \frac{1}{2} e^{-\sigma l} (\cos r l - i \sin r l) = \\ &= \cos r l \frac{e^{\sigma l} + e^{-\sigma l}}{2} + i \sin r l \frac{e^{\sigma l} - e^{-\sigma l}}{2} = \\ &= \cos r l \cosh \sigma l + i \sin r l \sinh \sigma l \end{aligned}$$

en evenzoo is:

$$\frac{1}{2} (e^{ul} - e^{-ul}) = \cos r l \sinh \sigma l + i \sin r l \cosh \sigma l.$$

Dus wordt:

$$H_h = S_s = (\cos r l \cosh \sigma l + i \sin r l \sinh \sigma l).$$

$$H_s = \frac{i u}{2b_0 n} (e^{ul} - e^{-ul}) = \frac{R(i \sin \varphi - \cos \varphi)}{b_0 n} (\cos r l \sinh \sigma l + i \sin r l \cosh \sigma l) =$$

$$= \frac{R}{b_0 n} \{ -\cos \varphi \cos r l \sinh \sigma l - \sin \varphi \sin r l \cosh \sigma l \} +$$

$$+ i \{ \sin \varphi \cos r l \sinh \sigma l - \cos \varphi \sin r l \cosh \sigma l \}.$$

$$S_h = \frac{b_0 n}{R} \{ -\cos \varphi \cos r l \sinh \sigma l + \sin \varphi \sin r l \cosh \sigma l \} +$$

$$+ i \{ -\sin \varphi \cos r l \sinh \sigma l - \cos \varphi \sin r l \cosh \sigma l \}.$$

Het is dus noodzakelijk bij de berekening gebruik te maken van een tafel voor hyperbolische functies. Voert men de berekening uit met logaritmen, dan kunnen daarvoor b.v. de tafels van LIGOWSKI <sup>1)</sup> dienen, terwijl bij gebruik van rekenschuif of rekenmachine de tafels van HAYASHI <sup>2)</sup> een uitstekend hulpmiddel zijn.

Door een geschikte keuze der eenheden is het mogelijk de getallen waarmede wordt gerekend handelbaar te houden. Zoo worden de breedten *b* uitgedrukt in km, de diepten *q* in m en dus de doorsneden *f* in 1000 m<sup>2</sup>. De eenheid van lengte *l* is 100 km; die van *v<sub>m</sub>* 1 cm per sec en van *C*<sup>2</sup> 100 m per sec<sup>2</sup>. *R* wordt 10<sup>7</sup> × te groot en in de uitkomst is dan <sup>h</sup>*v* in cm en *s* in 1000 m<sup>3</sup> per sec (= 10<sup>9</sup> cm<sup>3</sup>/sec) uitgedrukt.

Als voorbeeld volgt de volledige uitvoering, zoowel voor toestand *Z* als voor toestand *A*, van één der

verkorte getijberekeningen, waarvan de uitkomst in bijlage 9, eerste kolom is opgenomen.

Het schema voor open *Zuiderzee* (toestand *Z*) bestaat uit 5 geulen (figuur 68), terwijl bij toestand *A* de beide geulen 3*a* en 3*b* vervallen.

De gegevens waarvan wordt uitgegaan zijn de volgende:

| Geul.      | Lengte.  | Dwarsprofiel.                                 |   |   |   | Maximum snelheid i/d diepste geul. |          |
|------------|----------|---|---|---|---|------------------------------------|----------|
|            | <i>L</i> | <i>b</i> <sub>1</sub> × <i>q</i> <sub>1</sub> | <i>b</i> <sub>2</sub> × <i>q</i> <sub>2</sub> | <i>b</i> <sub>3</sub> × <i>q</i> <sub>3</sub> | <i>b</i> <sub>4</sub> × <i>q</i> <sub>4</sub> | <i>Z</i>                           | <i>A</i> |
| 1          | 47       | 2,0 × 20,0                                    | 1,5 × 8,0                                     | 3,0 × 4,0                                     | 7,0 × 0                                       | 80                                 | 98       |
| 2 <i>a</i> | 28       | 1,5 × 10,0                                    | 3,5 × 5,0                                     | 19,5 × 0                                      | —   | 75                                 | 100      |
| 2 <i>b</i> | 19       | 3,3 × 16,0                                    | 7,3 × 0                                       | —   | —   | 87                                 | 100      |
| 3 <i>a</i> | 63       | 41,8 × 3,8                                    | —   | —   | —   | 17                                 | —        |
| 3 <i>b</i> | 35       | 7,5 × 6,5                                     | 16,0 × 3                                      | —   | —   | 45                                 | —        |

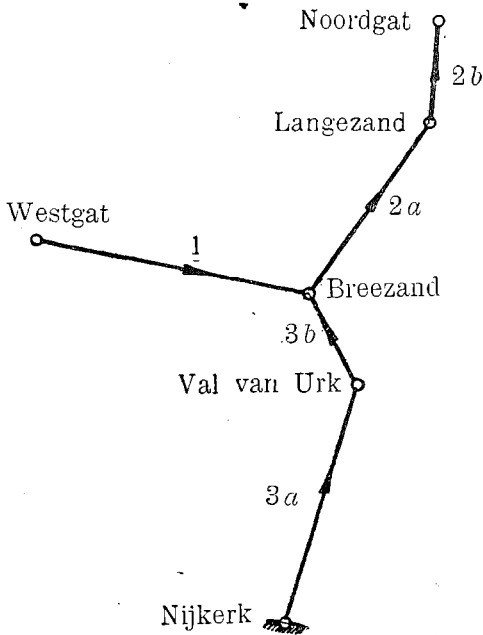
*L* = lengte in km.

*b*<sub>1</sub>, *b*<sub>2</sub>, *b*<sub>3</sub>, *b*<sub>4</sub> = breedte der elementaire geulen in km.

*q*<sub>1</sub>, *q*<sub>2</sub>, *q*<sub>3</sub>, *q*<sub>4</sub> = diepte " " " " m.  
snelheid in cm per seconde.

<sup>1)</sup> Literaturopgave n<sup>o</sup>. 63.

<sup>2)</sup> " " n<sup>o</sup>. 62.



Figuur 68.

$$C^2 = 280\,000 \text{ cm per seconde}^2.$$

Getij Westgat : amplitude 67 cm; kappagetal 158°.

Getij Noordgat: amplitude 79 cm; kappagetal 201°.

Voor het hier behandelde  $M_2$ -getij is  $n = 1,405 \times 10^{-4}$  en  $\frac{n^2}{g} = 20,124$ .

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van een rekenmachine (Millionär en Burroughs Calculator), terwijl gebruik is gemaakt van de bovenvermelde tafels van K. HAYASHI.

De beteekenis van de waarden (1), (2), (3), (4), (5) en (6) wordt bepaald door:

$$H_h = S_s = (1) + (2) i$$

$$H_s = (3) + (4) i$$

$$S_h = (5) + (6) i$$

Berekening van geul 1.

$$l = 0,47$$

|   | deel 1  | deel 2  | deel 3  | deel 4          | totaal                       |
|---|---------|---------|---------|-----------------|------------------------------|
| $b$ . . . . .                               | 2       | 1,5     | 3       | 7               | 13,5 = $b_0$                 |
| $q$ . . . . .                               | 20      | 8       | 4       | 0               |                              |
| $f$ . . . . .                               | 40      | 12      | 12      | 0               | 64                           |
| $v_m$ . . . . .                             | 80      | 57,54   | 42,54   | 0               |                              |
| $tg \vartheta$ . . . . .                    | 0,84680 | 1,52275 | 2,25180 | $\infty$        | 1,02755 = $tg \vartheta_0$   |
| $\vartheta$ . . . . .                       | 0,70263 | 0,98972 | 1,15287 | $\frac{\pi}{2}$ | 0,79899 = $\vartheta_0$      |
| $\cos \vartheta$ . . . . .                  | 0,76315 | 0,54893 | 0,40587 | 0               | 0,69743 = $\cos \vartheta_0$ |
| $tg \vartheta : \cos \vartheta$ . . . . .   | 1,10961 | 2,77402 | 5,54805 | $\infty$        |                              |
| $f \cos^2 \vartheta$ . . . . .              | 23,2959 | 3,6159  | 1,9768  | 0               | 28,8886 = $G$                |
| $f \cos^2 \vartheta tg \vartheta$ . . . . . | 19,7270 | 5,5061  | 4,4513  | 0               | 29,6844 = $K$                |

$$R = \sqrt{20,124 \frac{13,5}{28,8886} 0,69743} = 2,56101$$

$$\varphi = 0,39950$$

$$\cos \varphi = 0,92126$$

$$\sin \varphi = 0,38896$$

$$\frac{R}{b_0 n} = 1,350026$$

$$r l = 1,10890$$

$$\sigma l = 0,46818$$

$$\cos r l = 0,44565$$

$$\cosh \sigma l = 1,11162$$

$$\sin r l = 0,89521$$

$$\sinh \sigma l = 0,48547$$

$$(1) = +0,49539$$

$$(2) = +0,43460$$

$$(3) = 1,350026 (-0,19931 - 0,38707) = -0,79163$$

$$(4) = 1,350026 (+0,08415 - 0,91678) = -1,12407$$

$$(5) = \frac{1}{1,350026} (-0,19931 + 0,38707) = +0,13908$$

$$(6) = \frac{1}{1,350026} (-0,08415 - 0,91678) = -0,74141$$

Contrôle:  $(1)^2 = +0,245411$

$-(2)^2 = -0,188877$

$2 \times (1) \times (2) = +0,430592$

$-(3) \times (5) = +0,110100$

$-(3) \times (6) = -0,586922$

$(4) \times (6) = +0,833397$

$-(4) \times (5) = +0,156336$

$+1,000031$

$+0,000006$

De stroomen in de verschillende deelen van de geul vertoonen kleine phaseverschillen, zoodat de amplitude van den stroom in de geheele geul wordt bepaald door  $\Sigma \frac{v_m f}{100} \cos(\vartheta - \vartheta_0)$ .

Dit levert in dit geval: 43,431.

## Berekening van geul 2a.

 $l = 0,28$ 

|   | deel 1  | deel 2  | deel 3          | totaal                       |
|---|---------|---------|-----------------|------------------------------|
| $b$ . . . . .                               | 1,5     | 3,5     | 19,5            | 24,5 = $b_0$                 |
| $q$ . . . . .                               | 10      | 5       | 0               |                              |
| $f$ . . . . .                               | 15      | 17,5    | 0               | 32,5                         |
| $v_m$ . . . . .                             | 75      | 55,29   | 0               |                              |
| $tg \vartheta$ . . . . .                    | 1,58775 | 2,34080 | $\infty$        | 1,87992 = $tg \vartheta_0$   |
| $\vartheta$ . . . . .                       | 1,00874 | 1,16706 | $\frac{\pi}{2}$ | 1,08193 = $\vartheta_0$      |
| $\cos \vartheta$ . . . . .                  | 0,53293 | 0,39285 | 0               | 0,46962 = $\cos \vartheta_0$ |
| $tg \vartheta : \cos \vartheta$ . . . . .   | 2,97928 | 5,95856 | $\infty$        |                              |
| $f \cos^2 \vartheta$ . . . . .              | 4,2602  | 2,7008  | 0               | 6,9610 = $G$                 |
| $f \cos^2 \vartheta tg \vartheta$ . . . . . | 6,7641  | 6,3220  | 0               | 13,0861 = $K$                |

$$R = \sqrt{20,124 \frac{24,5}{6,9610}} \cdot 0,46962 = 5,76737 \quad \varphi = 0,54096$$

$$\cos \varphi = 0,85721 \quad \sin \varphi = 0,51496 \quad \frac{R}{b_0 n} = 1,675237$$

$$r l = 1,38428 \quad \sigma l = 0,83159$$

$$\cos r l = 0,18544 \quad \cosh \sigma l = 1,36616$$

$$\sin r l = 0,98265 \quad \sinh \sigma l = 0,93081$$

$$(1) = +0,25334 \quad (2) = +0,91466$$

$$(3) = \frac{1}{1,675237} \times (-0,14796 - 0,69131) = -1,40598$$

$$(4) = \frac{1}{1,675237} \times (+0,08889 - 1,15077) = -1,77890$$

$$(5) = \frac{1}{1,675237} \times (-0,14796 + 0,69131) = +0,32434$$

$$(6) = \frac{1}{1,675237} \times (-0,08889 - 1,15077) = -0,73999$$

Contrôle:  $(1)^2 = +0,064181$

$$- (2)^2 = -0,836603 \quad 2 \times (1) \times (2) = +0,463440$$

$$- (3) \times (5) = +0,456016 \quad - (3) \times (6) = -1,040411$$

$$(4) \times (6) = +1,316368 \quad - (4) \times (5) = +0,576968$$

$$\frac{+0,999962}{-0,000003}$$

Stroom in de geheele geul  $\Sigma \frac{v_m f}{100} \cos(\vartheta - \vartheta_0) = 20,859$ .

## Berekening van geul 2b.

 $l = 0,19$ 

|                            | deel 1  | deel 2          | totaal                       |
|----------------------------|---------|-----------------|------------------------------|
| $b$ . . . . .              | 3,3     | 7,3             | 10,6 = $b_0$                 |
| $q$ . . . . .              | 16      | 0               |                              |
| $f$ . . . . .              | 52,8    | 0               | 52,8                         |
| $v_m$ . . . . .            | 87      | 0               |                              |
| $tg \vartheta$ . . . . .   | 1,15112 | $\infty$        | 1,15112 = $tg \vartheta_0$   |
| $\vartheta$ . . . . .      | 0,85553 | $\frac{\pi}{2}$ | 0,85553 = $\vartheta_0$      |
| $\cos \vartheta$ . . . . . | 0,65582 | 0               | 0,65582 = $\cos \vartheta_0$ |

$$R = \sqrt{20,124 \frac{10,6}{52,8} \cdot \frac{1}{0,65582}} = 2,48199 \quad \varphi = 0,42776$$

$$\cos \varphi = 0,90990 \quad \sin \varphi = 0,41483 \quad \frac{R}{b_0 n} = 1,666321$$

$$r l = 0,42909 \quad \sigma l = 0,19562$$

$$\cos r l = 0,90934 \quad \cosh \sigma l = 1,01919$$

$$\sin r l = 0,41604 \quad \sinh \sigma l = 0,19687$$



$$R = \sqrt{20,124 \frac{23,5}{23,2831} 0,49931} = 3,18461 \quad \varphi = 0,52400$$

$$\cos \varphi = 0,86582 \quad \sin \varphi = 0,50035 \quad \frac{R}{b_0 n} = 0,964391$$

$$rl = 0,96505 \quad \sigma l = 0,55770$$

$$\cos rl = 0,56938 \quad \cosh \sigma l = 1,15959$$

$$\sin rl = 0,82208 \quad \sinh \sigma l = 0,58706$$

$$(1) = +0,66025 \quad (2) = +0,48261$$

$$(3) = 0,964391 \times (-0,28941 - 0,47697) = -0,73909$$

$$(4) = 0,964391 \times (+0,16725 - 0,82537) = -0,63469$$

$$(5) = \frac{1}{0,964391} \times (-0,28941 + 0,47697) = +0,19449$$

$$(6) = \frac{1}{0,964391} \times (-0,16725 - 0,82537) = -1,02927$$

$$\text{Contrôle:} \quad (1)^2 = +0,435930$$

$$- (2)^2 = -0,232912 \quad 2 \times (1) \times (2) = +0,637286$$

$$- (3) \times (5) = +0,143746 \quad - (3) \times (6) = -0,760723$$

$$(4) \times (6) = +0,653267 \quad - (4) \times (5) = +0,123441$$

$$+ 1,000031 \quad + 0,000004$$

$$\text{Stroom in de geheele geul } \Sigma \frac{v_{mf}}{100} \cos(\vartheta - \vartheta_0) = 37,231.$$

Nu alle geulcoëfficiënten bekend zijn, kunnen allereerst de geulen  $2a$  en  $2b$ , en evenzoo  $3a$  en  $3b$  te zamen worden genomen. De betrekkingen tusschen de waterhoogten en stroomen aan begin en eind van de samengestelde geul worden volgens (124) en (125) door substitutie gevonden. Hierbij valt op te merken, dat voor een uit meerdere vakken bestaande geul niet geldt dat  $H_h = S_s$ , zooals bij uitvoering van de berekening ook blijkt. Blijft men voor  $H_h$  schrijven (1) + (2)  $i$ , dan moet men voor  $S_s$  nieuwe symbolen nl. (7) + (8)  $i$  invoeren.

Aaneenschakelen van  $2a$  en  $2b$ :

Als men den stroom bij het begin van elke geul door  $S$ , en aan het einde door  $Q$  aanduidt, en voor de waterhoogten in elk knooppunt de beginletters van dit punt invoert, heeft men:

$$L = (+0,25334 + 0,91466 i) B + (-1,40598 - 1,77890 i) S_{2a}$$

$$Q_{2a} = (+0,32434 - 0,73999 i) B + (+0,25334 + 0,91466 i) S_{2a}$$

$$N_o = (+0,92679 + 0,08191 i) L + (-0,56453 - 0,51916 i) S_{2b}$$

$$Q_{2b} = (+0,00781 - 0,27611 i) L + (+0,92679 + 0,08191 i) S_{2b}$$

waarbij natuurlijk  $Q_{2a} = S_{2b}$  is.

Drukt men  $N_o$  en  $Q_{2b}$  uit in  $B$  en  $S_{2a}$ , dus:

$$N_o = H_h B + H_s S_{2a}$$

$$Q_{2b} = S_h B + S_s S_{2a}$$

dan wordt:

$$H_h = (+0,92679 + 0,08191 i) (+0,25334 + 0,91466 i) +$$

$$+ (-0,56453 - 0,51916 i) (+0,32434 - 0,73999 i) =$$

$$= -0,40740 + 1,11782 i.$$

Evenzoo kunnen de overige coëfficiënten worden bepaald. Het doelmatigst is, ze alle te zamen tabellarisch te berekenen, zooals hieronder is aangegeven.

|            | (1)       | (2)       | (3)       | (4)       | (5)       | (6)       | (7)       | (8)       |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $2a \dots$ | + 0,25334 | + 0,91466 | - 1,40598 | - 1,77890 | + 0,32434 | - 0,73999 | = (1)     | = (2)     |
| $2b \dots$ | + 0,92679 | + 0,08191 | - 0,56453 | - 0,51916 | + 0,00781 | - 0,27611 | = (1)     | = (2)     |
|            | + 0,23479 | + 0,84770 | - 1,30305 | - 1,64867 | + 0,30060 | - 0,68582 | + 0,23479 | + 0,84770 |
|            | - 0,07492 | + 0,02075 | + 0,14571 | - 0,11516 | + 0,06061 | + 0,02657 | - 0,07492 | + 0,02075 |
|            | - 0,18310 | + 0,41775 | - 0,14302 | - 0,51635 | + 0,00198 | + 0,00714 | - 0,01098 | - 0,01389 |
|            | - 0,38417 | - 0,16838 | + 0,47485 | - 0,13152 | + 0,25255 | - 0,06995 | - 0,49117 | + 0,38821 |
| $2 \dots$  | - 0,40740 | + 1,11782 | - 0,82551 | - 2,41170 | + 0,61574 | - 0,72206 | - 0,34228 | + 1,24277 |

## Aaneenschakelen van 3a en 3b:

|          | (1)       | (2)       | (3)       | (4)       | (5)       | (6)       | (7)       | (8)       |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3a. . .  | - 0,01187 | + 0,67213 | - 0,20220 | - 0,51578 | + 0,98316 | - 2,42896 | = (1)     | = (2)     |
| 3b. . .  | + 0,66025 | + 0,48261 | - 0,73909 | - 0,63469 | + 0,19449 | - 1,02927 | = (1)     | = (2)     |
|          | - 0,00784 | + 0,44377 | - 0,13350 | - 0,34054 | + 0,64913 | - 1,60372 | - 0,00784 | + 0,44377 |
|          | - 0,32438 | - 0,00573 | + 0,24892 | - 0,09758 | + 1,17224 | + 0,47448 | - 0,32438 | - 0,00573 |
|          | - 0,72664 | + 1,79522 | + 0,00877 | - 0,49675 | - 0,00231 | + 0,13072 | - 0,03933 | - 0,10031 |
|          | - 1,54164 | - 0,62400 | + 0,42659 | + 0,00753 | + 0,69180 | + 0,01222 | - 0,53088 | + 0,20812 |
| 3. . . . | - 2,60050 | + 1,60926 | + 0,55078 | - 0,92734 | + 2,51086 | - 0,98630 | - 0,90243 | + 0,54585 |

Het schema, volgens welk deze tabellen zijn opgemaakt, ziet er als volgt uit:

| deel a | 1a        | 2a        | 3a        | 4a        | 5a        | 6a        | 7a = 1a   | 8a = 2a   |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| deel b | 1b        | 2b        | 3b        | 4b        | 5b        | 6b        | 7b = 1b   | 8b = 2b   |
|        | + 1a × 1b | + 2a × 1b | + 3a × 1b | + 4a × 1b | + 5a × 1b | + 6a × 1b | + 1a × 1b | + 2a × 1b |
|        | - 2a × 2b | + 1a × 2b | - 4a × 2b | + 3a × 2b | - 6a × 2b | + 5a × 2b | - 2a × 2b | + 1a × 2b |
|        | + 5a × 3b | + 6a × 3b | + 1a × 3b | + 2a × 3b | + 1a × 5b | + 2a × 5b | + 3a × 5b | + 4a × 5b |
|        | - 6a × 4b | + 5a × 4b | - 2a × 4b | + 1a × 4b | - 2a × 6b | + 1a × 6b | - 4a × 6b | + 3a × 6b |
| totaal | som       | som       | som       | som       | som       | som       | som       | som       |

en men overtuigt zich gemakkelijk, dat hiermede het resultaat van de bovenvermelde substitutie wordt gevonden.

Als controle kan men verifieeren den ook voor een samengestelde geul doorgaanden regel, dat  $\left| \begin{matrix} H_n H_s \\ S_n S_s \end{matrix} \right| = 1$  is.

Na deze aaneenschakeling wordt beschikt over de volgende vergelijkingen:

$$B = (+ 0,49539 + 0,43460 i) W + (- 0,79163 - 1,12407 i) S_1 \quad (200)$$

$$Q_1 = (+ 0,13908 - 0,74141 i) W + (+ 0,49539 + 0,43460 i) S_1 \quad (201)$$

$$N_0 = (- 0,40740 + 1,11782 i) B + (- 0,82551 - 2,41170 i) S_2 \quad (202)$$

$$Q_2 = (+ 0,61574 - 0,72206 i) B + (- 0,34228 + 1,24277 i) S_2 \quad (203)$$

$$B = (- 2,60050 + 1,60926 i) N_y + (+ 0,55078 - 0,92734 i) S_3 \quad (204)$$

$$Q_3 = (+ 2,51086 - 0,98630 i) N_y + (- 0,90243 + 0,54585 i) S_3 \quad (205)$$

terwijl bovendien geldt:

$$S_2 = Q_1 + Q_3. \quad (206)$$

Van de in deze vergelijkingen voorkomende letters zijn bekend:  $S_3 = 0$ ,  $W$  en  $N_0$ ; zoodat er dus 7 onbekenden, nl.:  $B$ ,  $S_1$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $S_2$ ,  $Q_3$ , en  $N_y$  overblijven. De 7 vergelijkingen zijn dus toereikend om deze op te lossen.

Daar  $S_3 = 0$ , volgt uit (204) en (205):

$$Q_3 = \frac{+ 2,51086 - 0,98630 i}{- 2,60050 + 1,60926 i} B = (- 0,86788 - 0,15780 i) B. \quad (207)$$

Uit (202) volgt met behulp van (206):

$$N_0 = (- 0,40740 + 1,11782 i) B + (- 0,82551 - 2,41170 i) (Q_1 + Q_3)$$

en de waarde voor  $Q_3$ , uit (207) hierin gesubstitueerd, levert:

$$N_0 = B [- 0,40740 + 1,11782 i + (- 0,82551 - 2,41170 i) (- 0,86788 - 0,15780 i)] + (- 0,82551 - 2,41170 i) Q_1,$$

$$N_0 = (- 0,07153 + 3,34116 i) B + (- 0,82551 - 2,41170 i) Q_1.$$

Vult men hierin de uitdrukkingen voor  $B$  en  $Q_1$  uit (200) en (201) in, dan vindt men als resultaat:

$$N_0 = (- 3,39038 + 1,90071 i) W + (+ 4,45150 - 4,11806 i) S_1,$$

waaruit volgt:

$$S_1 = \frac{+ 3,39038 - 1,90071 i}{+ 4,45150 - 4,11806 i} W + \frac{1}{+ 4,45150 - 4,11806 i} N_o,$$

$$S_1 = (+ 0,62325 + 0,14958 i) W + (+ 0,12105 + 0,11198 i) N_o.$$

Hiermede is de eerste onbekende in de gegeven grootheden  $W$  en  $N_o$  uitgedrukt.

Substitutie van de gevonden waarde in (200) en (201) geeft als resultaat:

$$B = (+ 0,17015 - 0,38439 i) W + (+ 0,03004 - 0,22472 i) N_o,$$

$$Q_1 = (+ 0,38282 - 0,39645 i) W + (+ 0,01130 + 0,10808 i) N_o,$$

terwijl daarna uit (207) volgt:

$$Q_3 = (- 0,20833 + 0,30675 i) W + (- 0,06153 + 0,19029 i) N_o.$$

Daar  $S_2 = Q_1 + Q_3$ , wordt:

$$S_2 = (+ 0,17449 - 0,08970 i) W + (- 0,05023 + 0,29837 i) N_o,$$

waarna uit (203) volgt:

$$Q_2 = (- 0,12102 - 0,11199 i) W + (- 0,49738 + 0,32461 i) N_o,$$

terwijl ten slotte uit (204) wordt gevonden:

$$Ny = \frac{B}{- 2,60050 + 1,60926 i} = (- 0,27806 - 0,17207 i) B =$$

$$= (- 0,11345 + 0,07760 i) W + (- 0,04702 + 0,05732 i) N_o.$$

Hiermede zijn de zeven vergelijkingen (200) tot en met (206) volledig opgelost. Als contrôle kan men de vergelijkingen (202) en (205) verifiëren.

Vervolgens moeten stroom en getij in de z.g. „tusschenpunten” der geulen 2 en 3 worden bepaald, hetgeen, nu de waarden van  $Ny$ ,  $B$  en  $S_2$  bekend zijn, op eenvoudige wijze kan geschieden.

$$U = (- 0,01187 + 0,67213 i) Ny.$$

$$Q_{3a} = S_{3b} = (- 0,98316 - 2,42896 i) Ny.$$

$$L = (+ 0,25334 + 0,91466 i) B + (- 1,40598 - 1,77890 i) S_2.$$

$$Q_{2a} = S_{2b} = (+ 0,32434 - 0,73999 i) B + (+ 0,25334 + 0,91466 i) S_2.$$

Na substitutie vindt men hieruit:

$$U = (- 0,05081 - 0,07717 i) W + (- 0,03797 - 0,03228 i) N_o.$$

$$Q_{3a} = S_{3b} = (+ 0,07695 + 0,35186 i) W + (+ 0,09300 + 0,17056 i) N_o.$$

$$L = (- 0,01020 - 0,12603 i) W + (+ 0,81454 - 0,35960 i) N_o.$$

$$Q_{2a} = S_{2b} = (- 0,10299 - 0,11370 i) W + (- 0,44219 - 0,06547 i) N_o.$$

Alle gezochte grootheden zijn dus uitgedrukt in  $W$  en  $N_o$ .

Bij het bepalen van de getalwaarden dient in het oog te worden gehouden, dat het kappagetal niet overeenkomt met den in § 138 gebruikten hoek  $\varphi$ , doch daarvan het tegengestelde is. Bij het weergeven van een door amplitude  $H$  en kappagetal  $\alpha$  bepaald getij of stroom door een complex getal  $\alpha + \beta i$  geldt dus:

$$\alpha = + H \cos \alpha \quad \beta = - H \sin \alpha.$$

Het getij te Westgat (amplitude 67, kappagetal 158°) moet dus worden geschreven als:  $- 62,0 - 25,5 i$ ; dat te Noordgat (amplitude 79, kappagetal 201°) als:  $- 74,0 + 28,0 i$ .

Deze waarden in de bovengegeven uitkomsten voor  $W$  en  $N_o$  substitueerende, vindt men:

|                   |                      |                              |
|-------------------|----------------------|------------------------------|
| $B$               | $= - 16,3 + 37,0 i,$ | ampl. 40,4; kappagetal 246°. |
| $L$               | $= - 52,8 + 57,5 i,$ | " 78,0; " 227°.              |
| $U$               | $= + 4,9 + 7,4 i,$   | " 8,9; " 303°.               |
| $Ny$              | $= + 10,9 - 7,5 i,$  | " 13,2; " 34°.               |
| $S_1$             | $= - 46,9 - 30,1 i,$ | " 55,7; " 147°.              |
| $Q_1$             | $= - 37,7 + 7,1 i,$  | " 38,4; " 191°.              |
| $S_2$             | $= - 17,7 - 22,4 i,$ | " 28,6; " 128°.              |
| $Q_{2a} = S_{2b}$ | $= + 38,0 + 2,1 i,$  | " 38,1; " 357°.              |
| $Q_2$             | $= + 50,5 + 20,1 i,$ | " 54,4; " 338°.              |
| $Q_{3a} = S_{3b}$ | $= - 7,5 - 33,8 i,$  | " 34,6; " 102°.              |
| $Q_3$             | $= + 20,0 - 29,5 i,$ | " 35,6; " 56°.               |

De gevonden uitkomsten der stroomsterkten moeten nu worden vergeleken met de bij de berekening der geulcoëfficiënten daarvoor aangenomen waarden.

| Geul. | Uitkomst. |       |      | Aange-<br>nomen. | %   |
|-------|-----------|-------|------|------------------|-----|
|       | begin.    | eind. | gem. |                  |     |
| 1     | 55,7      | 38,4  | 47,5 | 43,4             | 109 |
| 2a    | 28,6      | 38,1  | 23   | 20,9             | 110 |
| 2b    | 38,1      | 54,4  | 47   | 45,9             | 102 |
| 3a    | 0         | 34,6  | 26,5 | 27,0             | 98  |
| 3b    | 34,6      | 35,6  | 36,5 | 37,2             | 98  |

Het zal opvallen dat voor de gemiddelde stroomsterkte in een geul niet steeds is genomen het gemiddelde van de stroomsterkten aan de beide uiteinden. Hiervoor kunnen verschillende redenen zijn. In de eerste plaats volgt uit theoretische beschouwingen, dat bij een groot verschil in sterkte de gemiddelde weerstand groter is dan met de gemiddelde stroomsterkte overeenkomt. Is, zooals voor geul 3a, de stroom aan het eene uiteinde 0, dan moet voor de bepaling van den weerstand worden gerekend met ongeveer  $\frac{3}{4}$  van dien aan het andere uiteinde, en niet met ongeveer de helft. Voor de overige geulen wordt de afwijking veroorzaakt door het feit, dat de amplitude van den stroom in de geul niet lineair verloopt, doch vaak een maximum of een minimum vertoont. Dit blijkt als men, uitgaande van stroom en getij aan het beginpunt der geul, de stroomsterkte op verschillende punten, b.v. om de 5 km, berekent. In geul 2a blijkt dan dat de amplitude eerst snel afneemt en later weer toeneemt, zoodat het gemiddelde lager is dan de waarden aan de beide uiteinden; in geul 3b vindt het omgekeerde plaats.

Hiermede rekening houdende, worden voor de verhouding tusschen berekenden en aangenomen stroom de in de laatste kolom in procenten aangegeven waarden gevonden. Het blijkt dat de schattingen vrij juist kunnen worden genoemd en dat het verschil alleen in de geulen 1 en 2a, waar het ongeveer 10 % bedraagt, noemenswaard is.

Een indruk van de beteekenis van dit verschil krijgt men, als men bedenkt dat bij het invoeren van de gevonden stroomsterkten dezelfde weerstandscöefficienten  $k$  en dus dezelfde resultaten zouden worden gevonden indien men ook  $C^2$  10 % grooter aannam. Het gevonden verschil komt dus hierop neer, alsof in de geulen 1 en 2a met een  $C$  is gerekend welke ongeveer 5 % te groot is, dus ongeveer  $C = 555$ . Het zal duidelijk zijn, en het is ook meermalen gebleken, dat een dergelijk verschil de uitkomsten niet noemenswaard kan veranderen.

Waar het de aandacht zal hebben getrokken dat de berekening is opgezet met vijf decimalen, terwijl de benaderde gegevens en ruwe schattingen waarvan wordt uitgegaan een dergelijke nauwkeurigheid absoluut niet wettigen, zij er op gewezen dat de meeste decimalen uitsluitend de beteekenis hebben van rekengrootheden. Door het samenstellen der geulen, het combineeren der vergelijkingen en de daarbij voorkomende afrondingen ontstaan zooveel foutenbronnen dat men, om in de einduitkomst van b.v. honderdsten zeker te zijn, de berekening moet beginnen met eenige decimalen meer.

Bij het gebruik van een rekenmachine bestaat de meerdere arbeid aan het werken met vijf decimalen verbonden bijna uitsluitend uit het neerschrijven van een grooter aantal cijfers.

Aan de orde is nu het berekenen van den toestand bij *afgesloten Zuiderzee* (toestand A).

Men kan daartoe uit de berekening  $Z$  de geulen 3a en 3b laten vervallen en door de vroeger voor de overige geulen gevonden constanten op

geschikte wijze te combineeren de onbekenden in de gegeven getijden Westgat en Noordgat uitdrukken. Na substitutie van de getalwaarden voor deze beide getijden vindt men dan:

$$\left\{ \begin{array}{lll} B = -31,9 + 76,0i, & \text{ampl. } 82,4; & \text{kappagetal } 247^\circ. \\ L = -51,3 + 70,0i, & \text{'' } 86,8; & \text{'' } 234^\circ. \\ S_1 = -63,6 - 55,7i, & \text{'' } 84,5; & \text{'' } 139^\circ. \\ Q_1 = S_2 = -34,8 - 12,8i, & \text{'' } 37,1; & \text{'' } 160^\circ. \\ Q_{2a} = S_{2b} = +48,7 + 13,1i, & \text{'' } 50,5; & \text{'' } 345^\circ. \\ Q_2 = +63,0 + 30,9i, & \text{'' } 70,2; & \text{'' } 334^\circ. \end{array} \right.$$

Een vergelijking der berekende en aangenomen stroomsterkten geeft nu:

| Geul. | Uitkomst. |       |      | Aange-<br>nomen. | %   |
|-------|-----------|-------|------|------------------|-----|
|       | begin.    | eind. | gem. |                  |     |
| 1     | 84,5      | 37,1  | 62   | 43,4             | 143 |
| 2a    | 37,1      | 50,5  | 39   | 20,9             | 163 |
| 2b    | 50,5      | 70,2  | 61   | 45,9             | 133 |

Men ziet dat de weerstand aanmerkelijk onderschat is, zoodat de bovenvermelde uitkomsten niet kunnen worden aanvaard. De berekening zal moeten worden herhaald met hoogere waarden voor de geschatte maximum stroomsnelheid.

Echter niet zooveel hoger als het in de laatste kolom vermelde percentage aangeeft; immers door den grooteren weerstand worden de stroomen kleiner gevonden, zoodat ook de aan te nemen stroomen kleiner moeten worden geschat dan de uitkomsten van deze berekening.

Na nog een enkele vergeefsche poging werd een bevredigende uitkomst bereikt met voor de drie geulen 1, 2a en 2b aangenomen snelheidsamplitude van resp. 98, 100 en 100 cm per sec.

Met deze waarden gaat de berekening van de geulcoëfficiënten als volgt:

Berekening van geul 1.

$l = 0,47$

|   | deel 1  | deel 2  | deel 3  | deel 4          | totaal                       |
|---|---------|---------|---------|-----------------|------------------------------|
| $b$ . . . . .                               | 2       | 1,5     | 3       | 7               | $13,5 = b_0$                 |
| $q$ . . . . .                               | 20      | 8       | 4       | 0               |                              |
| $f$ . . . . .                               | 40      | 12      | 12      | 0               | 64                           |
| $v_m$ . . . . .                             | 98      | 68,33   | 49,95   | 0               |                              |
| $tg \vartheta$ . . . . .                    | 1,03733 | 1,80826 | 2,64382 | $\infty$        | $1,23153 = tg \vartheta_0$   |
| $\vartheta$ . . . . .                       | 0,80372 | 1,06564 | 1,20919 | $\frac{\pi}{2}$ | $0,88878 = \vartheta_0$      |
| $\cos \vartheta$ . . . . .                  | 0,69403 | 0,48394 | 0,35377 | 0               | $0,63036 = \cos \vartheta_0$ |
| $tg \vartheta : \cos \vartheta$ . . . . .   | 1,49465 | 3,73662 | 7,47325 | $\infty$        |                              |
| $f \cos^2 \vartheta$ . . . . .              | 19,2671 | 2,8104  | 1,5018  | 0               | $23,5793 = G$                |
| $f \cos^2 \vartheta tg \vartheta$ . . . . . | 19,9863 | 5,0819  | 3,9705  | 0               | $29,0387 = K$                |

$$R = \sqrt{20,124 \frac{13,5}{23,5793} 0,63036} = 2,69496 \quad \varphi = 0,44439$$

$$\cos \varphi = 0,90287$$

$$\sin \varphi = 0,42991 \quad \frac{R}{b_0 n} = 1,420637$$

$$r l = 1,14360$$

$$\sigma l = 0,54454$$

$$\cos r l = 0,41432$$

$$\cosh \sigma l = 1,15196$$

$$\sin r l = 0,91013$$

$$\sinh \sigma l = 0,57185$$

$$(1) = +0,47728$$

$$(2) = +0,52046$$

$$(3) = 1,420637 \times (-0,21392 - 0,45073) = -0,94423$$

$$(4) = 1,420637 \times (+0,10186 - 0,94660) = -1,20007$$

$$(5) = \frac{1}{1,420637} \times (-0,21392 + 0,45073) = \underline{+0,16669}$$

$$(6) = \frac{1}{1,420637} \times (-0,10186 - 0,94660) = \underline{-0,73802}$$

Contrôle:

$$\begin{array}{rcl} (1)^2 & = & +0,227796 \\ - (2)^2 & = & -0,270879 \quad 2 \times (1) \times (2) = +0,496810 \\ - (3) \times (5) & = & +0,157394 \quad - (3) \times (6) = -0,696861 \\ (4) \times (6) & = & +0,885676 \quad - (4) \times (5) = +0,200040 \\ & & +0,999987 \quad -0,000011 \end{array}$$

Stroom in de geheele geul  $\Sigma \frac{v_m f}{100} \cos(\vartheta - \vartheta_0) = 52,819$ .

Berekening van geul 2a.

$l = 0,28$

|  | deel 1  | deel 2  | deel 3          | totaal                      |
|--|---------|---------|-----------------|-----------------------------|
| $b$ . . . . .                              | 1,5     | 3,5     | 19,5            | $24,5 = b_0$                |
| $q$ . . . . .                              | 10      | 5       | 0               |                             |
| $f$ . . . . .                              | 15      | 17,5    | 0               | 32,5                        |
| $v_m$ . . . . .                            | 100     | 72,51   | 0               |                             |
| $tg \vartheta$ . . . . .                   | 2,11700 | 3,07009 | $\infty$        | $2,47937 = tg \vartheta_0$  |
| $\vartheta$ . . . . .                      | 1,12950 | 1,25591 | $\frac{\pi}{2}$ | $1,18742 = \vartheta_0$     |
| $cos \vartheta$ . . . . .                  | 0,42711 | 0,30971 | 0               | $0,37405 = cos \vartheta_0$ |
| $tg \vartheta : cos \vartheta$ . . . . .   | 4,95657 | 9,91314 | $\infty$        |                             |
| $f cos^2 \vartheta$ . . . . .              | 2,7363  | 1,6786  | 0               | $4,4149 = G$                |
| $f cos^2 \vartheta tg \vartheta$ . . . . . | 5,7928  | 5,1534  | 0               | $10,9462 = K$               |

$$R = \sqrt{20,124 \frac{24,5}{4,4149} - 0,37405} = 6,46313 \quad \varphi = 0,59370$$

$$cos \varphi = 0,82887 \quad sin \varphi = 0,55944 \quad \frac{R}{b_0 n} = 1,877334$$

$$r l = 1,49999 \quad \sigma l = 1,01241$$

$$cos r l = 0,07075 \quad cosh \sigma l = 1,55778$$

$$sin r l = 0,99749 \quad sinh \sigma l = 1,19444$$

$$(1) = +0,11021 \quad (2) = +1,19144$$

$$(3) = 1,877334 \times (-0,07005 - 0,86930) = -1,76347$$

$$(4) = 1,877334 \times (+0,04723 - 1,28796) = -2,32917$$

$$(5) = \frac{1}{1,877334} \times (-0,07005 + 0,86930) = +0,42574$$

$$(6) = \frac{1}{1,877334} \times (-0,04723 - 1,28796) = -0,71124$$

Contrôle:

$$\begin{array}{rcl} (1)^2 & = & +0,012146 \\ - (2)^2 & = & -1,419529 \quad 2 \times (1) \times (2) = +0,262617 \\ - (3) \times (5) & = & +0,750780 \quad - (3) \times (6) = -1,254250 \\ (4) \times (6) & = & +1,656599 \quad - (4) \times (5) = +0,991621 \\ & & +0,999996 \quad -0,000012 \end{array}$$

Stroom in de geheele geul  $\Sigma \frac{v_m f}{100} \cos(\vartheta - \vartheta_0) = 27,634$ .

Berekening van geul 2b.

$l = 0,19$

|                           | deel 1  | deel 2          | totaal                      |
|---------------------------|---------|-----------------|-----------------------------|
| $b$ . . . . .             | 3,3     | 7,3             | $10,6 = b_0$                |
| $q$ . . . . .             | 16      | 0               |                             |
| $f$ . . . . .             | 52,8    | 0               | 52,8                        |
| $v_m$ . . . . .           | 100     | 0               |                             |
| $tg \vartheta$ . . . . .  | 1,32312 | $\infty$        | $1,32312 = tg \vartheta_0$  |
| $\vartheta$ . . . . .     | 0,92360 | $\frac{\pi}{2}$ | $0,92360 = \vartheta_0$     |
| $cos \vartheta$ . . . . . | 0,60295 | 0               | $0,60295 = cos \vartheta_0$ |

$$R = \sqrt{20,124 \frac{10,6}{52,8} \cdot \frac{1}{0,60295}} = 2,58853 \quad \varphi = 0,46180$$

$$\cos \varphi = 0,89525 \quad \sin \varphi = 0,44556 \quad \frac{R}{b_0 n} = 1,737849$$

$$r l = 0,44030 \quad \sigma l = 0,21914$$

$$\cos r l = 0,90462 \quad \cosh \sigma l = 1,02411$$

$$\sin r l = 0,42621 \quad \sinh \sigma l = 0,22089$$

$$(1) = +0,92643 \quad (2) = +0,09415$$

$$(3) = 1,737849 \times (-0,17889 - 0,19448) = -0,64886$$

$$(4) = 1,737849 \times (+0,08903 - 0,39076) = -0,52436$$

$$(5) = \frac{1}{1,737849} \times (-0,17889 + 0,19448) = +0,00897$$

$$(6) = \frac{1}{1,737849} \times (-0,08903 - 0,39076) = -0,27608$$

Contrôle:

$$(1)^2 = +0,858273$$

$$- (2)^2 = -0,008864 \quad 2 \times (1) \times (2) = +0,174447$$

$$- (3) \times (5) = +0,005820 \quad - (3) \times (6) = -0,179137$$

$$(4) \times (6) = +0,144765 \quad - (4) \times (5) = +0,004704$$

$$+0,999994 \quad +0,000014$$

Stroom in de geheele geul  $\frac{v_m^f}{100} = 52,800$ .

Daar het geulennet geen vertakkingen vertoont, gaat de verdere berekening zeer eenvoudig. Door eerst de geulen 1 en 2a op de vroeger beschreven wijze aaneen te schakelen en deze samengestelde geul met 2b te verbinden, vindt men  $N_0$  en  $Q_2$  uitgedrukt in  $W$  en  $Q_1$ .

|         |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 . . . | + 0,47728 | + 0,52046 | - 0,94423 | - 1,20007 | + 0,16669 | - 0,73802 | = (1)     | = (2)     |
| 2a . .  | + 0,11021 | + 1,19144 | - 1,76347 | - 2,32917 | + 0,42574 | - 0,71124 | = (1)     | = (2)     |
|         | + 0,05260 | + 0,05736 | - 0,10406 | - 0,13226 | + 0,01837 | - 0,08134 | + 0,05260 | + 0,05736 |
|         | - 0,62010 | + 0,56865 | + 1,42981 | - 1,12499 | + 0,87931 | + 0,19860 | - 0,62010 | + 0,56865 |
|         | - 0,29395 | + 1,30148 | - 0,84167 | - 0,91782 | + 0,20320 | + 0,22158 | - 0,40200 | - 0,51092 |
|         | - 1,71897 | - 0,38825 | + 1,21224 | - 1,11167 | + 0,37017 | - 0,33946 | - 0,85354 | + 0,67157 |
| 1 × 2a  | - 2,58042 | + 1,53924 | + 1,69632 | - 3,28674 | + 1,47105 | - 0,00062 | - 1,82304 | + 0,78666 |
| 2b . .  | + 0,92643 | + 0,09415 | - 0,64886 | - 0,52436 | + 0,00897 | - 0,27608 | = (1)     | = (2)     |
|         | - 2,39058 | + 1,42600 | + 1,57152 | - 3,04493 | + 1,36282 | - 0,00057 | - 1,68892 | + 0,72879 |
|         | - 0,14492 | - 0,24295 | + 0,30945 | + 0,15971 | + 0,00006 | + 0,13850 | - 0,07406 | - 0,17164 |
|         | - 0,95451 | + 0,00040 | + 1,18290 | - 0,51043 | - 0,02315 | + 0,01381 | + 0,01522 | - 0,02948 |
|         | - 0,00033 | - 0,77136 | + 0,41249 | + 0,95593 | + 0,42495 | + 0,71240 | - 0,90740 | - 0,46832 |
| 1 × 2   | - 3,49034 | + 0,41209 | + 3,47636 | - 2,43972 | + 1,76468 | + 0,86414 | - 2,65516 | + 0,05935 |

Men vindt dus:

$$N_0 = (-3,49034 + 0,41209 i) W + (+3,47636 - 2,43972 i) S_1$$

en dus:

$$S_1 = \frac{(+3,49034 - 0,41209 i) W + (1 + 0 i) N_0}{3,47636 - 2,43972 i} =$$

$$= (+0,72844 + 0,39268 i) W + (+0,19273 + 0,13526 i) N_0.$$

Substitutie hiervan in de uitdrukking voor  $Q_2$ :

$$Q_2 = (+1,76468 + 0,86414 i) W + (-2,65516 + 0,05935 i) S_1$$

levert:

$$Q_2 = (-0,19275 - 0,13526 i) W + (-0,51976 - 0,34770 i) N_0.$$

Voor geul 1 geldt:

$$B = (+0,47728 + 0,52046 i) W + (-0,94423 - 1,20007 i) S_1,$$

$$Q_1 = S_2 = (+0,16669 - 0,73802 i) W + (+0,47728 + 0,52046 i) S_1,$$

wat oplevert:

$$B = (+0,26071 - 0,72450 i) W + (-0,01966 - 0,35901 i) N_0,$$

$$Q_1 = S_2 = (+0,30999 + 0,17148 i) W + (+0,02159 + 0,16487 i) N_0.$$

Uit de vergelijkingen voor geul 2a:

$$L = (+0,11021 + 1,19144 i) B + (-1,76347 - 2,32917 i) S_2,$$

$$Q_{2a} = S_{2b} = (+0,42574 - 0,71124 i) B + (+0,11021 + 1,19144 i) S_2$$

leidt men daarna af:

$$L = (-0,05411 - 0,18884 i) W + (+0,77149 - 0,40401 i) N_o,$$

$$Q_{2a} = S_{2b} = (-0,16582 - 0,14346 i) W + (-0,45775 - 0,09497 i) N_o.$$

Hiermede zijn alle onbekenden opgelost. Als contrôle kan men ten slotte in geul 2b de waarden van  $N_o$  en  $Q_2$  uit  $L$  en  $S_{2b}$  bepalen.

Substitutie van de bekende waarden van  $W$  en  $N_o$

$$W = -62,0 - 25,5 i \quad N_o = -74,0 + 28,0 i$$

levert als uitkomsten:

$$\left\{ \begin{array}{l} B = -23,1 + 64,3 i, \text{ ampl. } 68,3; \text{ kappagetal } 250^\circ. \\ L = -47,2 + 64,6 i, \text{ " } 80,0; \text{ " } 234^\circ. \\ S_1 = -53,2 - 47,5 i, \text{ " } 71,3; \text{ " } 138^\circ. \\ Q_1 = S_2 = -29,8 - 8,9 i, \text{ " } 31,1; \text{ " } 163^\circ. \\ Q_{2a} = S_{2b} = +43,2 + 7,3 i, \text{ " } 43,8; \text{ " } 350^\circ. \\ Q_2 = +56,7 + 24,5 i, \text{ " } 61,8; \text{ " } 337^\circ. \end{array} \right.$$

Het volgende staatje geeft de vergelijking tusschen de aangenomen en gevonden stroomsterkten (zie de opmerkingen hierover bij berekening  $Z$ ).

| Geul. | Uitkomst. |      |      | Aan-<br>genomen. | %   |
|-------|-----------|------|------|------------------|-----|
|       | begin     | eind | gem. |                  |     |
| 1     | 71,3      | 31,1 | 54   | 52,8             | 102 |
| 2a    | 31,1      | 43,8 | 29   | 27,7             | 105 |
| 2b    | 43,8      | 61,8 | 53   | 52,8             | 100 |

Het blijkt dat de overeenstemming zeer goed is, en dat de boven gevonden uitkomsten dus als definitief kunnen worden beschouwd.

Door de thans verkregen uitkomsten te vergelijken met die welke met veel te kleinen weerstand op blz. 318 waren gevonden kan men zien welken invloed een foutieve schatting van den weerstand heeft.

In den volgenden staat zijn de uitkomsten voor de toestanden  $Z$  en  $A$  vereenigd.

| Plaats.                 | Letter.               | $Z$      |           | $A$   |           | Opmerkingen.      |
|-------------------------|-----------------------|----------|-----------|-------|-----------|-------------------|
|                         |                       | ampl.    | $\approx$ | ampl. | $\approx$ |                   |
| <i>Verticaal getij.</i> |                       |          |           |       |           |                   |
| Westgat . . . . .       | $W$ .                 | 67,0     | 158°      | 67,0  | 158°      | Punt van uitgang. |
| Breezand . . . . .      | $B$ .                 | 40,4     | 246°      | 68,3  | 250°      |                   |
| Langezand . . . . .     | $L$ .                 | 78,0     | 227°      | 80,0  | 234°      | Punt van uitgang. |
| Noordgat . . . . .      | $N_o$ .               | 79,1     | 201°      | 79,1  | 201°      |                   |
| Val van Urk . . . . .   | $U$ .                 | 8,9      | 303°      | —     | —         |                   |
| Nijkerk . . . . .       | $N_y$ .               | 13,2     | 34°       | —     | —         |                   |
| <i>Stroom.</i>          |                       |          |           |       |           |                   |
| 1                       | Westgat . . . . .     | $S_1$    | 55,7      | 147°  | 71,3      | 138°              |
|                         | Breezand . . . . .    | $Q_1$    | 38,4      | 191°  |           |                   |
| 2                       | Breezand . . . . .    | $S_2$    | 28,6      | 128°  | 31,1      | 163°              |
|                         | Langezand . . . . .   | $Q_{2a}$ | 38,1      | 357°  |           |                   |
| 3                       | Noordgat . . . . .    | $Q_2$    | 54,4      | 338°  | 61,8      | 337°              |
|                         | Breezand . . . . .    | $Q_3$    | 35,6      | 56°   |           |                   |
| 3                       | Val van Urk . . . . . | $Q_{3a}$ | 34,6      | 102°  | —         | —                 |
|                         | Nijkerk . . . . .     | $S_3$    | 0,0       | 124°  |           |                   |

Voor een bespreking van deze uitkomsten kan worden verwezen naar §§ 46 en 47.

## DE UITKOMSTEN DER GETIJBEREKENINGEN.

(§§ 45, 47, 48 en 52).

De eerste berekeningen, waarbij nog niet overal van het Noordzeegetij kon worden uitgegaan (§ 45), zijn te beschouwen als een verkenning. Hun uitkomsten, die weinig van die der latere berekeningen afwijken, behoeven hier niet te worden vermeld.

De tweede groep  $Z$ ,  $A$  en  $A'$  gaat uit van de Noordzeestanden buiten het Texelsche zeegat (Westgat) en buiten het Vlie (Noordgat). De zeegaten van Eierland en Ameland zijn weggelaten; het gebied omvat niet de om die zeegaten gelegen geulenstelsels. In verband daarmee zijn de geulen 20, 24, 25, 26, 27 en 28 van het schema van figuur 29 (§ 45) bij deze berekeningen niet opgenomen. Overigens komt het schema van  $Z$  met één enkele uitzondering overeen met dat van  $Za$ . Deze eene uitzondering vormt 22, die bij  $Z$  nog niet als afzonderlijke geul in rekening is gebracht. Dit komt neer op verwaarloozing van de door het Molenrak gevormde verbinding tusschen Harlingen en het Zuidostrak en heeft ten gevolge dat het getij te Harlingen bij  $Z$  te groot en te laat wordt gevonden.

Voor de constante  $C$  is voor alle geulen de door BAZIN aangegeven waarde gebruikt.

De berekeningen  $A$  en  $A'$  voor afgesloten Zuiderzee, resp. met een dijk naar Piaam en naar Zurig, komen overeen met  $Aa$  en  $A'a$  van § 45. De verschillen zijn dezelfde als tusschen  $Z$  en  $Za$ .

De berekening  $E$  is ondernomen om een aanwijzing te verkrijgen van de veranderingen die het getij zal ondergaan wanneer de afmetingen der geulen zich op den duur aan den nieuwen toestand hebben aangepast (§ 48). Zij geldt voor de dijkrichting naar Piaam. De geulen waarin de stroom bij  $A$  sterker is gevonden dan bij  $Z$  zijn nu ruimer aangenomen, daarentegen zijn de afmetingen van de geulen, waarin door de afsluiting de stroom zal verzwakken, verkleind. Natuurlijk zal de toestand die in werkelijkheid ontstaat belangrijk hiervan afwijken, al ware het alleen maar omdat bij de geulvorming de geaardheid van den bodem een belangrijke rol speelt.

Toen door de uitvoering van  $Za$ ,  $Aa$  en  $A'a$  bleek dat de toestand om de Eierlandsche en Amelandsche zeegaten na de afsluiting der Zuiderzee bijna niet verandert, werd besloten bij het onderzoek omtrent de gevolgen van de afsluiting van het Amsteldiep weer het eenvoudiger geulennet van  $Z$  te gebruiken. De geul 19 wordt door den dijk in tweeën gesneden. Het noordelijk gedeelte, 19a, blijft het Amsteldiep voorstellen; de voor de bepaling van den weerstand aangenomen stroomsnelheid moest belangrijk worden verminderd. De Wieringermeer wordt voorgesteld door een nieuwe geul 21, die 19b vervangt. Bij de eerste berekening,  $W_1$  (§ 52) loopt deze geul van den Oever, waar 14, 17 en 18 samenkomen, in de richting van Kolhorn; zij bestaat uit twee deelen: het gebied van het Gaatje (21a) en de eigenlijke Meer (21b). Bij  $W_2$  is het uiteinde van deze geul omgebogen en in de nabijheid van Medemblik weer met het algemeene geulenstelsel in verbinding gebracht; het water stroomt nu ook door de Meer. De werkelijkheid ligt tusschen  $W_1$  en  $W_2$  in.

De groep van  $Za$  is in §§ 45 en 47 uitvoerig besproken; de gegevens en de belangrijkste resultaten zijn daar vermeld (tabellen 6, 7 en 8).

In de nu volgende tabellen zijn de resultaten voor elke plaats gegeven in drie kolommen. In de eerste is op dezelfde wijze als in de tabellen 7 en 8 de plaats in het geulennet aangeduid, de tweede bevat de berekende amplitude, de derde het kappagetal van het hoofdgetij  $M_2$ . Dit laatste getal is steeds in graden uitgedrukt, de amplitude bij het verticale getij in centimeters, bij den stroom in duizendtallen kubieke meters per seconde ( $10^9$  cm<sup>3</sup>/sec).

In de tabellen voor den stroom beteekent de letter  $s$  in de kolom voor de plaatsaanduiding het begin en een  $q$  het einde van een geul die niet uit achter elkander geschakelde stukken bestaat.

De niet ingevulde waarden zijn niet berekend.

## VERTICAAL GETIJ.

|                | Westgat       |    |     | Kaaphoofd  |    |     | Helder    |    |     | Horntje   |    |     | Oude Schild     |    |     |
|----------------|---------------|----|-----|------------|----|-----|-----------|----|-----|-----------|----|-----|-----------------|----|-----|
| Z              | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 59 | 168 | 1 b/c     | 58 | 171 | 1/3       | 54 | 177 | 3 a/b           | 52 | 184 |
| A              | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 60 | 176 | 1 b/c     | 60 | 181 | 1/3       | 60 | 191 | 3 a/b           | 61 | 200 |
| A'             | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 62 | 176 | 1 b/c     | 63 | 180 | 1/3       | 63 | 189 | 3 a/b           | —  | —   |
| E              | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 66 | 173 | 1 b/c     | 67 | 177 | 1/3       | 68 | 184 | 3 a/b           | 71 | 195 |
| W <sub>1</sub> | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 59 | 169 | 1 b/c     | 58 | 172 | 1/3       | 55 | 178 | 3 a/b           | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 60 | 168 | 1 b/c     | 59 | 172 | 1/3       | 56 | 178 | 3 a/b           | —  | —   |
| Za             | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 55 | 170 | 1 b/c     | 54 | 173 | 1/3       | 51 | 179 | 3 a/b           | 48 | 187 |
| Aa             | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 56 | 178 | 1 b/c     | 56 | 182 | 1/3       | 56 | 191 | 3 a/b           | 57 | 200 |
| A'a            | 1a            | 67 | 158 | 1 a/b      | 60 | 178 | 1 b/c     | 60 | 182 | 1/3       | 61 | 189 | 3 a/b           | 62 | 197 |
|                | Burgzand      |    |     | Robbenzand |    |     | Scheurrak |    |     | Omdraai   |    |     | Doove Balg West |    |     |
| Z              | 3 b/c         | 48 | 193 | 3/4        | 46 | 209 | —         | —  | —   | 5 a/b     | 54 | 244 | 4 a/b           | 44 | 222 |
| A              | 3 b/c         | 64 | 211 | 3/4        | 74 | 225 | —         | —  | —   | 5 a/b     | 81 | 250 | 4 a/b           | 75 | 233 |
| A'             | 3 b/c         | —  | —   | 3/4        | 76 | 219 | —         | —  | —   | 5 a/b     | 86 | 245 | 4 a/b           | —  | —   |
| E              | 3 b/c         | 75 | 203 | 3/4        | 84 | 215 | 5 a/b     | 86 | 226 | 5 b/c     | 92 | 230 | 4 a/b           | 88 | 224 |
| W <sub>1</sub> | 3 b/c         | —  | —   | 3/4        | 46 | 212 | —         | —  | —   | 5 a/b     | —  | —   | 4 a/b           | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 3 b/c         | —  | —   | 3/4        | 47 | 209 | —         | —  | —   | 5 a/b     | —  | —   | 4 a/b           | —  | —   |
| Za             | 3/23          | 43 | 196 | 23/4       | 40 | 214 | —         | —  | —   | 5 a/b     | 47 | 245 | 4 a/b           | 40 | 226 |
| Aa             | 3/23          | 58 | 210 | 23/29      | 63 | 226 | —         | —  | —   | 5 a/b     | 71 | 256 | 29/4            | 67 | 238 |
| A'a            | 3/23          | 64 | 206 | 23/29      | 71 | 221 | —         | —  | —   | 5 a/b     | 74 | 248 | 29/4            | 71 | 227 |
|                | Middelgronden |    |     | Zwemmer    |    |     | Klaasoom  |    |     | Oude Vlie |    |     | Inschot         |    |     |
| Z              | 4/6           | 42 | 261 | 6 a/b      | 45 | 260 | 6 b/c     | 53 | 254 | 6/8       | 62 | 247 | 8 a/b           | 68 | 240 |
| A              | 4/6           | 77 | 249 | 6 a/b      | 79 | 249 | 6 b/c     | 80 | 249 | 6/8       | 80 | 248 | 8 a/b           | 74 | 245 |
| A'             | 4/6           | 81 | 244 | 6 a/b      | —  | —   | 6 b/c     | 87 | 245 | 6/8       | 84 | 243 | 8 a/b           | —  | —   |
| E              | 4/6           | 94 | 239 | 6 a/b      | 97 | 243 | 6 b/c     | —  | —   | 6/8       | 97 | 243 | 8 a/b           | 93 | 237 |
| W <sub>1</sub> | 4/6           | 42 | 261 | 6 a/b      | —  | —   | 6 b/c     | —  | —   | 6/8       | 61 | 248 | 8 a/b           | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 4/6           | 42 | 260 | 6 a/b      | —  | —   | 6 b/c     | —  | —   | 6/8       | 62 | 247 | 8 a/b           | —  | —   |
| Za             | 4/6           | 44 | 260 | 6 a/b      | 47 | 261 | 6 b/c     | 52 | 258 | 6/8       | 56 | 253 | 8 a/b           | 61 | 243 |
| Aa             | 4/6           | 73 | 260 | 6 a/b      | 75 | 262 | 6 b/c     | 79 | 263 | 6/8       | 77 | 260 | 8 a/b           | 74 | 250 |
| A'a            | 4/6           | 74 | 253 | 6 a/b      | 76 | 256 | 6 b/c     | 80 | 259 | 6/8       | 79 | 257 | 8 a/b           | 76 | 248 |
|                | Langezand     |    |     | Caranan    |    |     | Spathoek  |    |     | Noordgat  |    |     | Zurig           |    |     |
| Z              | 8/11          | 72 | 234 | 11/13      | 75 | 219 | 13 a/b    | 76 | 209 | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 53 | 274 |
| A              | 8/11          | 72 | 239 | 11/13      | 75 | 233 | 13 a/b    | 75 | 211 | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 79 | 269 |
| A'             | 8/11          | 80 | 236 | 11/13      | 77 | 222 | 13 a/b    | —  | —   | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 86 | 265 |
| E              | 8/11          | 90 | 232 | 11/13      | 82 | 222 | 13 a/b    | 79 | 210 | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 98 | 244 |
| W <sub>1</sub> | 8/11          | 70 | 234 | 11/13      | 74 | 220 | 13 a/b    | —  | —   | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 8/11          | 72 | 233 | 11/13      | 74 | 220 | 13 a/b    | —  | —   | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | —  | —   |
| Za             | 8/11          | 68 | 232 | 11/13      | 70 | 224 | 13 a/b    | 71 | 213 | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 55 | 267 |
| Aa             | 8/11          | 72 | 237 | 11/13      | 71 | 227 | 13 a/b    | 71 | 215 | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 77 | 268 |
| A'a            | 8/11          | 74 | 236 | 11/13      | 72 | 227 | 13 a/b    | 71 | 215 | 13b       | 79 | 201 | 7 a/b           | 79 | 264 |

|                | Harlingen   |     |     | Pollendam       |     |     | Hendrik Tjaarspl. |    |     | Oostmeep         |    |     | Westmeep              |    |     |
|----------------|-------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-------------------|----|-----|------------------|----|-----|-----------------------|----|-----|
| Z              | 7/10        | 69  | 278 | 9 a/b           | 70  | 272 | 9 b/c             | 70 | 251 | 12 a/b           | 82 | 259 | 12 b/c                | 76 | 238 |
| A              | 7/10        | 84  | 279 | 9 a/b           | 83  | 275 | 9 b/c             | 76 | 257 | 12 a/b           | 82 | 265 | 12 b/c                | 79 | 245 |
| A'             | 7/10        | 89  | 270 | 9 a/b           | 89  | 268 | 9 b/c             | —  | —   | 12 a/b           | 92 | 261 | 12 b/c                | —  | —   |
| E              | 7/10        | 101 | 255 | 9 a/b           | 100 | 255 | 9 b/c             | 96 | 243 | 10/20            | 99 | 254 | 12 a/b                | 85 | 234 |
| W <sub>1</sub> | 7/10        | 68  | 279 | 9 a/b           | —   | —   | 9 b/c             | —  | —   | 12 a/b           | —  | —   | 12 b/c                | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 7/10        | 68  | 278 | 9 a/b           | —   | —   | 9 b/c             | —  | —   | 12 a/b           | —  | —   | 12 b/c                | —  | —   |
| Za             | 7/10        | 66  | 267 | 9 a/b           | 67  | 263 | 9 b/c             | 69 | 248 | 10/20            | 77 | 260 | 12 a/b                | 71 | 240 |
| Aa             | 7/10        | 81  | 272 | 9 a/b           | 79  | 268 | 9 b/c             | 76 | 253 | 10/20            | 81 | 264 | 12 a/b                | 74 | 243 |
| A'a            | 7/10        | 83  | 269 | 9 a/b           | 81  | 266 | 9 b/c             | 78 | 251 | 10/20            | 82 | 263 | 12 a/b                | 74 | 243 |
|                | Nieuw Bildt |     |     | <u>Bornrif.</u> |     |     | Vianensveldje     |    |     | Kolk             |    |     | <u>Eierl. gronden</u> |    |     |
| Z              | 10/12       | 84  | 277 | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| A              | 10/12       | 88  | 282 | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| A'             | 10/12       | 97  | 277 | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| E              | 20a         | 103 | 263 | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| W <sub>1</sub> | 10/12       | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 10/12       | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| Za             | 20 a/b      | 79  | 267 | 20b             | 83  | 225 | 27 b/c            | 74 | 245 | 27 a/b           | 67 | 230 | 28b                   | 76 | 184 |
| Aa             | 20 a/b      | 82  | 270 | 20b             | 83  | 225 | 27 b/c            | 80 | 249 | 27 a/b           | 67 | 232 | 28b                   | 76 | 184 |
| A'a            | 20 a/b      | 82  | 270 | 20b             | 83  | 225 | 27 b/c            | 76 | 248 | 27 a/b           | 67 | 232 | 28b                   | 76 | 184 |
|                | Stanley     |     |     | Eierland        |     |     | Jack Yst          |    |     | Binnenbreesem    |    |     | Breehorn              |    |     |
| Z              | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 2/18                  | 44 | 199 |
| A              | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 2 a/b                 | 66 | 211 |
| A'             | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 2 a/b                 | 70 | 208 |
| E              | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 2 a/b                 | 76 | 200 |
| W <sub>1</sub> | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 2/18                  | 50 | 198 |
| W <sub>2</sub> | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 2/18                  | 53 | 196 |
| Za             | 28 a/b      | 71  | 190 | 26/28           | 68  | 199 | 24/26             | 57 | 229 | 24 a/b           | 48 | 238 | 2/18                  | 40 | 199 |
| Aa             | 28 a/b      | 71  | 191 | 26/28           | 67  | 201 | 24/26             | 59 | 236 | 24 a/b           | 57 | 244 | 2 a/b                 | 59 | 212 |
| A'a            | 28 a/b      | 71  | 191 | 26/28           | 67  | 201 | 24/26             | 62 | 235 | 24 a/b           | 61 | 242 | 2 a/b                 | 65 | 208 |
|                | Westerland  |     |     | Ijpendam        |     |     | Waterkaap         |    |     | Kolhorn          |    |     | Piaam                 |    |     |
| Z              | 19 a/b      | 28  | 236 | 14/17           | 32  | 225 | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 15 a/b                | 37 | 264 |
| A              | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| A'             | —           | —   | —   | —               | —   | —   | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| E              | —           | —   | —   | 2 b/c           | 80  | 211 | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| W <sub>1</sub> | 19          | 54  | 200 | 14/17           | 33  | 233 | 21 a/b            | 35 | 259 | 21b              | 36 | 260 | 15 a/b                | —  | —   |
| W <sub>2</sub> | 19          | 56  | 198 | 14/17           | 34  | 224 | 21 a/b            | 20 | 250 | 21 <sup>1)</sup> | 28 | 253 | 15 a/b                | —  | —   |
| Za             | 19 a/b      | 25  | 236 | 14/17           | 28  | 229 | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | 15 a/b                | 35 | 265 |
| Aa             | —           | —   | —   | 2 b/c           | 68  | 239 | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |
| A'a            | —           | —   | —   | 2 b/c           | 71  | 228 | —                 | —  | —   | —                | —  | —   | —                     | —  | —   |

1) halverwege geul 21b.

|                | Vrouwenzand |    |     | Enkhuizerzand |     |     | Lemmer |     |     | Urk    |     |     | Elburg |     |    |
|----------------|-------------|----|-----|---------------|-----|-----|--------|-----|-----|--------|-----|-----|--------|-----|----|
| Z              | 16/17       | 19 | 254 | 16 e/f        | 6,8 | 290 | 16 d/e | 5,5 | 322 | 16 c/d | 6,1 | 347 | 16 b/c | 8,6 | 15 |
| A              | —           | —  | —   | —             | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —  |
| A'             | —           | —  | —   | —             | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —  |
| E              | —           | —  | —   | —             | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —  |
| W <sub>1</sub> | 16/17       | 17 | 259 | 16 e/f        | —   | —   | 16 d/e | —   | —   | 16 c/d | —   | —   | 16 b/c | —   | —  |
| W <sub>2</sub> | 16/17       | 19 | 255 | 16 e/f        | —   | —   | 16 d/e | —   | —   | 16 c/d | —   | —   | 16 b/c | —   | —  |
| Za             | 16/17       | 18 | 255 | 16 e/f        | 6,3 | 291 | 16 d/e | 5,1 | 329 | 16 c/d | 5,8 | 353 | 16 b/c | 8,8 | 20 |
| Aa             | —           | —  | —   | —             | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —  |
| A'a            | —           | —  | —   | —             | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —   | —      | —   | —  |

|                | Marken |      |    | Nijkerk |      |    |
|----------------|--------|------|----|---------|------|----|
| Z              | 16 a/b | 10,4 | 17 | 16a     | 10,9 | 20 |
| A              | —      | —    | —  | —       | —    | —  |
| A'             | —      | —    | —  | —       | —    | —  |
| E              | —      | —    | —  | —       | —    | —  |
| W <sub>1</sub> | 16 a/b | —    | —  | 16a     | 9,5  | 27 |
| W <sub>2</sub> | 16 a/b | —    | —  | 16a     | 10,3 | 23 |
| Za             | 16 a/b | 9,6  | 22 | 16a     | 10,0 | 23 |
| Aa             | —      | —    | —  | —       | —    | —  |
| A'a            | —      | —    | —  | —       | —    | —  |

## STROOM.

|                | Heldersche zeegat |    |     |           |    |     |        |    |     |         |    |     | Horntje |    |     |
|----------------|-------------------|----|-----|-----------|----|-----|--------|----|-----|---------|----|-----|---------|----|-----|
|                | Westgat           |    |     | Kaaphoofd |    |     | Helder |    |     | Horntje |    |     |         |    |     |
| Z              | 1a                | 50 | 147 | 1 a/b     | 49 | 157 | 1 b/c  | 49 | 157 | 1c      | 48 | 160 | 3a      | 36 | 163 |
| A              | 1a                | 73 | 133 | 1 a/b     | 68 | 139 | 1 b/c  | 68 | 139 | 1c      | 66 | 140 | 3a      | 53 | 146 |
| A'             | 1a                | 70 | 127 | 1 a/b     | 65 | 133 | 1 b/c  | 65 | 133 | 1c      | 63 | 135 | 3a      | 50 | 140 |
| E              | 1a                | 84 | 125 | 1 a/b     | 78 | 130 | 1 b/c  | 78 | 130 | 1c      | 78 | 131 | 3a      | 63 | 136 |
| W <sub>1</sub> | 1a                | 52 | 146 | 1 a/b     | 50 | 155 | 1 b/c  | 50 | 155 | 1c      | 49 | 158 | 3a      | 38 | 164 |
| W <sub>2</sub> | 1a                | 50 | 143 | 1 a/b     | 48 | 152 | 1 b/c  | 48 | 153 | 1c      | 47 | 154 | 3a      | 35 | 162 |
| Za             | 1a                | 47 | 147 | 1 a/b     | 46 | 158 | 1 b/c  | 46 | 159 | 1c      | 45 | 161 | 3a      | 34 | 163 |
| Aa             | 1a                | 65 | 136 | 1 a/b     | 61 | 143 | 1 b/c  | 60 | 144 | 1c      | 59 | 145 | 3a      | 46 | 150 |
| A'a            | 1a                | 63 | 128 | 1 a/b     | 58 | 136 | 1 b/c  | 58 | 136 | 1c      | 56 | 138 | 3a      | 43 | 143 |

|                | Texelstroom |    |     |          |    |     | Texelstroom Oost |    |     |            |    |     | Robbenzand |     |     |
|----------------|-------------|----|-----|----------|----|-----|------------------|----|-----|------------|----|-----|------------|-----|-----|
|                | Oude Schild |    |     | Burgzand |    |     | Burgzand         |    |     | Robbenzand |    |     |            |     |     |
| Z              | 3 a/b       | 35 | 164 | 3 b/c    | 34 | 168 | 3 b/c            | 34 | 168 | 3c         | 31 | 181 | 5a         | 6,1 | 141 |
| A              | 3 a/b       | 51 | 147 | 3 b/c    | 49 | 149 | 3 b/c            | 49 | 149 | 3c         | 39 | 154 | 5a         | 7,7 | 153 |
| A'             | 3 a/b       | —  | —   | 3 b/c    | —  | —   | 3 b/c            | —  | —   | 3c         | 35 | 149 | 5a         | 8,2 | 146 |
| E              | 3 a/b       | 62 | 136 | 3 b/c    | 58 | 138 | 3 b/c            | 58 | 138 | 3c         | 45 | 145 | 5a         | 9,7 | 139 |
| W <sub>1</sub> | 3 a/b       | —  | —   | 3 b/c    | —  | —   | 3 b/c            | —  | —   | 3c         | 33 | 181 | 5a         | 5,8 | 140 |
| W <sub>2</sub> | 3 a/b       | —  | —   | 3 b/c    | —  | —   | 3 b/c            | —  | —   | 3c         | 31 | 181 | 5a         | 6,2 | 142 |
| Za             | 3 a/b       | 33 | 165 | 3 b/c    | 32 | 167 | 23 s             | 29 | 174 | 23 q       | 28 | 181 | 5a         | 5,2 | 149 |
| Aa             | 3 a/b       | 45 | 152 | 3 b/c    | 43 | 154 | 23 s             | 37 | 155 | 23 q       | 28 | 153 | 5a         | 7,2 | 159 |
| A'a            | 3 a/b       | 42 | 145 | 3 b/c    | 39 | 147 | 23 s             | 33 | 148 | 23 q       | 33 | 160 | 5a         | 7,7 | 154 |

| Scheurrak-Oude Vlie |       |      |     |                       |      |     |               |      |     | Doove       |      |     |                 |      |     |
|---------------------|-------|------|-----|-----------------------|------|-----|---------------|------|-----|-------------|------|-----|-----------------|------|-----|
| Scheurrak           |       |      |     | Omdraai               |      |     | Oude Vlie     |      |     | Robbenzand  |      |     | Doove Balg West |      |     |
| Z                   | —     | —    | —   | 5 a/b                 | 2,1  | 150 | 5b            | 0,7  | 45  | 4a          | 7,2  | 170 | 4 a/b           | 6,8  | 174 |
| A                   | —     | —    | —   | 5 a/b                 | 1,5  | 160 | 5b            | 2,6  | 335 | 4a          | 29,4 | 153 | 4 a/b           | 21,8 | 158 |
| A'                  | —     | —    | —   | 5 a/b                 | 1,7  | 150 | 5b            | 2,1  | 329 | 4a          | 24,6 | 150 | 4 a/b           | —    | —   |
| E                   | 5 a/b | 5,9  | 145 | 5 b/c                 | 2,5  | 154 | 5c            | 1,2  | 340 | 4a          | 33,8 | 144 | 4 a/b           | 24,9 | 149 |
| W <sub>1</sub>      | —     | —    | —   | 5 a/b                 | —    | —   | 5b            | 0,9  | 233 | 4a          | 7,1  | 174 | 4 a/b           | —    | —   |
| W <sub>2</sub>      | —     | —    | —   | 5 a/b                 | —    | —   | 5b            | 0,6  | 17  | 4a          | 7,4  | 171 | 4 a/b           | —    | —   |
| Za                  | —     | —    | —   | 5 a/b                 | 2,4  | 156 | 5b            | 0,4  | 88  | 4a          | 6,9  | 163 | 4 a/b           | 6,3  | 162 |
| Aa                  | —     | —    | —   | 5 a/b                 | 2,8  | 167 | 5b            | 0,7  | 5   | 29s         | 26,0 | 160 | 29q             | 23,0 | 162 |
| A'a                 | —     | —    | —   | 5 a/b                 | 3,1  | 169 | 5b            | 0,4  | 326 | 29s         | 20,6 | 153 | 29q             | 17,8 | 156 |
| Balg                |       |      |     |                       |      |     |               |      |     | Zuidoostrak |      |     |                 |      |     |
| Doove Balg Oost     |       |      |     | Middelgronden         |      |     | Middelgronden |      |     | Zwemmer     |      |     | Klaasoom        |      |     |
| Z                   | —     | —    | —   | 4b                    | 5,2  | 183 | 6a            | 6,2  | 96  | 6 a/b       | 6,0  | 85  | 6 b/c           | 5,9  | 72  |
| A                   | —     | —    | —   | 4b                    | 12,1 | 162 | 6a            | 4,8  | 143 | 6 a/b       | 2,8  | 131 | 6 b/c           | 1,5  | 74  |
| A'                  | —     | —    | —   | 4b                    | 14,0 | 158 | 6a            | 6,3  | 138 | 6 a/b       | —    | —   | 6 b/c           | 2,2  | 102 |
| E                   | —     | —    | —   | 4b                    | 13,5 | 158 | 6a            | 6,0  | 156 | 6 a/b       | 3,4  | 161 | —               | —    | —   |
| W <sub>1</sub>      | —     | —    | —   | 4b                    | 5,0  | 187 | 6a            | 6,2  | 95  | 6 a/b       | —    | —   | 6 b/c           | —    | —   |
| W <sub>2</sub>      | —     | —    | —   | 4b                    | 5,6  | 153 | 6a            | 6,4  | 95  | 6 a/b       | —    | —   | 6 b/c           | —    | —   |
| Za                  | 4 a/b | 6,3  | 162 | 4b                    | 4,7  | 171 | 6a            | 4,5  | 116 | 6 a/b       | 4,0  | 104 | 6 b/c           | 3,7  | 70  |
| Aa                  | 4s    | 17,4 | 165 | 4q                    | 8,0  | 169 | 6a            | 4,0  | 164 | 6 a/b       | 2,2  | 159 | 6 b/c           | 1,6  | 18  |
| A'a                 | 4s    | 12,5 | 162 | 4q                    | 9,6  | 166 | 6a            | 4,6  | 162 | 6 a/b       | 2,8  | 162 | 6 b/c           | 1,0  | 11  |
| Inschot             |       |      |     |                       |      |     |               |      |     | Vlie-       |      |     |                 |      |     |
| Oude Vlie           |       |      |     | Oude Vlie             |      |     | Inschot       |      |     | Langezand   |      |     | Langezand       |      |     |
| Z                   | 6c    | 6,4  | 53  | 8a                    | 6,9  | 50  | 8 a/b         | 8,0  | 32  | 8b          | 9,1  | 20  | 11s             | 23   | 7   |
| A                   | 6c    | 2,6  | 9   | 8a                    | 5,5  | 353 | 8 a/b         | 8,2  | 348 | 8b          | 10,5 | 347 | 11s             | 25   | 351 |
| A'                  | 6c    | 2,5  | 19  | 8a                    | 4,3  | 1   | 8 a/b         | —    | —   | 8b          | 9,9  | 344 | 11s             | 25   | 348 |
| E                   | 6b    | 3,4  | 337 | 8a                    | 4,6  | 334 | 8 a/b         | 8,0  | 331 | 8b          | 11,0 | 330 | 11s             | 33   | 332 |
| W <sub>1</sub>      | 6c    | 6,4  | 51  | 8a                    | 7,3  | 40  | 8 a/b         | —    | —   | 8b          | 9,4  | 20  | 11s             | 23   | 7   |
| W <sub>2</sub>      | 6c    | 6,5  | 52  | 8a                    | —    | —   | 8 a/b         | —    | —   | 8b          | 9,2  | 19  | 11s             | —    | —   |
| Za                  | 6c    | 4,0  | 51  | 8a                    | 8,3  | 38  | 8 a/b         | 9,1  | 31  | 8b          | 9,8  | 23  | 11s             | 21   | 6   |
| Aa                  | 6c    | 3,0  | 2   | 8a                    | 8,7  | 4   | 8 a/b         | 10,1 | 1   | 8b          | 11,4 | 358 | 11s             | 25   | 353 |
| A'a                 | 6c    | 2,4  | 358 | 8a                    | 8,2  | 359 | 8 a/b         | 9,6  | 357 | 8b          | 10,8 | 353 | 11s             | 24   | 350 |
| -stroom             |       |      |     | Terschellinger zeegat |      |     |               |      |     |             |      |     |                 |      |     |
| Caranan             |       |      |     | Caranan               |      |     | Spathoek      |      |     | Noordgat    |      |     | Middelgronden   |      |     |
| Z                   | 11q   | 27   | 357 | 13a                   | 56   | 351 | 13 a/b        | 59   | 349 | 13b         | 64   | 344 | 7a              | 5,1  | 152 |
| A                   | 11q   | 30   | 345 | 13a                   | 65   | 349 | 13 a/b        | 67   | 346 | 13b         | 71   | 339 | 7a              | 7,3  | 180 |
| A'                  | 11q   | 31   | 342 | 13a                   | 65   | 345 | 13 a/b        | —    | —   | 13b         | 73   | 338 | 7a              | 8,3  | 172 |
| E                   | 11q   | 35   | 331 | 13a                   | 76   | 336 | 13 a/b        | 79   | 334 | 13b         | 85   | 330 | 7a              | 7,4  | 160 |
| W <sub>1</sub>      | 11q   | 27   | 357 | 13a                   | 58   | 352 | 13 a/b        | —    | —   | 13b         | 66   | 344 | 7a              | 5,0  | 151 |
| W <sub>2</sub>      | 11q   | 27   | 356 | 13a                   | 58   | 352 | 13 a/b        | —    | —   | 13b         | 66   | 343 | 7a              | —    | —   |
| Za                  | 11q   | 22   | 4   | 13a                   | 53   | 353 | 13 a/b        | 55   | 350 | 13b         | 62   | 342 | 7a              | 3,8  | 136 |
| Aa                  | 11q   | 26   | 352 | 13a                   | 60   | 349 | 13 a/b        | 62   | 347 | 13b         | 69   | 341 | 7a              | 4,0  | 171 |
| A'a                 | 11q   | 26   | 349 | 13a                   | 60   | 348 | 13 a/b        | 62   | 346 | 13b         | 69   | 340 | 7a              | 5,1  | 170 |

|                | Boontjes |     |     |           |     |     | Molenrak  |     |     |           |     |     | Harlingen |     |     |
|----------------|----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
|                | Zurig    |     |     | Harlingen |     |     | Harlingen |     |     | Oude Vlie |     |     |           |     |     |
| Z              | 7 a/b    | 4,0 | 135 | 7b        | 3,1 | 124 | —         | —   | —   | —         | —   | —   | 9a        | 1,8 | 61  |
| A              | 7 a/b    | 5,4 | 177 | 7b        | 3,0 | 184 | —         | —   | —   | —         | —   | —   | 9a        | 0,1 | 0   |
| A'             | 7 a/b    | 6,3 | 174 | 7b        | 4,9 | 174 | —         | —   | —   | —         | —   | —   | 9a        | 1,1 | 158 |
| E              | 7 a/b    | 5,1 | 164 | 7b        | 2,4 | 168 | —         | —   | —   | —         | —   | —   | 9a        | 1,5 | 164 |
| W <sub>1</sub> | 7 a/b    | —   | —   | 7b        | 3,0 | 118 | —         | —   | —   | —         | —   | —   | 9a        | 1,9 | 59  |
| W <sub>2</sub> | 7 a/b    | —   | —   | 7b        | 3,0 | 119 | —         | —   | —   | —         | —   | —   | 9a        | 1,9 | 61  |
| Za             | 7 a/b    | 3,1 | 126 | 7b        | 2,4 | 85  | 22s       | 1,0 | 323 | 22q       | 3,3 | 344 | 9a        | 1,8 | 52  |
| Aa             | 7 a/b    | 2,4 | 171 | 7b        | 0,5 | 98  | 22s       | 0,6 | 45  | 22q       | 3,7 | 0   | 9a        | 1,1 | 5   |
| A'a            | 7 a/b    | 3,5 | 170 | 7b        | 0,9 | 148 | 22s       | 0,6 | 59  | 22q       | 3,8 | 359 | 9a        | 0,8 | 0   |

|                | Blauwe Slenk |     |     |                   |      |     | Vlakte van Oosterbierum |    |     |           |     |     |          |     |     |
|----------------|--------------|-----|-----|-------------------|------|-----|-------------------------|----|-----|-----------|-----|-----|----------|-----|-----|
|                | Pollendam    |     |     | Hendrik Tjaarspl. |      |     | Langezand               |    |     | Harlingen |     |     | Oostmeep |     |     |
| Z              | 9 a/b        | 5,0 | 23  | 9 b/c             | 10,5 | 8   | 9c                      | 14 | 358 | 10s       | 2,6 | 160 | —        | —   | —   |
| A              | 9 a/b        | 4,5 | 6   | 9 b/c             | 11,2 | 354 | 9c                      | 15 | 351 | 10s       | 3,0 | 189 | —        | —   | —   |
| A'             | 9 a/b        | 3,7 | 6   | 9 b/c             | —    | —   | 9c                      | 15 | 350 | 10s       | 3,8 | 178 | —        | —   | —   |
| E              | 9 a/b        | 3,9 | 348 | 9 b/c             | 10,4 | 337 | 9c                      | 17 | 336 | 10s       | 0,8 | 173 | 10q      | 1,6 | 338 |
| W <sub>1</sub> | 9 a/b        | —   | —   | 9 b/c             | —    | —   | 9c                      | 14 | 358 | 10s       | 2,6 | 159 | —        | —   | —   |
| W <sub>2</sub> | 9 a/b        | —   | —   | 9 b/c             | —    | —   | 9c                      | —  | —   | 10s       | —   | —   | —        | —   | —   |
| Za             | 9 a/b        | 4,4 | 17  | 9 b/c             | 8,5  | 1   | 9c                      | 12 | 352 | 10s       | 2,5 | 137 | 10q      | 3,8 | 20  |
| Aa             | 9 a/b        | 4,7 | 2   | 9 b/c             | 9,8  | 356 | 9c                      | 14 | 350 | 10s       | 1,8 | 181 | 10q      | 4,3 | 5   |
| A'a            | 9 a/b        | 4,5 | 0   | 9 b/c             | 9,8  | 353 | 9c                      | 14 | 349 | 10s       | 2,1 | 177 | 10q      | 4,1 | 3   |

|                | Westmeep    |     |    |             |     |    |          |    |     |          |    |     |         |    |     |
|----------------|-------------|-----|----|-------------|-----|----|----------|----|-----|----------|----|-----|---------|----|-----|
|                | Nieuw Bildt |     |    | Nieuw Bildt |     |    | Oostmeep |    |     | Westmeep |    |     | Caranan |    |     |
| Z              | 10q         | 2,7 | 43 | 12a         | 2,7 | 43 | 12 a/b   | 14 | 2   | 12 b/c   | 27 | 354 | 12c     | 31 | 348 |
| A              | 10q         | 2,1 | 19 | 12a         | 2,1 | 19 | 12 a/b   | 14 | 8   | 12 b/c   | 27 | 357 | 12c     | 36 | 351 |
| A'             | 10q         | 1,8 | 24 | 12a         | 1,8 | 24 | 12 a/b   | 15 | 4   | 12 b/c   | —  | —   | 12c     | 35 | 348 |
| E              | —           | —   | —  | —           | —   | —  | 12a      | 19 | 348 | 12 a/b   | 36 | 342 | 12b     | 41 | 341 |
| W <sub>1</sub> | 10q         | —   | —  | 12a         | —   | —  | 12 a/b   | —  | —   | 12 b/c   | —  | —   | 12c     | 31 | 348 |
| W <sub>2</sub> | 10q         | —   | —  | 12a         | —   | —  | 12 a/b   | —  | —   | 12 b/c   | —  | —   | 12c     | —  | —   |
| Za             | —           | —   | —  | —           | —   | —  | 12a      | 12 | 3   | 12 a/b   | 23 | 353 | 12b     | 28 | 347 |
| Aa             | —           | —   | —  | —           | —   | —  | 12a      | 13 | 3   | 12 a/b   | 24 | 354 | 12b     | 30 | 349 |
| A'a            | —           | —   | —  | —           | —   | —  | 12a      | 13 | 2   | 12 a/b   | 25 | 354 | 12b     | 30 | 348 |

|                | Abt—Kromme Balg |      |     |             |     |     |         |    |     | Geulen binnen |     |     |               |     |    |
|----------------|-----------------|------|-----|-------------|-----|-----|---------|----|-----|---------------|-----|-----|---------------|-----|----|
|                | Oostmeep        |      |     | Nieuw Bildt |     |     | Bornrif |    |     | Stortemelk    |     |     | Vianensveldje |     |    |
| Z              | —               | —    | —   | —           | —   | —   | —       | —  | —   | —             | —   | —   | —             | —   | —  |
| A              | —               | —    | —   | —           | —   | —   | —       | —  | —   | —             | —   | —   | —             | —   | —  |
| A'             | —               | —    | —   | —           | —   | —   | —       | —  | —   | —             | —   | —   | —             | —   | —  |
| E              | 20s             | 17,7 | 170 | 20q         | 0,0 | —   | —       | —  | —   | —             | —   | —   | —             | —   | —  |
| W <sub>1</sub> | —               | —    | —   | —           | —   | —   | —       | —  | —   | —             | —   | —   | —             | —   | —  |
| W <sub>2</sub> | —               | —    | —   | —           | —   | —   | —       | —  | —   | —             | —   | —   | —             | —   | —  |
| Za             | 20a             | 8,5  | 175 | 20 a/b      | 3,3 | 358 | 20b     | 17 | 344 | 27c           | 4,3 | 329 | 27 c/b        | 0,1 | 45 |
| Aa             | 20a             | 8,4  | 181 | 20 a/b      | 4,0 | 357 | 20b     | 18 | 344 | 27c           | 4,3 | 332 | 27 c/b        | 0,3 | 90 |
| A'a            | 20a             | 8,6  | 181 | 20 a/b      | 3,9 | 354 | 20b     | 18 | 344 | 27c           | 4,4 | 333 | 27 c/b        | 0,3 | 72 |

| Vlieland                   |        |     |           |     |     |     | Eierlandsche zeegat   |      |     |           |      |     |                |      |     |
|----------------------------|--------|-----|-----------|-----|-----|-----|-----------------------|------|-----|-----------|------|-----|----------------|------|-----|
| Kolk                       |        |     | Eierland  |     |     |     | Eierland              |      |     | Stanley   |      |     | Eierl. gronden |      |     |
| Z                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| A                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| A'                         | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| E                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| W <sub>1</sub>             | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| W <sub>2</sub>             | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| Za                         | 27 b/a | 2,3 | 146       | 27a | 3,5 | 137 | 28a                   | 8,7  | 327 | 28 a/b    | 9,3  | 325 | 28b            | 9,6  | 321 |
| Aa                         | 27 b/a | 2,4 | 144       | 27a | 3,6 | 134 | 28a                   | 9,3  | 328 | 28 a/b    | 10,0 | 325 | 28b            | 10,5 | 322 |
| A'a                        | 27 b/a | 2,4 | 144       | 27a | 3,4 | 138 | 28a                   | 9,4  | 326 | 28 a/b    | 10,1 | 323 | 28b            | 10,5 | 320 |
| Vogelzwin                  |        |     |           |     |     |     | Driesprongplaat       |      |     |           |      |     |                |      |     |
| Eierland                   |        |     | Jack Yst  |     |     |     | Jack Yst              |      |     | Oude Vlie |      |     | Foksdiep       |      |     |
| Z                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| A                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| A'                         | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| E                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| W <sub>1</sub>             | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| W <sub>2</sub>             | —      | —   | —         | —   | —   | —   | —                     | —    | —   | —         | —    | —   | —              | —    | —   |
| Za                         | 26q    | 5,1 | 334       | 26s | 3,6 | 347 | 25q                   | 1,9  | 342 | 25s       | 0,9  | 162 | 24b            | 1,8  | 351 |
| Aa                         | 26q    | 5,8 | 333       | 26s | 4,2 | 342 | 25q                   | 2,0  | 342 | 25s       | 1,5  | 188 | 24b            | 2,1  | 341 |
| A'a                        | 26q    | 5,9 | 330       | 26s | 4,1 | 338 | 25q                   | 2,1  | 343 | 25s       | 1,5  | 188 | 24b            | 1,8  | 334 |
| Binnenbreesem              |        |     |           |     |     |     | Malzwin               |      |     |           |      |     |                |      |     |
| Binnenbreesem              |        |     | Burgzand  |     |     |     | Horntje               |      |     | Breehorn  |      |     | Breehorn       |      |     |
| Z                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2s                    | 13   | 154 | 2q        | 11,1 | 168 | 19a            | 5,9  | 174 |
| A                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2a                    | 14   | 122 | 2 a/b     | 9,7  | 126 | —              | —    | —   |
| A'                         | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2a                    | 14   | 117 | 2 a/b     | 8,4  | 125 | —              | —    | —   |
| E                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2a                    | 16   | 114 | 2 a/b     | 10,7 | 119 | —              | —    | —   |
| W <sub>1</sub>             | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2s                    | 12   | 137 | 2q        | 9,6  | 150 | 19s            | 3,4  | 110 |
| W <sub>2</sub>             | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2s                    | 12   | 134 | 2q        | 9,1  | 148 | 19s            | 3,5  | 108 |
| Za                         | 24 b/a | 1,3 | 94        | 24a | 4,9 | 128 | 2s                    | 11   | 158 | 2q        | 10,0 | 172 | 19a            | 5,3  | 177 |
| Aa                         | 24 b/a | 0,7 | 117       | 24a | 5,5 | 144 | 2a                    | 14   | 128 | 2 a/b     | 8,6  | 136 | —              | —    | —   |
| A'a                        | 24 b/a | 0,9 | 131       | 24a | 6,1 | 142 | 2a                    | 14   | 121 | 2 a/b     | 8,0  | 130 | —              | —    | —   |
| Amsteldiep — Wieringermeer |        |     |           |     |     |     | Wierbalg — Javaruggen |      |     |           |      |     |                |      |     |
| Westerland                 |        |     | Medemblik |     |     |     | Breehorn              |      |     | den Oever |      |     | Ilpendam       |      |     |
| Z                          | 19 a/b | 4,6 | 198       | 19b | 3,3 | 264 | 18s                   | 5,5  | 160 | 18q       | 3,6  | 198 | —              | —    | —   |
| A                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2 a/b                 | 9,7  | 127 | —         | —    | —   | 2b             | 1,6  | 345 |
| A'                         | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2 a/b                 | 8,4  | 125 | —         | —    | —   | 2b             | 1,9  | 328 |
| E                          | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2 a/b                 | 10,7 | 119 | 2 b/c     | 4,4  | 123 | 2c             | 1,8  | 315 |
| W <sub>1</sub>             | 19q    | 0,0 | 110       | —   | —   | —   | 18s                   | 7,4  | 168 | 18q       | 5,4  | 195 | —              | —    | —   |
| W <sub>2</sub>             | 19q    | 0,0 | 108       | 21b | 3,8 | 294 | 18s                   | 6,8  | 167 | 18q       | 5,1  | 200 | —              | —    | —   |
| Za                         | 19 a/b | 4,4 | 197       | 19b | 3,1 | 264 | 18s                   | 4,8  | 166 | 18q       | 3,4  | 190 | —              | —    | —   |
| Aa                         | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2 a/b                 | 8,6  | 136 | 2 b/c     | 1,8  | 121 | —              | —    | —   |
| A'a                        | —      | —   | —         | —   | —   | —   | 2 a/b                 | 8,0  | 130 | 2 b/c     | 0,4  | 76  | —              | —    | —   |

|                | Vlieter          |     |     |             |     |     |               |    |     | Wieringermeer                |      |     |           |      |     |
|----------------|------------------|-----|-----|-------------|-----|-----|---------------|----|-----|------------------------------|------|-----|-----------|------|-----|
|                | Breezand         |     |     | Robbenzand  |     |     | Ipendam       |    |     | den Oever                    |      |     | Waterkaap |      |     |
| Z              | —                | —   | —   | 14s         | 20  | 197 | 14q           | 19 | 210 | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A'             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| E              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| W <sub>1</sub> | —                | —   | —   | 14s         | 22  | 193 | 14q           | 20 | 205 | 21a                          | 10,2 | 167 | 21 a/b    | 7,8  | 170 |
| W <sub>2</sub> | —                | —   | —   | 14s         | 20  | 196 | 14q           | 19 | 210 | 21a                          | 4,1  | 198 | 21 a/b    | 3,5  | 217 |
| Za             | —                | —   | —   | 14s         | 17  | 200 | 14q           | 16 | 215 | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| Aa             | 2c               | 5,7 | 333 | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A'a            | 2c               | 5,5 | 320 | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
|                | Wieringer Vlaak  |     |     |             |     |     |               |    |     | Middelgronden—Friesche Vlaak |      |     |           |      |     |
|                | Kolhorn          |     |     | Ipendam     |     |     | Vrouwenzand   |    |     | Middelgronden                |      |     | Piaam     |      |     |
| Z              | —                | —   | —   | 17s         | 22  | 208 | 17q           | 19 | 233 | 15b                          | 8,6  | 90  | 15 b/a    | 10,5 | 112 |
| A              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A'             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| E              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| W <sub>1</sub> | 21b              | 0,0 | 190 | 17s         | 17  | 222 | 17q           | 17 | 244 | 15b                          | 9,5  | 89  | 15 b/a    | —    | —   |
| W <sub>2</sub> | 21 <sup>1)</sup> | 3,0 | 258 | 17s         | 20  | 210 | 17q           | 18 | 231 | 15b                          | 9,1  | 101 | 15 b/a    | —    | —   |
| Za             | —                | —   | —   | 17s         | 20  | 211 | 17q           | 16 | 237 | 15b                          | 8,7  | 85  | 15 b/a    | 9,1  | 110 |
| Aa             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A'a            | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
|                | Kom der          |     |     |             |     |     |               |    |     |                              |      |     |           |      |     |
|                | Vrouwenzand      |     |     | Vrouwenzand |     |     | Enkhuizerzand |    |     | Lemmer                       |      |     | Urk       |      |     |
| Z              | 15a              | 15  | 135 | 16f         | 30  | 88  | 16 f/e        | 30 | 96  | 16 e/d                       | 29   | 98  | 16 d/c    | 26   | 103 |
| A              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A'             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| E              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| W <sub>1</sub> | 15a              | 14  | 130 | 16f         | 26  | 93  | 16 f/e        | —  | —   | 16 e/d                       | —    | —   | 16 d/c    | —    | —   |
| W <sub>2</sub> | 15a              | 14  | 131 | 16f         | 28  | 91  | 16 f/e        | —  | —   | 16 e/d                       | —    | —   | 16 d/c    | —    | —   |
| Za             | 15a              | 13  | 136 | 16f         | 27  | 89  | 16 f/e        | 28 | 100 | 16 e/d                       | 27   | 103 | 16 d/c    | 24   | 107 |
| Aa             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| A'a            | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   | —                            | —    | —   | —         | —    | —   |
| Zuiderzee      |                  |     |     |             |     |     |               |    |     |                              |      |     |           |      |     |
|                | Elburg           |     |     | Marken      |     |     | Nijkerk       |    |     |                              |      |     |           |      |     |
|                |                  |     |     |             |     |     |               |    |     |                              |      |     |           |      |     |
| Z              | 16 c/b           | 16  | 107 | 16 b/a      | 5,5 | 108 | 16a           | 0  | 110 |                              |      |     |           |      |     |
| A              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   |                              |      |     |           |      |     |
| A'             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   |                              |      |     |           |      |     |
| E              | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   |                              |      |     |           |      |     |
| W <sub>1</sub> | 16 c/b           | —   | —   | 16 b/a      | —   | —   | 16a           | 0  | 117 |                              |      |     |           |      |     |
| W <sub>2</sub> | 16 c/b           | —   | —   | 16 b/a      | —   | —   | 16a           | 0  | 113 |                              |      |     |           |      |     |
| Za             | 16 c/b           | 15  | 112 | 16 b/a      | 5,1 | 113 | 16a           | 0  | 113 |                              |      |     |           |      |     |
| Aa             | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   |                              |      |     |           |      |     |
| A'a            | —                | —   | —   | —           | —   | —   | —             | —  | —   |                              |      |     |           |      |     |

1) halverwege geul 21b.

## DE UITKOMSTEN DER SCHEMATISCHE GETIJBEREKENINGEN (§ 46).

De berekeningen zijn besproken in § 46, waar ook de indeeling van het gebied is aangegeven (figuur 31) en de afmetingen van de geulen zijn vermeld (tabel 9).

Deze groep omvat elf berekeningen; de eerste daarvan,  $Zb$ ,  $Ab$ , van het hoofdgetij  $M_2$  bij normale omstandigheden, is volledig opgenomen in bijlage 7.

De beide volgende zijn uitgevoerd met een grootere en kleinere waarde van den weerstandscoefficiënt  $C$ . Ook deze berekeningen zijn, evenals trouwens alle andere, zoolang herhaald tot een goede overeenstemming was verkregen tusschen de voor de bepaling van den weerstand aangenomen stroomsnelheden en de in de uitkomst gevonden stroomen. Een vergelijking van deze berekeningen bij open Zuiderzee met  $Zb$  (het best met diagrammen) doet zien dat  $C$  tusschen 500 en 560 ligt, wat in overeenstemming is met de rechtstreeks gemeten waarde (§ 14, bijlage 4, zie ook § 32).

Vervangt men in (6) (§ 31) den exponent 2 van de snelheid door 1,75, dan veranderen de grootte en de dimensie van  $C^2$ . Bij de gemiddelde snelheid, die men op 60 cm per seconde kan stellen, moet dan in plaats van 280 000 voor  $C^2$  100 000 worden geschreven. Met deze waarden voor den coëfficiënt en exponent in (6) kan men nu evengoed een getijberekening uitvoeren als met de oorspronkelijke grootten. Men moet den weerstandsterm dan weer lineair maken. De uitkomsten waartoe men op deze wijze geraakt wijken wat  $Z$  betreft weinig van die van  $Zb$  af, zij komen evengoed met de werkelijkheid overeen. Voor afgesloten Zuiderzee ( $A$ ) vindt men een iets sterkere getijbeweging.

Deze berekening hangt samen met het in §§ 109,  $d$ , 114,  $i$  en 157 behandelde.

De thans volgende berekeningen zijn uitgevoerd naar aanleiding van de beschouwingen van DE BRUIJN (literatuuropgave n<sup>o</sup>. 25) over de gewijzigde getijbeweging bij vastzittend ijs in Januari/Februari 1891 (§ 53). Tijdens het onderzoek der Staatscommissie bleek dat de aanzienlijke getijversterking in de Waddenzee tijdens een andere ijsperiode, in Februari 1917, achterwege bleef.

Bij de getijberekeningen kan men vastzittend ijs in rekening brengen door den weerstand te verdubbelen. Terwijl immers de natte *doorsnee* gelijk blijft, zelfs iets kleiner wordt, verdubbelt de natte *omtrek* omdat het water nu niet alleen aan den bodem maar ook door het ijsdek wordt tegengehouden. Zelfs is het mogelijk, wanneer de onderzijde van het ijsdek oneffen is, dat de weerstand meer dan het dubbele wordt. Zit het ijs daarentegen niet volkomen vast, zoodat het een weinig met de getijstroomen heen en weer kan gaan, dan is de weerstand niet geheel tweemaal zoo groot als bij open water.

De getijbeweging die in 1891 in de kom van de Zuiderzee is waargenomen werd door de berekening het best weergegeven, wanneer in geul  $3b$ , (figuur 68, blz. 310), dus het gedeelte tusschen de afsluitingslijn en de kom, voor den weerstand ruim  $2\frac{1}{2}$  maal die bij open water werd genomen, terwijl hij in de kom zelf nog niet geheel tweemaal zoo groot was. Daar moet dus nog eenige beweging in het ijs zijn geweest, terwijl op het Vrouwenzand de ijsmassa's misschien tot den bodem hebben gereikt, wat de zeer groote getijversterking te Stavoren kan hebben veroorzaakt. De amplitude van het getij op het punt „Breezand” neemt dan volgens de berekening met ruim 20 % toe, wat goed overeenstemt met de waarnemingen en zeker niet te veel is.

In 1917 was het getij aan de zuidkust (Nijkerk) bijna evenveel afgenomen als in 1891, in het noordelijk deel van de kom echter veel minder (Urk). Dezen toestand kan men door de berekening verkrijgen door den weerstand in  $3b$  niet geheel te verdubbelen, maar de sterkste belemmering in de kom,  $3a$ , aan te brengen, zoodat de weerstand daar  $2\frac{1}{2}$  maal die bij open

water wordt. De versterking bij „Breezand” is dan kleiner, nl. ruim 10 % en wanneer langs de Friesche kust ook eenig ijs heeft gezeten is het zeer goed mogelijk dat dit de getijbeweging langs die kust heeft belemmerd, en hierin de reden ligt dat de versterking er niet met zekerheid is waargenomen.

Bij de verder volgende berekeningen is de diepte van de gebieden gewijzigd, nl. met 2 m vergroot, wat neerkomt op twee meter hogere waterstanden, en met 1 m verminderd, waardoor de toestand wordt weergegeven die ontstaat wanneer de zeespiegel zich zooveel onder den normalen stand bevindt. Van de resultaten is herhaaldelijk gebruik gemaakt bij het berekenen van windeffect (b.v. in §§ 17, 26 en 27).

De berekening van de partieele getijden  $M_4$ ,  $M_6$ ,  $K_1$  en  $O$  is in § 46 besproken; de uitkomsten, die in tabel 10 zijn opgenomen, zijn hier volledigheidshalve herhaald, behalve die voor  $O$ , die men uit die van  $K_1$  kan afleiden door de amplituden daarvan met 20 à 30 % te vergrooten en de kappagetallen met 200° te vermeerderen.

In de tabellen beteekent:

$Z$  de tegenwoordige toestand (met Zuiderzee).

$A$  de toestand na de afsluiting (dijkrichting Piaam).

Het eerste cijfer geeft telkens de amplitude, voor het verticale getij in cm en voor den stroom in 1000 m<sup>3</sup> per sec; het tweede is het kappagetal in graden.

|         |                     | $M_2$ normaal |             | $M_2; C = 690$ |             | $M_2; C = 390$ |           | $M_2$ exponent 1,75 |          | $M_2$ met ijs |          |     |
|---------|---------------------|---------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-----------|---------------------|----------|---------------|----------|-----|
|         |                     | $Z$           | $A$         | $Z$            | $A$         | $Z$            | $A$       | $Z$                 | $A$      | $Z$ 1917      | $Z$ 1891 |     |
| Getij.  | Westgat . . . . .   | 67 158°       | 67 158°     | 67 158°        | 67 158°     | 67 158°        | 67 158°   | 67 158°             | 67 158°  | 67 158°       | 67 158°  |     |
|         | Helder . . . . .    | 55 174°       | 55 183°     | 57 175°        | 60 186°     | 54 173°        | 52 179°   | —                   | —        | —             | —        |     |
|         | Breezand . . . . .  | 40 246°       | 68 250°     | 49 241°        | 91 245°     | 31 252°        | 50 255°   | 42 244°             | 77 249°  | 45 253°       | 49 256°  |     |
|         | Langezand . . . . . | 78 227°       | 80 234°     | 85 223°        | 92 232°     | 72 230°        | 67 237°   | 79 225°             | 85 234°  | —             | —        |     |
|         | Noordgat . . . . .  | 79 201°       | 79 201°     | 79 201°        | 79 201°     | 79 201°        | 79 201°   | 79 201°             | 79 201°  | 79 201°       | 79 201°  |     |
|         | Urk . . . . .       | 9 303°        | —           | 11 301°        | —           | 6 309°         | —         | 10 301°             | —        | 10 307°       | 6 316°   |     |
|         | Nijkerk . . . . .   | 13 34°        | —           | 20 29°         | —           | 8 45°          | —         | 16 30°              | —        | 10 53°        | 8 53°    |     |
| Stroom. | Westgat . . . . .   | 56 147°       | 71 138°     | 62 149°        | 93 138°     | 47 142°        | 53 135°   | 58 147°             | 80 138°  | 61 150°       | 64 150°  |     |
|         | Helder . . . . .    | 52 158°       | 65 147°     | —              | —           | —              | —         | —                   | —        | —             | —        |     |
|         | Breezand . . . . .  | 38 191°       | 31 163°     | 43 192°        | 40 158°     | 31 190°        | 24 172°   | 39 190°             | 35 158°  | 40 186°       | 41 183°  |     |
|         | Breezand . . . . .  | 29 128°       | 31 163°     | 38 119°        | 40 158°     | 20 132°        | 24 172°   | 32 123°             | 35 158°  | 26 134°       | 26 138°  |     |
|         | Langezand . . . . . | 38 357°       | 44 350°     | 42 354°        | 55 341°     | 34 0°          | 32 0°     | 38 356°             | 49 347°  | —             | —        |     |
|         | Noordgat . . . . .  | 54 338°       | 62 337°     | 58 336°        | 76 331°     | 40 340°        | 47 341°   | 54 338°             | 74 332°  | —             | —        |     |
|         | Breezand . . . . .  | 36 56°        | —           | 48 60°         | —           | 24 51°         | —         | 40 59°              | —        | 32 47°        | 29 42°   |     |
|         | Urk . . . . .       | 35 102°       | —           | 51 100°        | —           | 20 108°        | —         | 40 99°              | —        | 25 111°       | 20 118°  |     |
|         |                     |               | $M_2$ 2 m + |                | $M_2$ 1 m — |                | $M_4$     |                     | $M_6$    |               | $K_1$    |     |
|         |                     |               | $Z$         | $A$            | $Z$         | $A$            | $Z$       | $A$                 | $Z$      | $A$           | $Z$      | $A$ |
| Getij.  | Westgat . . . . .   | 67 158°       | 67 158°     | 67 158°        | 67 158°     | 12,0 195°      | 12,0 195° | 7,5 270°            | 7,5 270° | 7,0 359°      | 7,0 359° |     |
|         | Helder . . . . .    | 58 171°       | 62 182°     | 55 174°        | 56 185°     | 11,3 209°      | 9,9 216°  | 9,1 320°            | 6,1 325° | 7,0 9°        | 7,0 7°   |     |
|         | Breezand . . . . .  | 43 224°       | 85 235°     | 36 248°        | 72 250°     | 2,7 344°       | 5,2 342°  | 2,5 97°             | 3,7 116° | 3,8 40°       | 7,6 30°  |     |
|         | Langezand . . . . . | 78 216°       | 90 225°     | 84 225°        | 82 227°     | 7,8 314°       | 6,7 317°  | 3,2 24°             | 6,0 53°  | 6,4 14°       | 7,0 17°  |     |
|         | Noordgat . . . . .  | 79 201°       | 79 201°     | 79 201°        | 79 201°     | 9,0 250°       | 9,0 250°  | 6,0 330°            | 6,0 330° | 6,8 1°        | 6,8 1°   |     |
|         | Urk . . . . .       | 12 304°       | —           | 8 323°         | —           | 1,6 63°        | —         | 0,6 239°            | —        | 1,8 109°      | —        |     |
|         | Nijkerk . . . . .   | 24 353°       | —           | 8 78°          | —           | 1,3 238°       | —         | 1,0 114°            | —        | 2,3 135°      | —        |     |
| Stroom. | Westgat . . . . .   | 66 147°       | 92 127°     | 48 144°        | 69 138°     | 6,7 165°       | 7,6 180°  | 9,4 250°            | 5,3 262° | 4,2 338°      | 4,4 294° |     |
|         | Helder . . . . .    | —             | —           | —              | —           | 5,5 200°       | 7,0 212°  | 7,3 275°            | 4,9 296° | 4,0 345°      | 3,6 298° |     |
|         | Breezand . . . . .  | 51 190°       | 40 142°     | 31 195°        | 25 164°     | 8,2 282°       | 6,2 280°  | 7,3 63°             | 3,0 113° | 3,4 10°       | 1,2 312° |     |
|         | Breezand . . . . .  | 48 94°        | 40 142°     | 16 138°        | 25 164°     | 5,7 260°       | 6,2 280°  | 4,0 64°             | 3,0 113° | 1,1 225°      | 1,2 312° |     |
|         | Langezand . . . . . | 38 2°         | 50 328°     | 30 352°        | 38 343°     | 7,5 95°        | 7,1 96°   | 3,6 224°            | 2,4 215° | 2,3 149°      | 2,4 118° |     |
|         | Noordgat . . . . .  | 52 339°       | 72 320°     | 48 331°        | 56 330°     | 8,9 67°        | 8,2 68°   | 2,5 135°            | 4,6 140° | 3,0 135°      | 3,2 110° |     |
|         | Breezand . . . . .  | 71 49°        | —           | 26 46°         | —           | 3,6 137°       | —         | 3,3 243°            | —        | 4,5 200°      | —        |     |
|         | Urk . . . . .       | 70 72°        | —           | 19 130°        | —           | 2,0 250°       | —         | 2,7 18°             | —        | 3,7 215°      | —        |     |

## GEGEVENS VOOR DE EXACTE BEREKENING (§ 99).

### 1. DE WATERSTANDEN BUITEN DE ZEEGATEN.

Bij den storm van 22/23 December 1894 waren de eenige Noordzee-waarnemingen die in aanmerking komen die aan de sluizen te IJmuiden. De registreerende peilschaal geraakte in het begin van den storm defect, maar de standen zijn met een onbeduidende onzekerheid (enkele centimeters) uit die bij de sluizen af te leiden (§ 27).

Verder noordwaarts is het eenige punt waarvan de waarnemingen kunnen worden gebruikt Zoutkamp. De tusschengelegen stations Helder en Vlieland (haven) komen niet in aanmerking omdat ze aan of binnen de zeegaten liggen.

De waterstanden buiten de zeegaten van Texel (Westgat, punt  $a$  van figuur 45) en Terschelling (Noordgat, punt  $g$  van die figuur) moeten worden afgeleid door vergelijking met stormen waarbij die standen wèl zijn waargenomen of met voldoende zekerheid door interpolatie kunnen worden bepaald. Zulke stormvloed en zijn die van de winters 1920/1921 en 1921/1922, toen de electrisch registreerende peilschaal te Callantsoog en de vloeipeilschalen op Vlieland (strandhoofd 10) en Terschelling (strandpaal XI) in werking waren. De beste gegevens verschaft de stormvloed van 6/7 November 1921 (figuur 19, § 21).

Van eenige vergelijkingsstormen zijn, voor zoover mogelijk, de waterstandkrommen voor  $a$  en  $g$  geteekend, met de lijnen van IJmuiden en Zoutkamp. Op het diagram voor 22/23 December 1894 (figuur 25, § 27) zijn tusschen de krommen van IJmuiden en Zoutkamp de geschatte lijnen voor  $a$  en  $g$  getrokken, in de onderstelling dat de onderlinge ligging van de vier lijnen voor de verschillende stormen in hoofdzaak dezelfde is.

De onzekerheid in de op deze wijze gevonden standen van  $a$  en  $g$  is misschien 10 à 20 cm.

Nadat de lijnen voorloopig waren getrokken is nagegaan of bij deze standen in de Noordzee en de waargenomen waterhoogten van Helder en Vlieland (haven) het verval in de zeegaten zoodanig was, dat er de stroomer zijn doorgegaan, die moeten hebben bestaan blijkens de verandering van het gemiddeld niveau in Waddenzee en Zuiderzee (blz. 52/53). Er is dus een dergelijke berekening uitgevoerd als in § 21 voor den stormvloed van 6/7 November 1921 werd verricht. Op grond hiervan zijn eenige *geringe* veranderingen in de voorloopig voor  $a$  en  $g$  aangenomen krommen aangebracht. Het resultaat vindt men in tabel 26 (§ 99).

### 2. DE STROOM NAAR DE ZUIDERZEE.

Deze is afgeleid uit de uurwaarden van de gemiddelde waterhoogte in de Zuiderzee (§ 17, blz. 52/53). Oorspronkelijk zijn daarvoor genomen de door Dr. LELY berekende getallen  $H_1$  (brochure bijlage I b, proefschrift blz. 74) met de onderstelling dat de af te sluiten Zuiderzee 3600 vierkante kilometer groot is (noot bij § 24).

De stroom is dan van uur tot uur van 9 uur namiddag (22 December) tot 7 uur voormiddag (23 December) achtereenvolgens geweest:

160, 110, 160, 180, 140, 180, 240, 160, 130 en  $80 \times 1000 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Het is moeilijk aan te nemen dat het verloop van  $S$  zoo onregelmatig is geweest als uit deze cijfers zou volgen; vooral de sprong 180, 240, 160

is zeer onwaarschijnlijk. De onregelmatigheden kunnen ontstaan door kleine foutjes in de bepaling van  $H_1$ , die niet op een centimeter nauwkeurig is te bepalen. Een toevallige opeenhooping van water juist op het volle uur bij één of twee peilschalen, zooals b. v. om 4 uur bij Urk plaats vond, kan een afwijking van enkele centimeters in het gemiddelde veroorzaken. Daarom zijn de uurwaarden uitgezet in een diagram en is er een vloeiende lijn door getrokken. Het maximum komt dan niet op 240 000, maar op 210 000 m<sup>3</sup> per seconde.

De waarden van  $H_1$  om 2, 3, 4 en 5 uur vm. zijn ook berekend met behulp van de uurkaartjes voor die tijdstippen (het kaartje van 3 uur is figuur 26 van § 27).

De uitkomsten verschillen niet meer dan enkele centimeters van die van Dr. LELY, de grootste stijging valt weer tusschen 3 en 4 uur (21 cm).

Uit de vloeiende lijn zijn de waarden van tabel 27 (§ 99) afgelezen.

### 3. DE WIND.

In hoofdzaak zijn de windwaarnemingen van Helder gebruikt. Na tot stand komen van den anemometer op Vlieland is gebleken dat daar de wind in den regel wat verder ruimt dan te Helder en, niettegenstaande het instrument bij noordwestenwind eenigszins in de luwte van de duinen staat, meestal groter windsnelheid aanwijst.

Om nu over de geheele Waddenzee met een uniformen wind te kunnen werken en toch het gemiddelde voor het gebied weer te geven, is de aangenomen wind een weinig ( $1/2$  tot 1 streek) verder geruimd dan die te Helder, terwijl de windsnelheid 1 à 2 meter per seconde groter is genomen.

De uurwaarden zijn daarna als vectoren in een diagram uitgezet, door de uiteinden is een lijn getrokken, die dus het verloop van windrichting en -snelheid beide aangeeft en deze lijn is een weinig geregulariseerd.

Het resultaat van deze bewerkingen is aangegeven in tabel 28 van § 99.

---

## BEREKENING VAN DE STORMVLOEDSTANDEN MET INACHTNEMING VAN HET NIET-STATIONAIR ZIJN.

(§§ 96–103 en 158)

De berekeningen zijn met de rekenliniaal uitgevoerd in de tweede helft van 1925.

Elke kolom stelt voor den toestand op het daarboven aangegeven tijdstip  $t$ .  $t = 0$  is middernacht van 22 op 23 December 1894, de getallen zijn het aantal seconden tusschen middernacht en het beschouwde tijdstip.

Het schema van het „geulennet” is figuur 45 van § 97, de afmetingen en constanten zijn gegeven in tabel 25 van diezelfde §. Deze afmetingen zijn in nieuwe eenheden uitgedrukt (blz. 177) door te stellen:

$$\bar{l} = \frac{l}{\sqrt{a}}, \quad \bar{s} = \beta s, \quad \bar{F} = \beta F, \quad \bar{h} = \beta \sqrt{a} h.$$

Er moet vooral om gedacht worden dat  $s$  hier de stroom per eenheid van breedte is; de stroom over de volle breedte wordt met de hoofdletter  $S$  aangeduid.

In elke geul zijn de door (61)–(66) voorgestelde bewerkingen uitgevoerd en vervolgens de grootheden  $\bar{h}_i$  en  $\bar{s}_i$  aan het eind bepaald door in (59) en (60)  $\bar{x} = \bar{l}$  te stellen.

Deze waarden zijn dan weer de grondslag van de berekening in de volgende geul. Wanneer die andere afmetingen heeft moeten de grootheden  $\bar{h}$  en  $\bar{s}$  worden omgerekend voor de bij die geul behorende  $a$  en  $\beta$  (form. 55 en 56). Daarom wordt dan ook telkens de verhouding  $\left(\frac{\beta}{b}\right)$  oude geul :  $\left(\frac{\beta}{b}\right)$  nieuwe geul aangegeven. In deze verhouding verandert nl.  $\bar{s}$ .

Waar de stroom in de geul kentert zijn eenige grootheden, die in (61)–(66) het dubbele teeken hebben, weggelaten. Deze wijze van doen wijkt af van de juiste handelwijze, die in § 158 is aangegeven, doch die tijdens het uitvoeren van de berekening nog niet bekend was. De hierdoor gemaakte fouten zijn zonder eenig belang.

Behalve door de letters  $a-g$  zijn de geulen in de berekening ook nog aangeduid met de rangnummers 1–5. Dit is gedaan om een enkele maal de bij een bepaalde geul behorende grootheid, b.v.  $\left(\frac{\beta}{b}\right)$  door een index aan te duiden.

$$\begin{aligned} \text{Geul 1} &= ap \\ \text{„ 2} &= pqb \\ \text{„ 3} &= bc \\ \text{„ 4} &= cdf \\ \text{„ 5} &= fg \end{aligned}$$

### DE BEREKENING BIJ AFGESLOTEN ZUIDERZEE (A).

Deze berekening is uitgevoerd van  $g$  naar  $a$ . Uitgangspunten zijn dus de gegeven waarden  $h_g$  van tabel 26 (§ 99) en de stroom  $S_g$ , die eerst op goed geluk werd aangenomen, en waarvan de 8 waarden zóólang zijn veranderd tot aan het slot van de berekening nagenoeg de goede waarde van  $h_a$  werd gevonden. De hieronder volgende getallen voor  $S_g$  zijn dus door probeeren gevonden. De waarden van  $h_g$  en  $S_g$  zijn door vermenigvuldiging met  $\beta \sqrt{a}$  en  $\frac{\beta}{b}$  in de eenheden van geul  $gf$  uitgedrukt; de verdere bewerking spreekt voor zich zelf.

Voor de behandeling van geul  $cb$  raadplege men § 98.

| $t$  | - 10000 | - 5000 | 0      | 5000   | 10000  | 15000  | 20000  | 25000  | sec               |
|--|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| Geul 5; $gf$ . $\beta \sqrt{\alpha} = 0,0278 \times 10^{-4}$ ; $\beta = 0,251 \times 10^{-8}$ ; $\bar{l} = 0,0722 \times 10^4$ . |         |        |        |        |        |        |        |        |                   |
| $h_g$  | 137     | 203    | 262    | 305    | 339    | 315    | 269    | 205    | cm                |
| $S_g$  | 73      | 86     | 80     | 57     | 38     | -16    | -61    | -83    | $\times 10^9$     |
| $\bar{h}_0$  | 3,81    | 5,64   | 7,28   | 8,48   | 9,42   | 8,75   | 7,48   | 5,70   | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_0$  | 2,30    | 2,70   | 2,50   | 1,80   | 1,20   | - 0,50 | - 1,90 | - 2,60 | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \dot{\bar{h}}_0$  | 3,40    | 3,47   | 2,84   | 2,14   | 0,27   | - 1,94 | - 3,05 | - 3,50 | $\times 10^{-8}$  |
| $\dot{\bar{s}}_0$  | 1,0     | 0,2    | - 0,9  | - 1,3  | - 2,3  | - 3,1  | - 2,1  | - 0,5  | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$  | 5,3     | 7,3    | 6,2    | 3,2    | 1,4    | - 0,2  | - 3,6  | - 6,7  | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$   | - 4,0   | - 3,7  | - 3,4  | - 3,0  | - 2,7  | - 2,4  | - 2,0  | - 1,7  | $\times 10^{-8}$  |
| $h_{II}$   | 2,3     | 3,8    | 1,9    | - 1,1  | - 3,6  | - 5,7  | - 7,7  | - 8,9  | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_{II}$  | 3,5     | - 0,4  | - 4,9  | - 5,5  | - 4,6  | - 4,1  | - 3,2  | - 1,0  | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$  | 0,7     | - 0,6  | - 1,3  | - 2,6  | - 4,1  | - 3,3  | - 1,6  | - 0,4  | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$  | 15,6    | 18,7   | 14,2   | 7,7    | 0,6    | - 2,0  | - 11,6 | - 18,2 | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$   | 16,3    | 18,1   | 12,9   | 5,1    | - 3,5  | - 5,3  | - 13,2 | - 18,6 | $\times 10^{-12}$ |
| $\bar{h}_0$  | 3,81    | 5,64   | 7,28   | 8,48   | 9,42   | 8,75   | 7,48   | 5,70   | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_{II}$  | - 0,17  | - 0,27 | - 0,14 | 0,08   | 0,26   | 0,41   | 0,56   | 0,69   | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,04    | 0,05   | 0,03   | 0,01   | - 0,01 | - 0,01 | - 0,03 | - 0,05 | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$  | 3,68    | 5,42   | 7,17   | 8,57   | 9,67   | 9,15   | 8,01   | 6,34   | $\times 10^{-4}$  |
| $h_f$  | 133     | 195    | 258    | 308    | 348    | 330    | 288    | 228    | cm                |
| $\bar{s}_0$  | 2,30    | 2,70   | 2,50   | 1,80   | 1,20   | - 0,50 | - 1,90 | - 2,60 | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} s_I$   | - 0,25  | - 0,25 | - 0,20 | - 0,15 | - 0,02 | 0,14   | 0,22   | 0,25   | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$   | 0,01    | - 0,00 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,01 | - 0,00 | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I$  | 2,06    | 2,45   | 2,29   | 1,64   | 1,17   | - 0,37 | - 1,69 | - 2,35 | $\times 10^{-4}$  |
| $S_f$  | 66      | 78     | 73     | 52     | 37     | - 12   | - 54   | - 75   | $\times 10^9$     |

Geul 4, eerste helft;  $fd$ .  $\beta \sqrt{\alpha} = 0,0664 \times 10^{-4}$ ;  $\left(\frac{\beta}{b}\right)_4 : \left(\frac{\beta}{b}\right)_5 = 1,110$ ;  $\bar{l} = 0,229 \times 10^4$ .

|                           |        |        |        |       |        |        |        |        |                   |
|---------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| $\bar{h}_0$               | 8,79   | 12,92  | 17,11  | 20,44 | 23,12  | 21,86  | 19,13  | 15,12  | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_0$               | 2,29   | 2,72   | 2,54   | 1,82  | 1,30   | - 0,41 | - 1,88 | - 2,61 | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \dot{\bar{h}}_0$   | 6,50   | 8,32   | 7,52   | 6,01  | 1,42   | - 3,99 | - 6,74 | - 8,25 | $\times 10^{-8}$  |
| $\dot{\bar{s}}_0$         | 1,0    | 0,3    | - 0,9  | - 1,2 | - 2,2  | - 3,2  | - 2,2  | - 0,2  | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$         | 5,2    | 7,4    | 6,4    | 3,3   | 1,7    | - *)   | - 3,5  | - 6,8  | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$                | - 12,8 | - 11,7 | - 10,7 | - 9,6 | - 8,5  | - 7,4  | - 6,4  | - 5,3  | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                     | - 6,6  | - 4,0  | - 5,2  | - 7,5 | - 9,0  | - 10,6 | - 12,1 | - 12,3 | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_{II}$   | 4,0    | 1,4    | - 3,5  | - 3,8 | - 3,1  | - 3,1  | - 1,7  | 0,0    | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$               | 4,0    | 1,0    | - 2,3  | - 6,1 | - 10,0 | - 8,2  | - 4,3  | 0,0    | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$     | 29,7   | 45,4   | 38,3   | 21,9  | 3,6    | - *)   | - 25,3 | - 45,8 | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$                  | 33,7   | 46,4   | 36,0   | 15,8  | - 6,4  | - 8,2  | - 29,6 | - 45,8 | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{III}$ | 20     | 2      | - 31   | - 42  | - 24   | - 23   | - 38   | - 20   | $\times 10^{-16}$ |

\*) Weggelaten omdat  $s$  van teeken wisselt.

| $t$                            | - 10000    | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | $sec$             |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $\dot{s}_{II}$                 | - 3        | - 8        | - 5        | 0          | 1          | 1          | 3          | 8          | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_I^2$                  | 84         | 138        | 114        | 72         | 4          | - *)       | - 90       | - 137      | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_{II}$       | 18         | 8          | - 18       | - 14       | - 8        | - *)       | - 6        | 0          | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | 99         | 138        | 91         | 58         | - 3        | 1          | - 93       | - 129      | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 8,79       | 12,92      | 17,11      | 20,44      | 23,12      | 21,86      | 19,13      | 15,12      | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_I$                 | 1,51       | 0,92       | 1,19       | 1,72       | 2,06       | 2,43       | 2,77       | 2,82       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,89       | 1,22       | 0,95       | 0,42       | - 0,17     | - 0,21     | - 0,78     | - 1,20     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} h_{III}$ | - 0,20     | - 0,28     | - 0,18     | - 0,12     | 0,01       | 0,00       | 0,19       | 0,26       | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$                    | 10,99      | 14,78      | 19,07      | 22,46      | 25,02      | 24,08      | 21,31      | 17,00      | $\times 10^{-4}$  |
| $h_d$                          | <b>166</b> | <b>223</b> | <b>287</b> | <b>339</b> | <b>378</b> | <b>363</b> | <b>321</b> | <b>257</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$                    | 2,29       | 2,72       | 2,54       | 1,82       | 1,30       | - 0,41     | - 1,88     | - 2,61     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} s_I$                 | - 1,49     | - 1,91     | - 1,72     | - 1,38     | - 0,32     | 0,92       | 1,54       | 1,89       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$   | 0,10       | 0,04       | - 0,09     | - 0,10     | - 0,08     | - 0,08     | - 0,05     | 0,00       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} s_{III}$ | - 0,04     | - 0,00     | 0,06       | 0,08       | 0,05       | 0,05       | 0,08       | 0,04       | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_I$                    | 0,86       | 0,85       | 0,79       | 0,42       | 0,95       | 0,48       | - 0,31     | - 0,68     | $\times 10^{-4}$  |
| $S_d$                          | 25         | 24         | 23         | 12         | 27         | 14         | - 9        | - 20       | $\times 10^9$     |

Geul 4, tweede helft;  $dc$ .

Constanten als boven;

$\bar{h}_0 = \bar{h}_I$  eerste helft;

$\bar{s}_0 = \bar{s}_I$  eerste helft.

|                                |        |        |        |        |        |        |        |        |                   |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| $s_I = \bar{h}_0$              | 7,00   | 8,08   | 7,68   | 5,95   | 1,62   | - 3,71 | - 7,08 | - 7,80 | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$                    | 0,2    | - 0,1  | - 0,4  | 0,2    | 0,1    | - 1,3  | - 1,2  | 0,0    | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$              | - *)   | - *)   | - *)   | - *)   | 0,9    | 0,2    | - *)   | - *)   | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$                     | - 12,8 | - 11,7 | - 10,7 | - 9,6  | - 8,5  | - 7,4  | - 6,4  | - 5,3  | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                          | - 12,6 | - 11,8 | - 11,1 | - 9,4  | - 7,5  | - 8,5  | - 7,6  | - 5,3  | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$           | 0,0    | 1,5    | 2,4    | 3,6    | 0,9    | - 0,1  | 3,2    | 3,0    | $\times 10^{-12}$ |
| $\bar{s}_I$                    | 3,0    | 0,7    | - 2,1  | - 6,1  | - 9,7  | - 8,7  | - 4,1  | 0,0    | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 \bar{s}_I$    | - *)   | - *)   | - *)   | - *)   | 3,0    | - 3,6  | - *)   | - *)   | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$                       | 3,0    | 0,7    | - 2,1  | - 6,0  | - 6,7  | - 12,3 | - 4,1  | 0,0    | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$       | - 3    | - 5    | - 7    | - 5    | - 6    | 3      | 12     | 10     | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{s}_{II}$                 | 0      | 2      | 2      | - 2    | - 4    | 2      | 3      | 0      | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_I^2$            | - *)   | - *)   | - *)   | - *)   | 5      | 28     | - *)   | - *)   | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 \bar{s}_{II}$ | - *)   | - *)   | - *)   | - *)   | 2      | - 0    | - *)   | - *)   | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | 0      | 2      | 2      | - 2    | 3      | 30     | 3      | 0      | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 10,99  | 14,78  | 19,07  | 22,46  | 25,02  | 24,08  | 21,30  | 17,04  | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_I$                 | 2,89   | 2,70   | 2,55   | 2,15   | 1,72   | 1,95   | 1,74   | 1,21   | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,08   | 0,02   | - 0,06 | - 0,16 | - 0,18 | - 0,32 | - 0,11 | 0,00   | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} h_{III}$ | 0,00   | - 0,00 | - 0,00 | 0,00   | - 0,01 | - 0,06 | - 0,01 | 0,00   | $\times 10^{-4}$  |

\*) Weggelaten omdat  $s$  van teeken wisselt.

| $t$                            | — 10000    | — 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | $sec$            |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| $\bar{h}_l$                    | 13,96      | 17,50      | 21,56      | 24,45      | 26,55      | 25,65      | 22,92      | 18,25      | $\times 10^{-4}$ |
| $h_c$                          | <b>210</b> | <b>264</b> | <b>325</b> | <b>369</b> | <b>400</b> | <b>386</b> | <b>345</b> | <b>275</b> | <b>cm</b>        |
| $\bar{s}_0$                    | 0,86       | 0,85       | 0,79       | 0,42       | 0,95       | 0,48       | — 0,31     | — 0,68     | $\times 10^{-4}$ |
| $-\bar{l}s_I$                  | — 1,60     | — 1,85     | — 1,76     | — 1,36     | — 0,37     | 0,85       | 1,62       | 1,79       | $\times 10^{-4}$ |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$   | 0,00       | 0,04       | 0,06       | 0,09       | 0,02       | — 0,00     | 0,08       | 0,08       | $\times 10^{-4}$ |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} s_{III}$ | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | — 0,01     | — 0,02     | — 0,02     | $\times 10^{-4}$ |
| $s_l$                          | — 0,73     | — 0,95     | — 0,90     | — 0,84     | 0,61       | 1,32       | 1,37       | 1,17       | $\times 10^{-4}$ |
| $S_c$                          | — 21,0     | — 27,3     | — 25,9     | — 24,1     | 17,5       | 37,6       | 39,3       | 33,6       | $\times 10^9$    |

Gecontroleerd door terug te rekenen.

Geul 3;  $c b$ .  $h_b = h_c - f_{bc} - 0,1358 \times 10^{-9} \dot{S}_c \mp 0,00988 \times 10^{-18} S_c^2$ ;  $S_b = S_c$ .

|                                     |            |            |            |            |            |            |            |            |           |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| $h_c$                               | 210        | 264        | 325        | 369        | 400        | 386        | 345        | 275        | cm        |
| $-f_{bc}$                           | — 40       | — 32       | — 26       | — 21       | — 17       | — 15       | — 14       | — 14       | cm        |
| $-0,1358 \times 10^{-9} \dot{S}_c$  | 1          | 1          | 0          | — 6        | — 8        | — 3        | 1          | 1          | cm        |
| $\mp 0,00988 \times 10^{-18} S_c^2$ | 4          | 7          | 7          | 6          | — 3        | — 14       | — 15       | — 11       | cm        |
| $h_b$                               | <b>175</b> | <b>240</b> | <b>306</b> | <b>348</b> | <b>372</b> | <b>354</b> | <b>317</b> | <b>251</b> | <b>cm</b> |

Geul 2, eerste helft;  $b q$ .  $\beta \sqrt{a} = 0,0542 \times 10^{-4}$ ;  $\left(\frac{\beta}{b}\right)_2 : \left(\frac{\beta}{b}\right)_4 = 1,172$ ;  $\bar{l} = 0,1693 \times 10^4$ .

|                                |            |            |            |            |            |            |            |            |                   |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $\bar{h}_0$                    | 9,49       | 13,00      | 16,59      | 18,87      | 20,15      | 19,40      | 17,18      | 13,60      | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_0$                    | — 0,85     | — 1,11     | — 1,05     | — 0,98     | 0,72       | 1,54       | 1,59       | 1,37       | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \dot{\bar{h}}_0$        | 7,00       | 7,10       | 5,87       | 3,56       | 0,53       | — 2,97     | — 5,80     | — 7,50     | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$                    | — 0,5      | — 0,2      | 0,1        | 1,8        | 2,5        | 0,9        | — 0,2      | — 1,0      | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$              | — 0,7      | — 1,2      | — 1,1      | — 1,0      | 0,5        | 2,4        | 2,5        | 1,9        | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$                     | 12,0       | 9,7        | 7,7        | 6,1        | 5,0        | 4,3        | 4,1        | 4,2        | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                          | 10,8       | 8,3        | 6,7        | 6,9        | 8,0        | 7,6        | 6,4        | 5,1        | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$           | — 1,8      | — 4,1      | — 1,4      | 1,3        | 0,7        | — 1,6      | — 2,5      | — 3,2      | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$                    | 1,8        | — 1,1      | — 3,5      | — 5,3      | — 6,5      | — 6,3      | — 4,5      | — 2,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$          | 11,9       | 15,8       | 12,3       | 7,0        | 0,8        | — 9,2      | — 18,4     | — 20,5     | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$                       | 13,7       | 14,7       | 8,8        | 1,7        | — 5,7      | — 15,5     | — 22,9     | — 22,5     | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$       | 4          | — 5        | — 13       | — 14       | — 17       | — 17       | — 7        | 0          | $\times 10^{-16}$ |
| $\dot{s}_{II}$                 | — 3        | 0          | 5          | 2          | — 3        | — 3        | — 2        | — 1        | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_I^2$                  | — 98       | — 100      | — 69       | — 25       | 1          | 18         | 67         | 112        | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_{II}$       | — 3        | — 9        | — 3        | 3          | 1          | — 5        | — 8        | — 9        | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | — 104      | — 109      | — 67       | — 20       | — 1        | 10         | 57         | 102        | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 9,49       | 13,00      | 16,59      | 18,87      | 20,15      | 19,40      | 17,18      | 13,60      | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_I$                 | — 1,82     | — 1,40     | — 1,13     | — 1,16     | — 1,35     | — 1,28     | — 1,08     | — 0,86     | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,20       | 0,21       | 0,13       | 0,02       | — 0,08     | — 0,22     | — 0,33     | — 0,32     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} h_{III}$ | 0,08       | 0,09       | 0,05       | 0,02       | 0,00       | — 0,01     | — 0,05     | — 0,08     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_l$                    | 7,95       | 11,90      | 15,64      | 17,75      | 18,72      | 17,89      | 15,72      | 12,34      | $\times 10^{-4}$  |
| $h_q$                          | <b>147</b> | <b>220</b> | <b>289</b> | <b>328</b> | <b>346</b> | <b>330</b> | <b>290</b> | <b>228</b> | <b>cm</b>         |

| $t$                           | - 10000 | - 5000 | 0      | 5000   | 10000  | 15000  | 20000  | 25000  | sec              |
|-------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| $\bar{s}_0$                   | - 0,85  | - 1,11 | - 1,05 | - 0,98 | 0,72   | 1,54   | 1,59   | 1,37   | $\times 10^{-4}$ |
| $-\bar{l}s_I$                 | - 1,18  | - 1,20 | - 0,99 | - 0,60 | - 0,09 | 0,50   | 0,98   | 1,27   | $\times 10^{-4}$ |
| $\frac{\bar{l}^2}{2}s_{II}$   | - 0,03  | - 0,06 | - 0,02 | 0,02   | 0,01   | - 0,02 | - 0,04 | - 0,05 | $\times 10^{-4}$ |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6}s_{III}$ | - 0,00  | 0,00   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,00   | $\times 10^{-4}$ |
| $\bar{s}_I$                   | - 2,06  | - 2,37 | - 2,05 | - 1,55 | 0,65   | 2,03   | 2,54   | 2,59   | $\times 10^{-4}$ |
| $S_q$                         | - 50    | - 58   | - 50   | - 38   | 16     | 50     | 62     | 63     | $\times 10^9$    |

Geul 2, tweede helft;  $q p$ . Constanten als boven;  $\bar{h} = \bar{h}_I$  eerste helft;  $\bar{s}_0 = \bar{s}_I$  eerste helft.

|                               |            |            |            |            |            |            |            |            |                   |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $s_I = \bar{h}_0$             | 6,50       | 7,69       | 5,85       | 3,08       | 0,14       | - 3,00     | - 5,55     | - 7,25     | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$                   | - 1,0      | 0,0        | 0,8        | 2,7        | 3,6        | 1,9        | 0,6        | - 0,2      | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$             | - 4,2      | - 5,6      | - 4,2      | - 2,4      | 0,4        | 4,1        | 6,5        | 6,7        | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$                    | 12,0       | 9,7        | 7,7        | 6,1        | 5,0        | 4,3        | 4,1        | 4,2        | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                         | 6,8        | 4,1        | 4,3        | 6,4        | 9,0        | 10,3       | 11,2       | 10,7       | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$          | - 1,5      | - 2,5      | 2,3        | 4,7        | 3,9        | 2,2        | 0,4        | - 1,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$                   | 2,0        | - 0,6      | - 4,6      | - 5,7      | - 6,1      | - 5,7      | - 4,2      | - 2,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 s_0 s_I$               | 26,8       | 36,4       | 24,0       | 9,5        | 0,2        | - 12,2     | - 28,2     | - 37,6     | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$                      | 28,8       | 35,8       | 19,4       | 3,8        | - 5,9      | - 17,9     | - 32,4     | - 39,6     | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$      | 8          | - 9        | - 32       | - 25       | - 22       | - 26       | - 22       | - 10       | $\times 10^{-16}$ |
| $\dot{s}_{II}$                | 0          | 4          | 7          | 2          | - 2        | - 4        | - 3        | 0          | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_I^2$                 | - 84       | - 118      | - 68       | - 19       | 0          | 18         | 62         | 105        | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_0 s_{II}$            | - 6        | - 12       | 9          | 15         | 5          | 9          | 2          | - 5        | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                     | - 90       | - 126      | - 52       | - 2        | 3          | 23         | 61         | 100        | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                   | 7,95       | 11,90      | 15,64      | 17,75      | 18,72      | 17,89      | 15,72      | 12,34      | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l}h_I$                 | - 1,15     | - 0,69     | - 0,72     | - 1,08     | - 1,52     | - 1,74     | - 1,89     | - 1,80     | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2}h_{II}$   | 0,41       | 0,51       | 0,28       | 0,05       | - 0,08     | - 0,25     | - 0,46     | - 0,57     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6}h_{III}$ | 0,07       | 0,10       | 0,04       | 0,00       | - 0,00     | - 0,02     | - 0,05     | - 0,08     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$                   | 7,28       | 11,82      | 15,24      | 16,72      | 17,12      | 15,88      | 13,32      | 9,89       | $\times 10^{-4}$  |
| $h_p$                         | <b>134</b> | <b>218</b> | <b>282</b> | <b>308</b> | <b>316</b> | <b>294</b> | <b>246</b> | <b>183</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$                   | - 2,06     | - 2,37     | - 2,05     | - 1,55     | 0,65       | 2,03       | 2,54       | 2,59       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l}s_I$                 | - 1,10     | - 1,29     | - 0,99     | - 0,52     | - 0,02     | 0,51       | 0,94       | 1,22       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2}s_{II}$   | - 0,02     | - 0,04     | 0,03       | 0,07       | 0,06       | 0,03       | 0,01       | - 0,01     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6}s_{III}$ | - 0,01     | 0,01       | 0,03       | 0,02       | 0,02       | 0,02       | 0,02       | 0,01       | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_I$                   | - 3,19     | - 3,69     | - 2,98     | - 1,98     | 0,71       | 2,59       | 3,51       | 3,81       | $\times 10^{-4}$  |
| $S_p$                         | - 78       | - 90       | - 73       | - 48       | 17         | 64         | 86         | 93         | $\times 10^9$     |

Gecontroleerd door terug te rekenen.

| $t$  | - 10000    | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | $sec$             |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| Geul 1; $p a. \beta \sqrt{a} = 0,0168 \times 10^{-4}$ ; $\left(\frac{\beta}{b}\right)_1 : \left(\frac{\beta}{b}\right)_2 = 0,784$ ; $\bar{l} = 0,0763 \times 10^4$ |            |            |            |            |            |            |            |            |                   |
| $\bar{h}_0$  | 2,26       | 3,66       | 4,75       | 5,17       | 5,32       | 4,92       | 4,13       | 3,06       | $\times 10^{-4}$  |
| $s_0$  | - 2,50     | - 2,89     | - 2,34     | - 1,55     | 0,56       | 2,03       | 2,75       | 2,99       | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \bar{h}_0$  | 2,66       | 2,48       | 1,51       | 0,57       | - 0,25     | - 1,19     | - 1,86     | - 0,60     | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$  | - 0,7      | 0,2        | 1,3        | 2,8        | 3,6        | 2,3        | 1,0        | - 1,0      | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$  | - 6,2      | - 8,3      | - 5,5      | - 2,4      | 0,3        | 4,1        | 7,6        | 8,9        | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$   | 2,6        | 2,0        | 1,6        | 1,3        | 1,1        | 0,9        | 0,9        | 0,9        | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$  | - 4,3      | - 6,1      | - 2,6      | 1,7        | 5,0        | 7,3        | 9,5        | 8,8        | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$   | - 3,0      | 1,7        | 7,8        | 7,6        | 5,6        | 4,5        | 1,5        | - 1,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$  | 0,0        | - 1,2      | - 1,9      | - 1,8      | - 1,8      | - 1,6      | 0,6        | 2,0        | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$  | 13,3       | 14,3       | 7,1        | 1,8        | - 0,3      | - 4,8      | - 10,3     | - 3,6      | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$   | 13,3       | 13,1       | 5,2        | 0,0        | - 2,1      | - 6,4      | - 9,7      | - 1,6      | $\times 10^{-12}$ |
| $\bar{h}_0$  | 2,26       | 3,66       | 4,75       | 5,17       | 5,32       | 4,92       | 4,13       | 3,06       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_I$   | 0,33       | 0,46       | 0,24       | - 0,13     | - 0,35     | - 0,56     | - 0,73     | - 0,67     | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,04       | 0,04       | 0,02       | 0,00       | - 0,01     | - 0,02     | - 0,03     | - 0,00     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$  | 2,63       | 4,16       | 5,01       | 5,04       | 4,96       | 4,34       | 3,37       | 2,39       | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_a$  | <b>157</b> | <b>247</b> | <b>299</b> | <b>300</b> | <b>295</b> | <b>259</b> | <b>201</b> | <b>143</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$  | - 2,50     | - 2,88     | - 2,34     | - 1,55     | 0,56       | 2,03       | 2,76       | 2,99       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} s_I$   | - 0,20     | - 0,19     | - 0,12     | - 0,04     | 0,02       | 0,09       | 0,14       | 0,05       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$   | - 0,01     | 0,00       | 0,02       | 0,02       | 0,02       | 0,01       | 0,00       | - 0,00     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_I$  | - 2,71     | - 3,07     | - 2,44     | - 1,57     | 0,60       | 2,13       | 2,90       | 3,04       | $\times 10^{-4}$  |
| $S_a$  | - 84       | - 96       | - 76       | - 49       | 19         | 67         | 91         | 95         | $\times 10^9$     |

DE BEREKENING BIJ OPEN ZUIDERZEE ( $Z$ ).

Het gedeelte  $g c$  is geheel op dezelfde wijze behandeld als bij  $A$ : men gaat uit van dezelfde waarden voor  $h_g$  en van een door probeeren gevonden verloop van  $S_g$ , dat nu natuurlijk anders is dan bij afgesloten Zuiderzee.

Zijn  $h_c$  en  $S_c$  gevonden, dan gaat men niet verder: er zou in het punt  $c$ , waar drie geulen bijeenkomen, een nieuwe onderstelling moeten worden gemaakt en hierdoor wordt de berekening te ingewikkeld.

Daarom wordt nu het gedeelte  $a b$  berekend, waarbij men uitgaat van de bij afgesloten Zuiderzee gevonden waarden voor  $h_a$  en van een serie getallen voor  $S_a$ , die eerst op de gis worden gekozen en, telkens wanneer aan het slot van de berekening blijkt dat de uitkomst niet goed is (nl. niet voldoet aan de in § 101 genoemde voorwaarden), evenals de reeks voor  $S_g$ , door nieuwe worden vervangen.

Als resultaat van dit gedeelte worden  $h_b$  en  $S_b$  bekend.

Voor geul  $b c$  kent men thans voor elk tijdstip de hoogten aan de beide uiteinden ( $h_b$  en  $h_c$ ). Door probeeren kan men dan een waarde van  $S_{bc}$  of  $s$  vinden die op elk oogenblik voldoet aan de in § 98 gegeven vergelijking:

$$h_c - h_b = -\frac{l}{a} s - \frac{\beta l}{a} |s| + \frac{l}{a \varrho} F,$$

waarin  $\frac{l}{a \varrho} F$  niets anders is dan de in tabel 29 vermelde opwaaiing  $f_{bc}$ .

Deze  $S_{bc}$  wordt geteld bij  $S_c$  en afgetrokken van  $S_b$ ; men vindt zoodoende de, in tabel 33 vermelde, stroomen in  $c v$  en  $b v$ , die aan de beide voorwaarden van § 101 moeten voldoen (hun som gelijk aan den stroom  $S$  naar de Zuiderzee, en beide stroomen bestaanbaar met een zelfde waterhoogte in  $v$ ).

| $t$   | - 10000    | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | sec               |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| 1. <i>Van g uit.</i>  |            |            |            |            |            |            |            |            |                   |
| Geul 5; $gf$ . $\beta \sqrt{a} = 0,0278 \times 10^{-4}$ ; $\beta = 0,251 \times 10^{-8}$ ; $\bar{t} = 0,0722 \times 10^4$ . |            |            |            |            |            |            |            |            |                   |
| $h_g$   | <b>137</b> | <b>203</b> | <b>262</b> | <b>305</b> | <b>339</b> | <b>315</b> | <b>269</b> | <b>205</b> | <b>cm</b>         |
| $S_g$   | 131        | 143        | 150        | 147        | 143        | 114        | 73         | 24         | $\times 10^9$     |
| $\bar{h}_0$   | 3,81       | 5,64       | 7,28       | 8,48       | 9,42       | 8,75       | 7,48       | 5,70       | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_0$   | 4,10       | 4,50       | 4,70       | 4,60       | 4,50       | 3,58       | 2,29       | 0,76       | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \bar{h}_0$   | 3,40       | 3,47       | 2,84       | 2,14       | 0,27       | - 1,94     | - 3,05     | - 3,50     | $\times 10^{-8}$  |
| $\dot{\bar{s}}_0$   | 1,0        | 0,6        | 0,1        | - 0,2      | - 1,0      | - 2,2      | - 2,8      | - 3,5      | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$   | 16,8       | 20,2       | 22,1       | 21,2       | 20,2       | 12,8       | 5,2        | 0,6        | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$  | - 4,0      | - 3,7      | - 3,4      | - 3,0      | - 2,7      | - 2,4      | - 2,0      | - 1,7      | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$   | 13,8       | 17,1       | 18,8       | 18,0       | 16,5       | 8,2        | 0,4        | - 4,6      | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \bar{h}_I$  | 10,0       | 5,0        | 0,9        | - 2,3      | - 9,8      | - 16,1     | - 12,8     | - 10,0     | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$   | 0,7        | - 0,6      | - 1,3      | - 2,6      | - 4,1      | - 3,3      | - 1,6      | - 0,4      | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$   | 29,5       | 31,2       | 26,7       | 19,7       | 2,4        | - 13,9     | - 14,0     | - 5,3      | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$  | 30,2       | 30,6       | 25,4       | 17,1       | - 1,7      | - 17,2     | - 15,6     | - 5,7      | $\times 10^{-12}$ |
| $\bar{h}_0$   | 3,81       | 5,64       | 7,28       | 8,48       | 9,42       | 8,75       | 7,48       | 5,70       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{t} h_I$  | - 0,99     | - 1,23     | - 1,35     | - 1,30     | - 1,20     | - 0,59     | - 0,03     | 0,33       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{t}^2}{2} h_{II}$  | 0,08       | 0,08       | 0,07       | 0,04       | - 0,00     | - 0,04     | - 0,04     | - 0,01     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$   | 2,90       | 4,49       | 6,00       | 7,22       | 8,22       | 8,12       | 7,41       | 6,02       | $\times 10^{-4}$  |
| $h_f$   | <b>104</b> | <b>162</b> | <b>216</b> | <b>260</b> | <b>296</b> | <b>292</b> | <b>267</b> | <b>216</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$   | 4,10       | 4,50       | 4,70       | 4,60       | 4,50       | 3,58       | 2,29       | 0,76       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{t} s_I$  | - 0,25     | - 0,25     | - 0,20     | - 0,15     | - 0,02     | 0,14       | 0,22       | 0,25       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{t}^2}{2} s_{II}$  | 0,03       | 0,01       | 0,00       | - 0,01     | - 0,03     | - 0,04     | - 0,03     | - 0,03     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_I$   | 3,88       | 4,26       | 4,50       | 4,44       | 4,45       | 3,68       | 2,48       | 0,98       | $\times 10^{-4}$  |
| $S_f$   | 123        | 136        | 143        | 141        | 142        | 117        | 79         | 31         | $\times 10^9$     |

Geul 4, eerste helft;  $fd$ .  $\beta \sqrt{a} = 0,0664 \times 10^{-4}$ ;  $\left(\frac{\beta}{b}\right)_4 : \left(\frac{\beta}{b}\right)_5 = 1,110$ ;  $\bar{t} = 0,229 \times 10^4$ .

|                       |        |        |        |       |       |        |        |        |                   |
|-----------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------------------|
| $\bar{h}_0$           | 6,93   | 10,71  | 14,31  | 17,23 | 19,62 | 19,40  | 17,70  | 14,36  | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_0$           | 4,31   | 4,73   | 5,00   | 4,93  | 4,94  | 4,08   | 2,75   | 1,09   | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \bar{h}_0$     | 7,80   | 7,38   | 6,52   | 5,31  | 2,17  | - 1,92 | - 5,04 | - 6,40 | $\times 10^{-8}$  |
| $\dot{\bar{s}}_0$     | 1,0    | 0,7    | 0,2    | - 0,1 | - 0,8 | - 2,2  | - 3,0  | - 3,1  | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$     | 18,5   | 22,4   | 25,0   | 24,3  | 24,4  | 16,6   | 7,6    | 1,2    | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$            | - 12,8 | - 11,7 | - 10,7 | - 9,6 | - 8,5 | - 7,4  | - 6,4  | - 5,3  | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                 | 6,7    | 11,4   | 14,5   | 14,6  | 15,1  | 7,0    | - 1,8  | - 7,2  | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \bar{h}_I$  | 10,0   | 7,8    | 3,2    | 0,6   | - 7,6 | - 16,9 | - 14,2 | - 12,5 | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$           | 1,2    | - 1,3  | - 2,1  | - 4,4 | - 7,2 | - 7,2  | - 4,5  | - 2,0  | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$ | 67,0   | 69,8   | 65,2   | 52,4  | 21,4  | - 15,7 | - 27,7 | - 14,0 | $\times 10^{-12}$ |

| $t$                            | - 10000    | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | $sec$             |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $h_{II}$                       | 68,2       | 68,5       | 63,1       | 48,0       | 14,2       | - 22,9     | - 32,2     | - 16,0     | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$       | 15         | - 5        | - 20       | - 49       | - 71       | - 46       | 7          | 25         | $\times 10^{-16}$ |
| $s_{II}$                       | - 5        | - 7        | - 7        | - 11       | - 18       | - 7        | 4          | 9          | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_I^2$                  | 122        | 109        | 85         | 57         | 9          | 7          | 51         | 82         | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_{II}$       | 86         | 74         | 32         | 6          | - 75       | - 138      | - 78       | - 27       | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | 203        | 176        | 110        | 52         | - 84       | - 138      | - 23       | 64         | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 6,93       | 10,71      | 14,31      | 17,23      | 19,62      | 19,40      | 17,70      | 14,36      | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{t} h_I$                 | - 1,54     | - 2,61     | - 3,32     | - 3,34     | - 3,46     | - 1,60     | 0,41       | 1,64       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{t}^2}{2} h_{II}$   | 1,79       | 1,80       | 1,66       | 1,26       | 0,37       | - 0,60     | - 0,84     | - 0,42     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{t}^3}{6} h_{III}$ | - 0,41     | - 0,35     | - 0,22     | - 0,10     | 0,17       | 0,28       | 0,05       | - 0,13     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$                    | 6,77       | 9,55       | 12,43      | 15,05      | 16,70      | 17,48      | 17,32      | 15,45      | $\times 10^{-4}$  |
| $h_d$                          | <b>102</b> | <b>144</b> | <b>187</b> | <b>227</b> | <b>252</b> | <b>263</b> | <b>261</b> | <b>233</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$                    | 4,31       | 4,73       | 5,00       | 4,93       | 4,94       | 4,08       | 2,75       | 1,09       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{t} s_I$                 | - 1,79     | - 1,69     | - 1,50     | - 1,22     | - 0,50     | 0,44       | 1,15       | 1,47       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{t}^2}{2} s_{II}$   | 0,26       | 0,20       | 0,08       | 0,02       | - 0,20     | - 0,44     | - 0,37     | - 0,33     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{t}^3}{6} s_{III}$ | - 0,03     | 0,01       | 0,04       | 0,10       | 0,14       | 0,09       | - 0,01     | - 0,05     | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I$                          | 2,75       | 3,25       | 3,62       | 3,83       | 4,38       | 4,17       | 3,52       | 2,18       | $\times 10^{-4}$  |
| $S_d$                          | 79         | 93         | 104        | 110        | 125        | 119        | 101        | 63         | $\times 10^9$     |

Geul 4, tweede helft;  $d.c.$  Constanten als boven;  $\bar{h}_0 = \bar{h}_I$  eerste helft;  $\bar{s}_0 = \bar{s}_I$  eerste helft.

|                                |        |        |        |        |        |        |        |        |                   |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| $s_I = \dot{\bar{h}}_0$        | 5,00   | 5,66   | 5,50   | 4,27   | 2,43   | 0,62   | - 2,03 | - 4,50 | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$                    | 0,9    | 0,9    | 0,6    | 0,7    | 0,3    | - 0,9  | - 2,0  | - 2,6  | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$              | 7,5    | 10,6   | 13,1   | 14,6   | 19,2   | 17,4   | 12,4   | 4,7    | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$                     | - 12,8 | - 11,7 | - 10,7 | - 9,6  | - 8,5  | - 7,4  | - 6,4  | - 5,3  | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                          | - 4,4  | - 0,2  | 3,0    | 5,7    | 11,0   | 9,1    | 4,0    | - 3,2  | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$           | 8,0    | 7,4    | 5,9    | 8,0    | 3,4    | - 7,0  | - 12,3 | - 10,0 | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$                    | 3,6    | 0,5    | - 1,4  | - 3,1  | - 3,6  | - 4,5  | - 5,1  | - 5,0  | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$          | 27,5   | 36,7   | 39,9   | 32,7   | 21,3   | 5,2    | - 14,3 | - 19,6 | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$                       | 31,1   | 37,2   | 38,5   | 29,6   | 17,7   | 0,7    | - 19,4 | - 24,6 | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$       | 15     | 7      | - 8    | - 21   | - 29   | - 37   | - 25   | - 15   | $\times 10^{-16}$ |
| $\dot{s}_{II}$                 | 3      | - 2    | 1      | - 2    | - 15   | - 16   | - 3    | 11     | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_I^2$                  | 50     | 64     | 60     | 36     | 12     | 1      | 8      | 40     | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_{II}$       | 44     | 48     | 43     | 61     | 30     | - 58   | - 86   | - 44   | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | 97     | 110    | 104    | 95     | 27     | - 73   | - 81   | 7      | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 6,77   | 9,55   | 12,43  | 15,05  | 16,70  | 17,48  | 17,32  | 15,45  | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{t} h_I$                 | 1,01   | 0,05   | - 0,69 | - 1,31 | - 2,52 | - 2,08 | - 0,92 | 0,73   | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{t}^2}{2} h_{II}$   | 0,82   | 0,98   | 1,01   | 0,78   | 0,46   | 0,02   | - 0,51 | - 0,65 | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{t}^3}{6} h_{III}$ | - 0,19 | - 0,22 | - 0,21 | - 0,19 | - 0,05 | 0,15   | 0,16   | - 0,01 | $\times 10^{-4}$  |

| $t$                                      | - 10000    | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | sec              |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| $\bar{h}_l$ . . . . .                    | 8,41       | 10,36      | 12,54      | 14,33      | 14,59      | 15,57      | 16,05      | 15,52      | $\times 10^{-4}$ |
| $h_c$ . . . . .                          | <b>126</b> | <b>156</b> | <b>189</b> | <b>216</b> | <b>220</b> | <b>234</b> | <b>242</b> | <b>234</b> | <b>cm</b>        |
| $\bar{s}_0$ . . . . .                    | 2,75       | 3,25       | 3,62       | 3,83       | 4,38       | 4,17       | 3,52       | 2,18       | $\times 10^{-4}$ |
| $-\bar{l}s_I$ . . . . .                  | - 1,14     | - 1,30     | - 1,26     | - 0,98     | - 0,56     | - 0,14     | 0,47       | 1,03       | $\times 10^{-4}$ |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$ . . . . .   | 0,21       | 0,19       | 0,15       | 0,21       | 0,09       | - 0,18     | - 0,32     | - 0,26     | $\times 10^{-4}$ |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} s_{III}$ . . . . . | - 0,03     | - 0,01     | 0,02       | 0,04       | 0,06       | 0,07       | 0,05       | 0,03       | $\times 10^{-4}$ |
| $s_l$ . . . . .                          | 1,79       | 2,13       | 2,53       | 3,10       | 3,97       | 3,92       | 3,72       | 2,98       | $\times 10^{-4}$ |
| $S_c$ . . . . .                          | 51         | 61         | 73         | 89         | 114        | 113        | 107        | 86         | $\times 10^9$    |

Gecontroleerd door terug te rekenen.

2. Van a wit.

Geul 1;  $a p$ .  $\beta \sqrt{\alpha} = 0,0168 \times 10^{-4}$ ;  $\beta = 0,128 \times 10^{-8}$ ;  $\bar{l} = 0,0763 \times 10^4$ .

|  |            |            |            |            |            |            |            |            |                   |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $h_a$ . . . . .                        | <b>157</b> | <b>247</b> | <b>299</b> | <b>300</b> | <b>295</b> | <b>259</b> | <b>201</b> | <b>143</b> | <b>cm</b>         |
| $S_a$ . . . . .                        | 106        | 131        | 125        | 106        | 98         | 72         | 38         | - 20       | $\times 10^9$     |
| $\bar{h}_0$ . . . . .                  | 2,63       | 4,16       | 5,01       | 5,04       | 4,96       | 4,34       | 3,37       | 2,39       | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_0$ . . . . .                  | 3,40       | 4,20       | 4,00       | 3,40       | 3,10       | 2,30       | 1,20       | - 0,63     | $\times 10^{-4}$  |
| $s_I = \bar{h}_0$ . . . . .            | 2,80       | 2,38       | 0,88       | - 0,05     | - 0,70     | - 1,59     | - 1,95     | - 2,00     | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$ . . . . .                  | 2,2        | 0,6        | - 0,8      | - 0,9      | - 1,1      | - 1,9      | - 2,9      | - 2,5      | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$ . . . . .            | 11,6       | 17,6       | 16,0       | 11,6       | 9,6        | 5,3        | 1,4        | - 0,4      | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$ . . . . .                   | - 2,6      | - 2,0      | - 1,6      | - 1,3      | - 1,1      | - 0,9      | - 0,9      | - 0,9      | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$ . . . . .                        | 11,2       | 16,2       | 13,6       | 9,4        | 7,4        | 2,5        | - 2,4      | - 3,8      | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$ . . . . .         | 11,0       | 2,4        | - 6,8      | - 6,2      | - 6,9      | - 9,8      | - 6,3      | - 3,5      | $\times 10^{-12}$ |
| $\bar{s}_I$ . . . . .                  | 0,0        | - 1,9      | - 2,4      | - 1,6      | - 1,6      | - 1,2      | - 0,4      | 0,2        | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2\bar{s}_0 s_I$ . . . . .         | 19,0       | 20,0       | 7,0        | - 0,3      | - 4,3      | - 7,3      | - 4,7      | - 2,5      | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$ . . . . .                     | 19,0       | 18,1       | 4,6        | - 1,9      | - 5,9      | - 8,5      | - 5,1      | - 2,3      | $\times 10^{-12}$ |
| $\bar{h}_0$ . . . . .                  | 2,63       | 4,16       | 5,01       | 5,04       | 4,96       | 4,34       | 3,37       | 2,39       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l}h_I$ . . . . .                | - 0,85     | - 1,24     | - 1,03     | - 0,72     | - 0,56     | - 0,19     | 0,18       | 0,29       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$ . . . . . | 0,06       | 0,05       | 0,01       | - 0,01     | - 0,01     | - 0,02     | - 0,01     | - 0,01     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_l$ . . . . .                  | 1,84       | 2,97       | 3,99       | 4,31       | 4,39       | 4,13       | 3,54       | 2,67       | $\times 10^{-4}$  |
| $h_p$ . . . . .                        | <b>109</b> | <b>177</b> | <b>238</b> | <b>256</b> | <b>262</b> | <b>246</b> | <b>211</b> | <b>159</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$ . . . . .                  | 3,40       | 4,20       | 4,00       | 3,40       | 3,10       | 2,30       | 1,20       | - 0,63     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l}s_I$ . . . . .                | - 0,21     | - 0,18     | - 0,06     | 0,00       | 0,06       | 0,12       | 0,15       | 0,15       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$ . . . . . | 0,03       | 0,01       | - 0,02     | - 0,02     | - 0,02     | - 0,03     | - 0,02     | - 0,01     | $\times 10^{-4}$  |
| $s_l$ . . . . .                        | 3,22       | 4,03       | 3,92       | 3,38       | 3,14       | 2,39       | 1,33       | - 0,49     | $\times 10^{-4}$  |
| $S_p$ . . . . .                        | 100        | 126        | 123        | 106        | 98         | 75         | 42         | - 15       | $\times 10^9$     |

Geul 2, eerste helft;  $p q$ .  $\beta \sqrt{\alpha} = 0,0542 \times 10^{-4}$ ;  $\left(\frac{\beta}{b}\right)_2 : \left(\frac{\beta}{b}\right)_1 = 1,276$ ;  $\bar{l} = 0,1693 \times 10^4$ .

|                       |      |      |       |       |       |       |       |        |                  |
|-----------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------------|
| $\bar{h}_0$ . . . . . | 5,94 | 9,58 | 12,90 | 13,91 | 14,17 | 13,32 | 11,40 | 8,62   | $\times 10^{-4}$ |
| $\bar{s}_0$ . . . . . | 4,10 | 5,14 | 5,01  | 4,31  | 4,01  | 3,05  | 1,70  | - 0,63 | $\times 10^{-4}$ |

| $t$                            | - 10000   | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | sec               |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $s_I = \bar{h}_0$              | 6,00      | 6,96       | 4,33       | 1,27       | - 0,59     | - 2,77     | - 4,70     | - 6,00     | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$                    | 3,0       | 0,9        | - 0,8      | - 1,0      | - 1,3      | - 2,3      | - 3,7      | - 3,6      | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$              | 16,8      | 26,4       | 25,1       | 18,6       | 16,2       | 9,3        | 2,9        | - *)       | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$                     | - 12,0    | - 9,7      | - 7,7      | - 6,1      | - 5,0      | - 4,3      | - 4,1      | - 4,2      | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                          | 7,8       | 17,6       | 16,6       | 11,5       | 9,9        | 2,7        | - 4,9      | - 7,8      | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$           | 17,0      | 8,8        | - 6,1      | - 6,8      | - 8,8      | - 14,7     | - 10,5     | - 7,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$                    | 2,0       | - 1,7      | - 5,7      | - 4,9      | - 4,0      | - 4,1      | - 3,2      | - 0,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$          | 49,2      | 71,5       | 43,5       | 11,0       | - 4,7      | - 17,0     | - 16,0     | - *)       | $\times 10^{-12}$ |
| $h_{II}$                       | 51,2      | 69,8       | 37,8       | 6,1        | - 8,7      | - 21,1     | - 19,2     | - 0,0      | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$       | 40        | - 13       | - 64       | - 46       | - 27       | - 10       | 21         | 30         | $\times 10^{-16}$ |
| $\dot{s}_{II}$                 | - 0       | - 23       | - 16       | - 3        | - 8        | - 2        | 8          | 15         | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_I^2$            | 72        | 97         | 38         | 3          | 1          | 15         | 44         | - *)       | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_{II}$       | 139       | 91         | - 61       | - 59       | - 71       | - 90       | - 36       | - *)       | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | 211       | 165        | - 39       | - 59       | - 78       | - 77       | 16         | 15         | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 5,94      | 9,58       | 12,90      | 13,91      | 14,17      | 13,32      | 11,40      | 8,62       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_I$                 | - 1,31    | - 2,96     | - 2,80     | - 1,94     | - 1,66     | - 0,46     | 0,83       | 1,31       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,73      | 1,00       | 0,54       | 0,09       | - 0,12     | - 0,30     | - 0,27     | - 0,00     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} h_{III}$ | - 0,17    | - 0,13     | 0,03       | 0,05       | 0,06       | 0,06       | - 0,01     | - 0,01     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$                    | 5,19      | 7,49       | 10,67      | 12,11      | 12,45      | 12,62      | 11,95      | 9,92       | $\times 10^{-4}$  |
| $h_q$                          | <b>96</b> | <b>138</b> | <b>197</b> | <b>224</b> | <b>230</b> | <b>233</b> | <b>221</b> | <b>183</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$                    | 4,10      | 5,14       | 5,01       | 4,31       | 4,01       | 3,05       | 1,70       | - 0,63     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} s_I$                 | - 1,01    | - 1,17     | - 0,72     | - 0,21     | 0,10       | 0,47       | 0,79       | 1,01       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$   | 0,24      | 0,13       | - 0,09     | - 0,10     | - 0,12     | - 0,21     | - 0,15     | - 0,10     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} s_{III}$ | - 0,03    | 0,01       | 0,05       | 0,04       | 0,02       | 0,01       | - 0,02     | - 0,02     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_I$                    | 3,30      | 4,11       | 4,25       | 4,04       | 4,01       | 3,32       | 2,32       | 0,26       | $\times 10^{-4}$  |
| $S_q$                          | 81        | 101        | 104        | 99         | 98         | 81         | 57         | 6          | $\times 10^9$     |

Geul 2, tweede helft;  $q$  b. Constanten als boven;  $\bar{h}_0 = \bar{h}_I$  eerste helft,  $\bar{s}_0 = \bar{s}_I$  eerste helft.

|                       |        |       |       |       |       |        |        |        |                   |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------------------|
| $s_I = \bar{h}_0$     | 4,50   | 5,48  | 4,62  | 1,78  | 0,51  | - 0,50 | - 2,70 | - 5,00 | $\times 10^{-8}$  |
| $\bar{s}_0$           | 2,5    | 1,0   | - 0,1 | - 0,2 | - 0,7 | - 1,7  | - 3,1  | - 3,6  | $\times 10^{-8}$  |
| $\pm \bar{s}_0^2$     | 10,9   | 16,9  | 18,0  | 16,3  | 16,1  | 11,0   | 5,4    | 0,1    | $\times 10^{-8}$  |
| $-\bar{F}$            | - 12,0 | - 9,7 | - 7,7 | - 6,1 | - 5,0 | - 4,3  | - 4,1  | - 4,2  | $\times 10^{-8}$  |
| $h_I$                 | 1,4    | 8,2   | 10,3  | 10,0  | 10,4  | 5,0    | - 1,8  | - 7,7  | $\times 10^{-8}$  |
| $s_{II} = \dot{h}_I$  | 14,0   | 8,9   | 1,8   | 0,1   | - 5,0 | - 12,2 | - 12,7 | - 9,0  | $\times 10^{-12}$ |
| $\dot{s}_I$           | 2,0    | 0,1   | - 3,7 | - 4,1 | - 2,3 | - 3,2  | - 4,5  | - 2,5  | $\times 10^{-12}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_I$ | 29,7   | 45,0  | 39,4  | 14,4  | 4,1   | - 3,3  | - 12,5 | - 2,6  | $\times 10^{-12}$ |

\*) Weggelaten omdat  $s$  van teeken wisselt.

| <i>t</i>                       | - 10000   | - 5000     | 0          | 5000       | 10000      | 15000      | 20000      | 25000      | <i>sec</i>        |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| $h_{II}$                       | 31,7      | 45,1       | 35,7       | 10,3       | 1,8        | - 6,5      | - 17,0     | - 5,1      | $\times 10^{-12}$ |
| $s_{III} = \dot{h}_{II}$       | 30        | 4          | - 35       | - 34       | - 17       | - 19       | 1          | 20         | $\times 10^{-16}$ |
| $s_{II}$                       | - 4       | - 12       | - 9        | - 7        | - 12       | - 8        | 3          | 5          | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 s_I^2$                  | 40        | 60         | 43         | 6          | 1          | 0          | 15         | 50         | $\times 10^{-16}$ |
| $\pm 2 \bar{s}_0 s_{II}$       | 92        | 73         | 15         | 1          | - 40       | - 81       | - 59       | - 5        | $\times 10^{-16}$ |
| $h_{III}$                      | 128       | 121        | 49         | 0          | - 51       | - 89       | - 41       | 50         | $\times 10^{-16}$ |
| $\bar{h}_0$                    | 5,19      | 7,49       | 10,67      | 12,11      | 12,45      | 12,62      | 11,95      | 9,92       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} h_I$                 | - 0,24    | - 1,38     | - 1,74     | - 1,69     | - 1,76     | - 0,85     | 0,30       | 1,30       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} h_{II}$   | 0,45      | 0,64       | 0,51       | 0,15       | 0,03       | - 0,09     | - 0,24     | - 0,07     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} h_{III}$ | - 0,10    | - 0,10     | - 0,04     | 0,00       | 0,04       | 0,07       | 0,03       | - 0,04     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{h}_I$                    | 5,30      | 6,65       | 9,40       | 10,57      | 10,76      | 11,75      | 12,04      | 11,11      | $\times 10^{-4}$  |
| $h_b$                          | <b>98</b> | <b>123</b> | <b>173</b> | <b>194</b> | <b>199</b> | <b>217</b> | <b>222</b> | <b>206</b> | <b>cm</b>         |
| $\bar{s}_0$                    | 3,30      | 4,11       | 4,25       | 4,04       | 4,01       | 3,32       | 2,32       | 0,26       | $\times 10^{-4}$  |
| $-\bar{l} s_I$                 | - 0,76    | - 0,92     | - 0,78     | - 0,30     | - 0,09     | 0,08       | 0,46       | 0,84       | $\times 10^{-4}$  |
| $\frac{\bar{l}^2}{2} s_{II}$   | 0,20      | 0,13       | 0,03       | 0,00       | - 0,07     | - 0,17     | - 0,18     | - 0,13     | $\times 10^{-4}$  |
| $-\frac{\bar{l}^3}{6} s_{III}$ | - 0,02    | - 0,00     | 0,03       | 0,03       | 0,01       | 0,02       | - 0,00     | - 0,02     | $\times 10^{-4}$  |
| $\bar{s}_I$                    | 2,72      | 3,32       | 3,53       | 3,77       | 3,86       | 3,25       | 2,60       | 0,95       | $\times 10^{-4}$  |
| $S_b$                          | 67        | 81         | 87         | 92         | 94         | 80         | 64         | 23         | $\times 10^9$     |

Gecontroleerd door terug te rekenen.

3. Geul 3; bc.  $h_b + f_{bc} - h_c = h_3 = 0,1358 \times 10^{-9} \dot{S}_3 \pm 0,00988 \times 10^{-18} S_3^2$ .

|                                     |       |       |       |       |       |       |       |       |               |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| $h_b$                               | 98    | 123   | 173   | 194   | 199   | 217   | 222   | 206   | cm            |
| $f_{bc}$                            | 40    | 32    | 26    | 21    | 17    | 15    | 14    | 14    | cm            |
| $-h_c$                              | - 126 | - 156 | - 189 | - 216 | - 220 | - 234 | - 242 | - 234 | cm            |
| $h_3$                               | 12    | - 1   | 10    | - 1   | - 4   | - 2   | - 6   | - 14  | cm            |
| $S_3$                               | 28    | - 12  | 25    | 17    | - 8   | - 8   | - 17  | - 32  | $\times 10^9$ |
| $0,1358 \times 10^{-9} \dot{S}_3$   | 4     | 0     | 4     | - 4   | - 3   | - 1   | - 3   | - 4   | cm            |
| $\pm 0,00988 \times 10^{-18} S_3^2$ | 8     | - 1   | 6     | 3     | - 1   | - 1   | - 3   | - 10  | cm            |

## UURKAARTJES VAN WATERHOOGTEN EN GETIJSTROOMEN (§ 12).

De kaartjes bevatten alle op 31 Mei 1919 waargenomen waterhoogten en stroomen (Boontjes, Piaam en Stavoren) en verder de uitkomsten van een groot aantal andere niveau- en stroommetingen, die op een, met de in § 11 (blz. 29) genoemde methode overeenkomende, wijze tot den toestand van 31 Mei 1919 zijn herleid.

De schaal van de zwarte stroompijltes is bij de kaartjes aangegeven; de vlaggetjes zijn niet, zooals bij windpijltes steeds geschiedt, naar links, maar naar rechts geteekend.

De roode niveaulijnen zijn om de 10 cm getrokken, de pijltjes wijzen met het verhang mee, dus naar de plaats met den lagen waterstand.

De op het oogenblik waarvoor het kaartje geldt droogliggende banken hebben de kleur van het land; de gedeelten van de zee waar het water stijgt zijn wit gelaten, die waar het water valt zijn blauw getint.

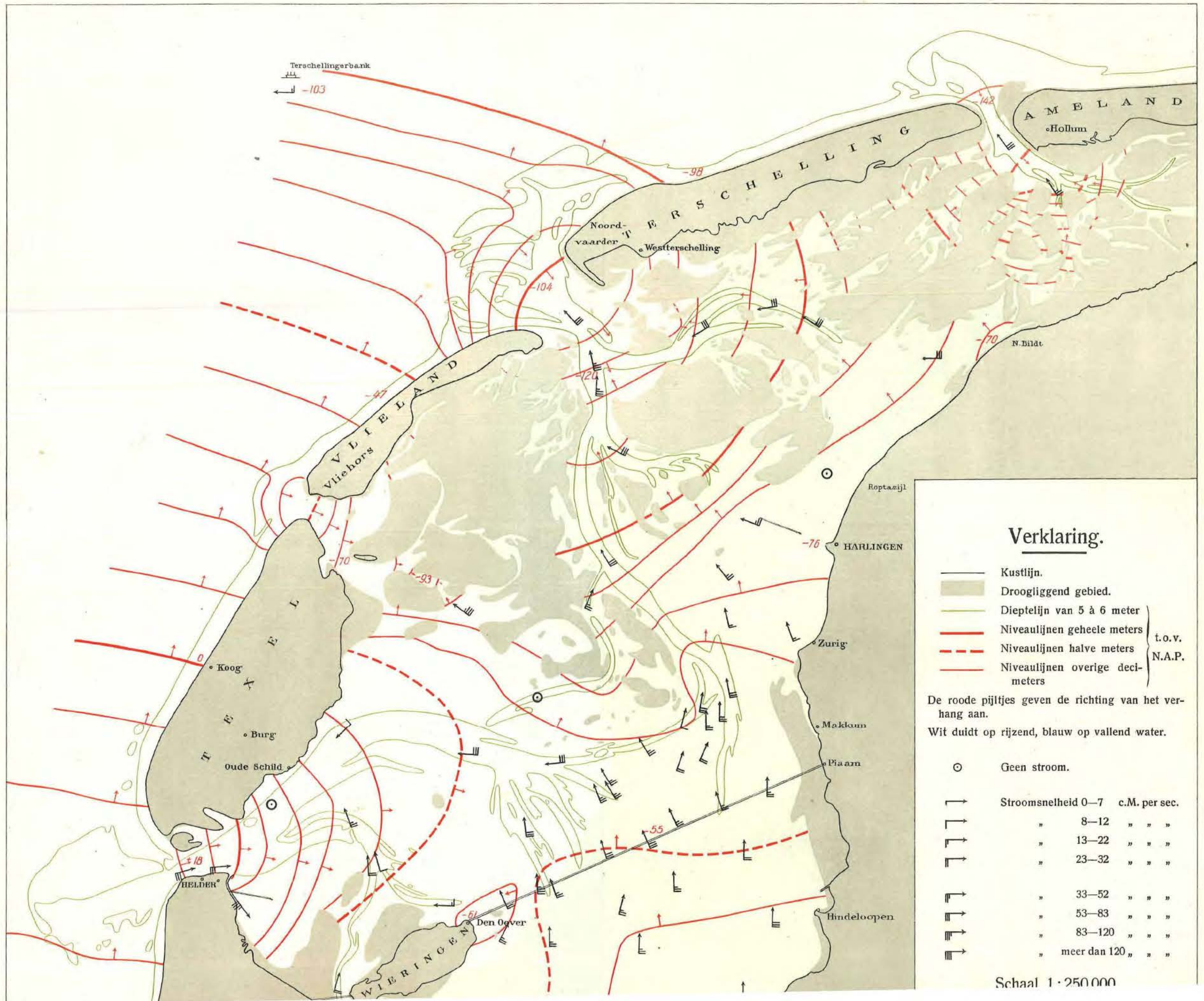
Het getij van dezen dag is een sterk ontwikkeld springtij; het tijverschil was 10 tot 25 % groter dan het gemiddelde. In verband daarmee zijn de stroomen ook 5 tot 10 % sterker dan normaal. Het weder was fraai, evenals op de voorafgaande dagen. In verband met den zwakken tot matigen wind uit oostelijke richtingen zijn de waterstanden lager dan gewoonlijk; het verschil bedraagt 10 à 20 cm.

De meeste stroommetingen zijn gedurende het onderzoek der Staatscommissie uitgevoerd. De stroomen bij het lichtschip Terschellingerbank zijn echter ontleend aan de studies van VAN DER STOK (literatuuropgave n<sup>o</sup>. 42); die bij Hindeloopen en ten zuidwesten van Harlingen tusschen Molenrak en Boontjes zijn verricht bij het terreinwerk van de Zuiderzeevereeniging in 1889 en 1890, terwijl ten slotte enkele pijltjes tusschen de buitengronden van de zeegaten van Texel en Terschelling te danken zijn aan het opnemingsvaartuig „Hydrograaf” van de Marine.

---

# Toestand 10 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 4 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

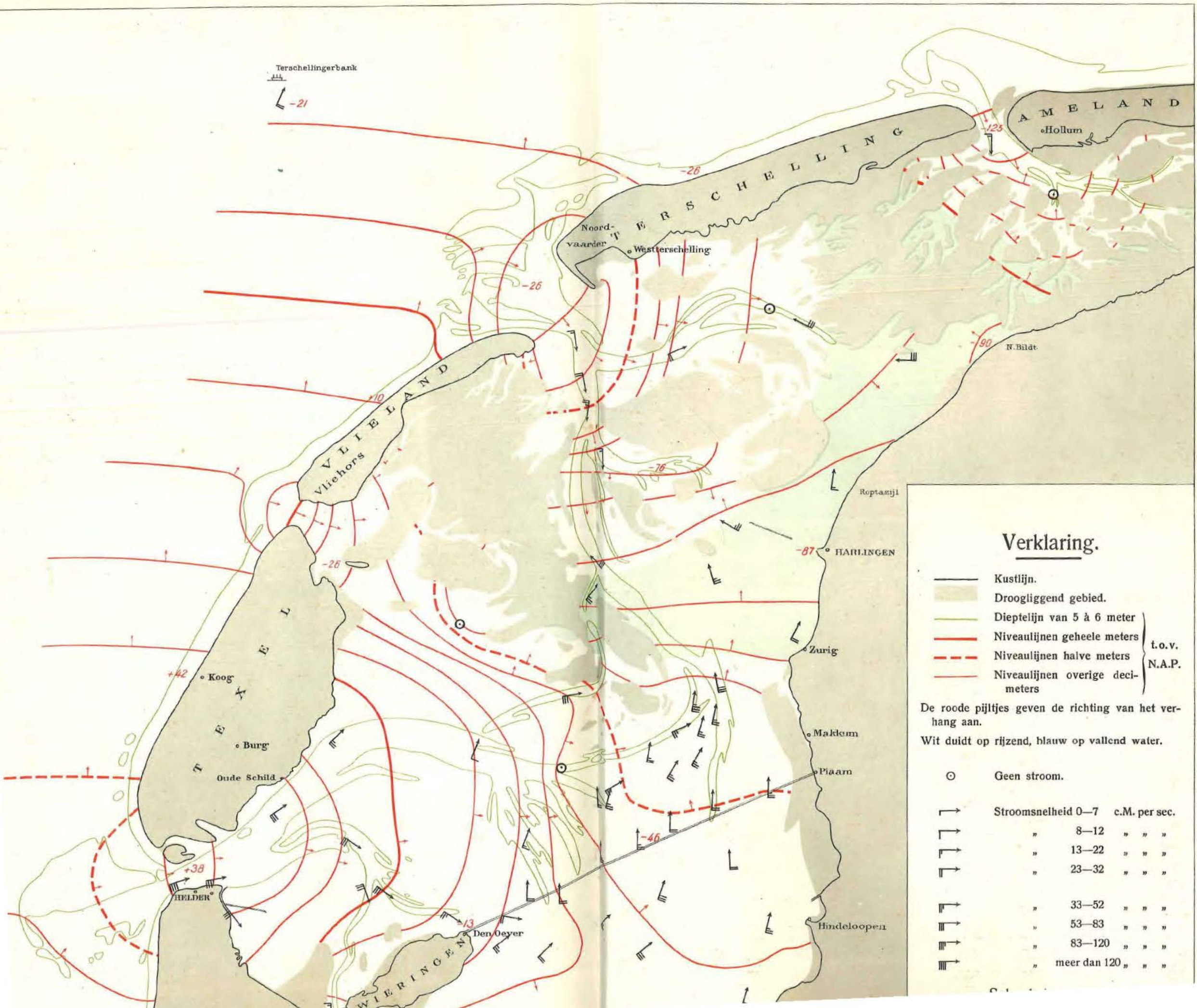
Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- Stroomsnelheid 0—7 c.M. per sec.
- " 8—12 " " "
- " 13—22 " " "
- " 23—32 " " "
- " 33—52 " " "
- " 53—83 " " "
- " 83—120 " " "
- " meer dan 120 " " "

Schaal 1:250.000

# Toestand 9 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 5 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - - - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

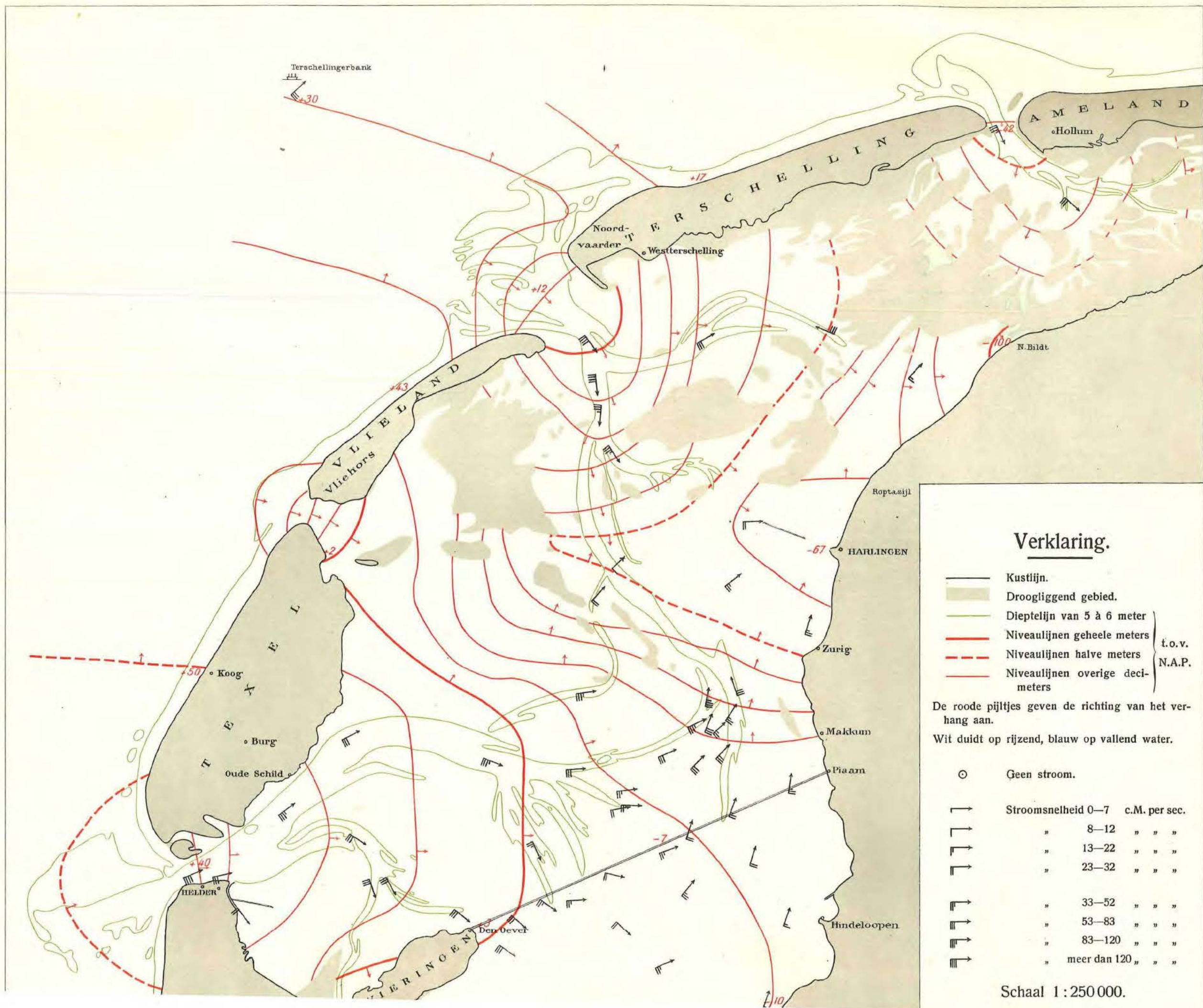
De roode pijtjes geven de richting van het verhang aan.

Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

|          |                                  |
|----------|----------------------------------|
| ○        | Geen stroom.                     |
| ↑        | Stroomsnelheid 0—7 c.M. per sec. |
| ↑↑       | 8—12 " " "                       |
| ↑↑↑      | 13—22 " " "                      |
| ↑↑↑↑     | 23—32 " " "                      |
| ↑↑↑↑↑    | 33—52 " " "                      |
| ↑↑↑↑↑↑   | 53—83 " " "                      |
| ↑↑↑↑↑↑↑  | 83—120 " " "                     |
| ↑↑↑↑↑↑↑↑ | meer dan 120 " " "               |

# Toestand 8 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 6 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - - - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

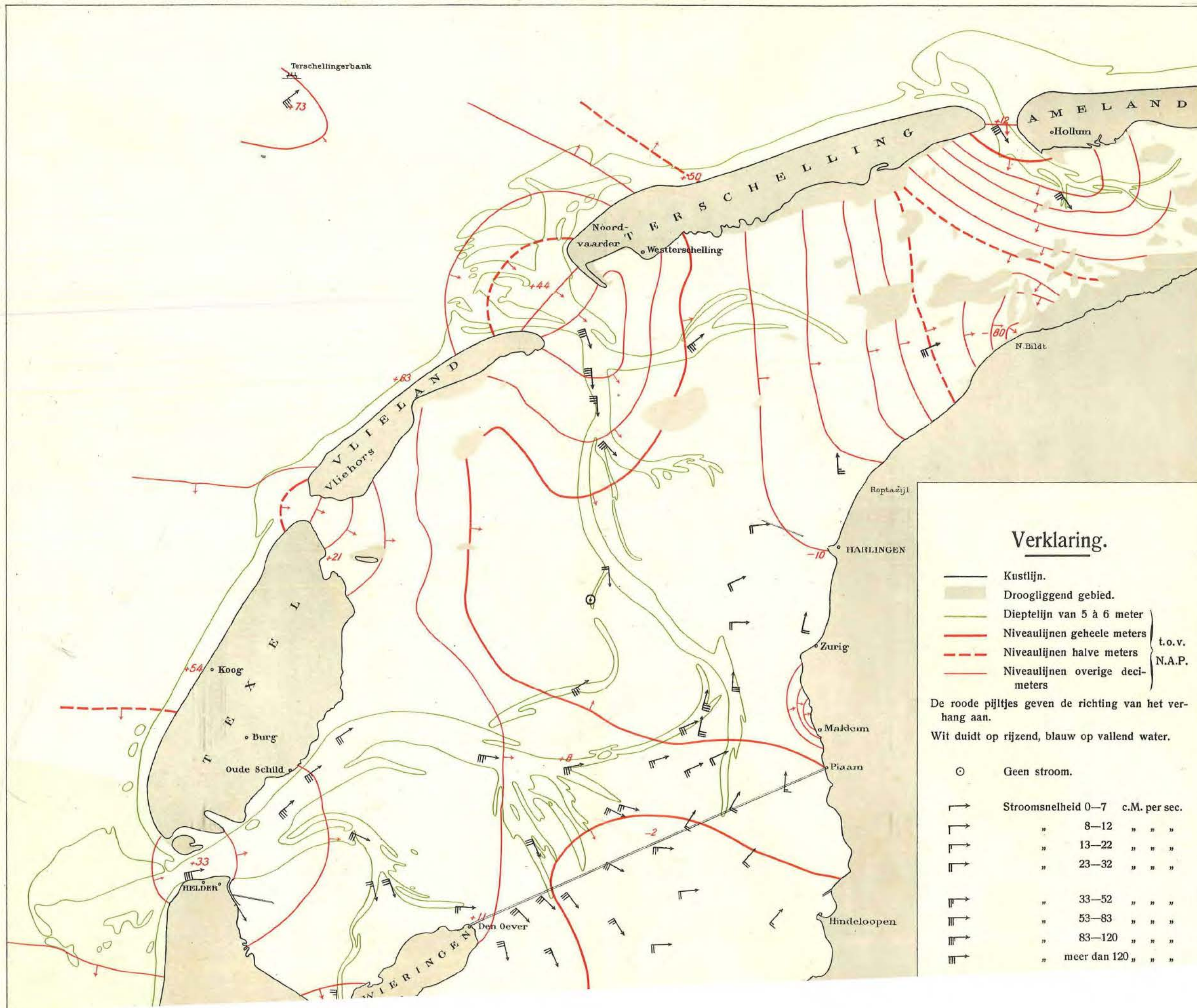
Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- Stroomsnelheid 0—7 c.M. per sec.
- " 8—12 " " "
- " 13—22 " " "
- " 23—32 " " "
- " 33—52 " " "
- " 53—83 " " "
- " 83—120 " " "
- " meer dan 120 " " "

Schaal 1:250 000.

# Toestand 7 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 7 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
- Droogliggend gebied.
- Dieptelijn van 5 à 6 meter
- Niveaulijnen geheele meters } t.o.v.
- - - Niveaulijnen halve meters } N.A.P.
- Niveaulijnen overige deci- } meters

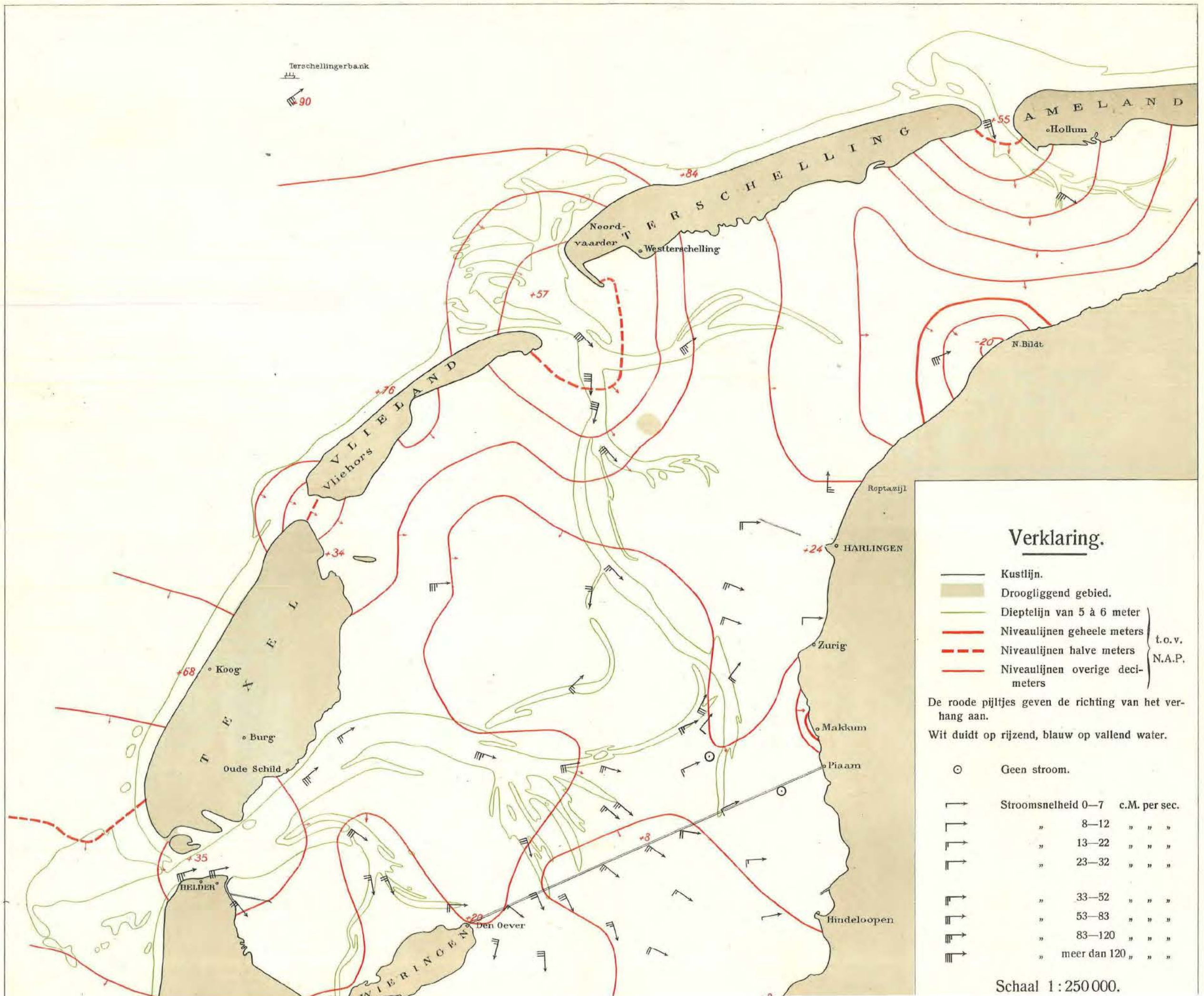
De rode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- ↗ Stroomsnelheid 0-7 c.M. per sec.
- ↘ " 8-12 " " "
- ↖ " 13-22 " " "
- ↙ " 23-32 " " "
- ↗ " 33-52 " " "
- ↘ " 53-83 " " "
- ↖ " 83-120 " " "
- ↙ " meer dan 120 " " "

# Toestand 6 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 8 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - - - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

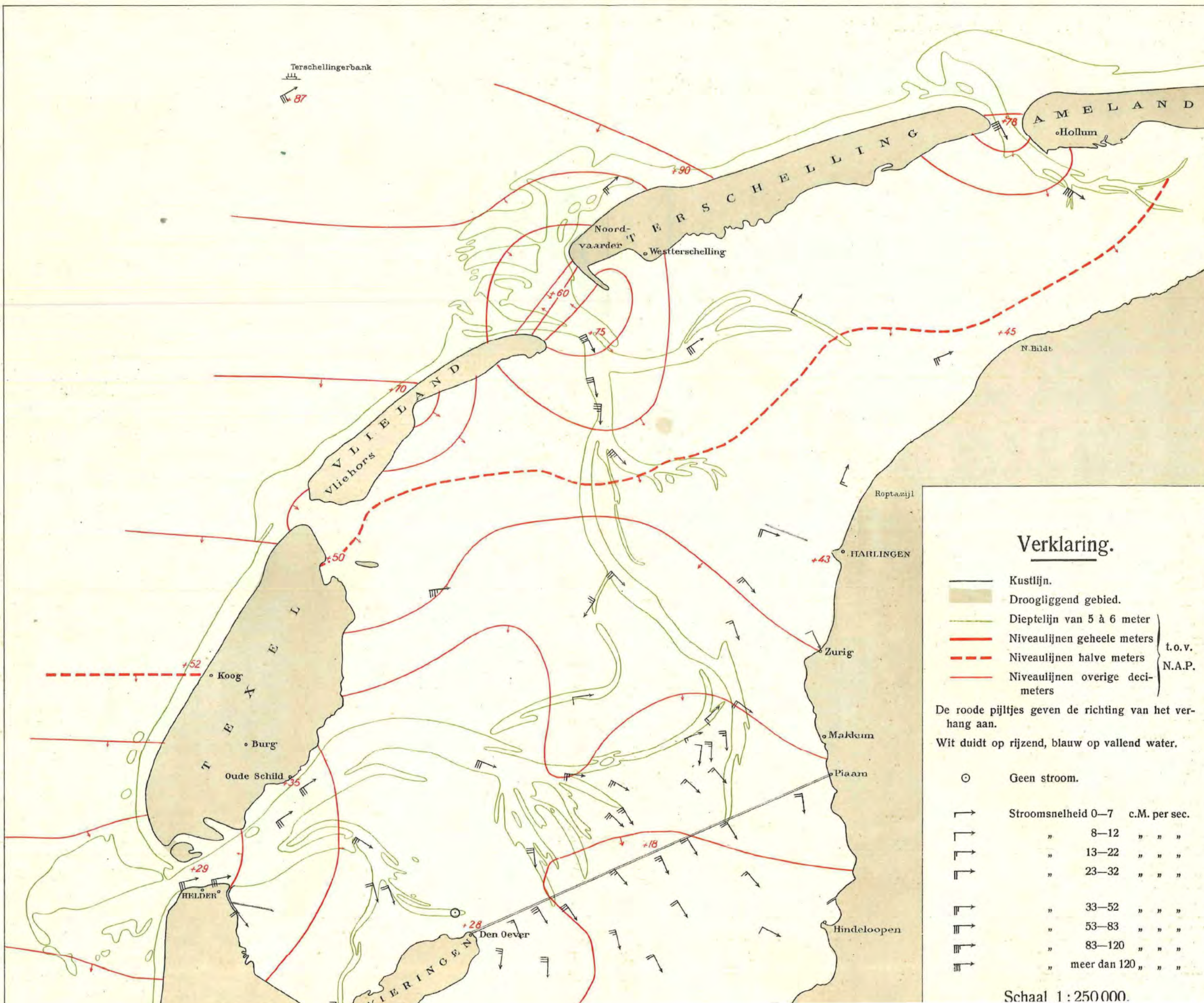
Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- ↖ Stroomsnelheid 0—7 c.M. per sec.
- ↗ " 8—12 " " "
- ↘ " 13—22 " " "
- ↙ " 23—32 " " "
- ↖↗ " 33—52 " " "
- ↘↙ " 53—83 " " "
- ↖↗↘ " 83—120 " " "
- ↘↙↖ " meer dan 120 " " "

Schaal 1:250 000.

# Toestand 5 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 9 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

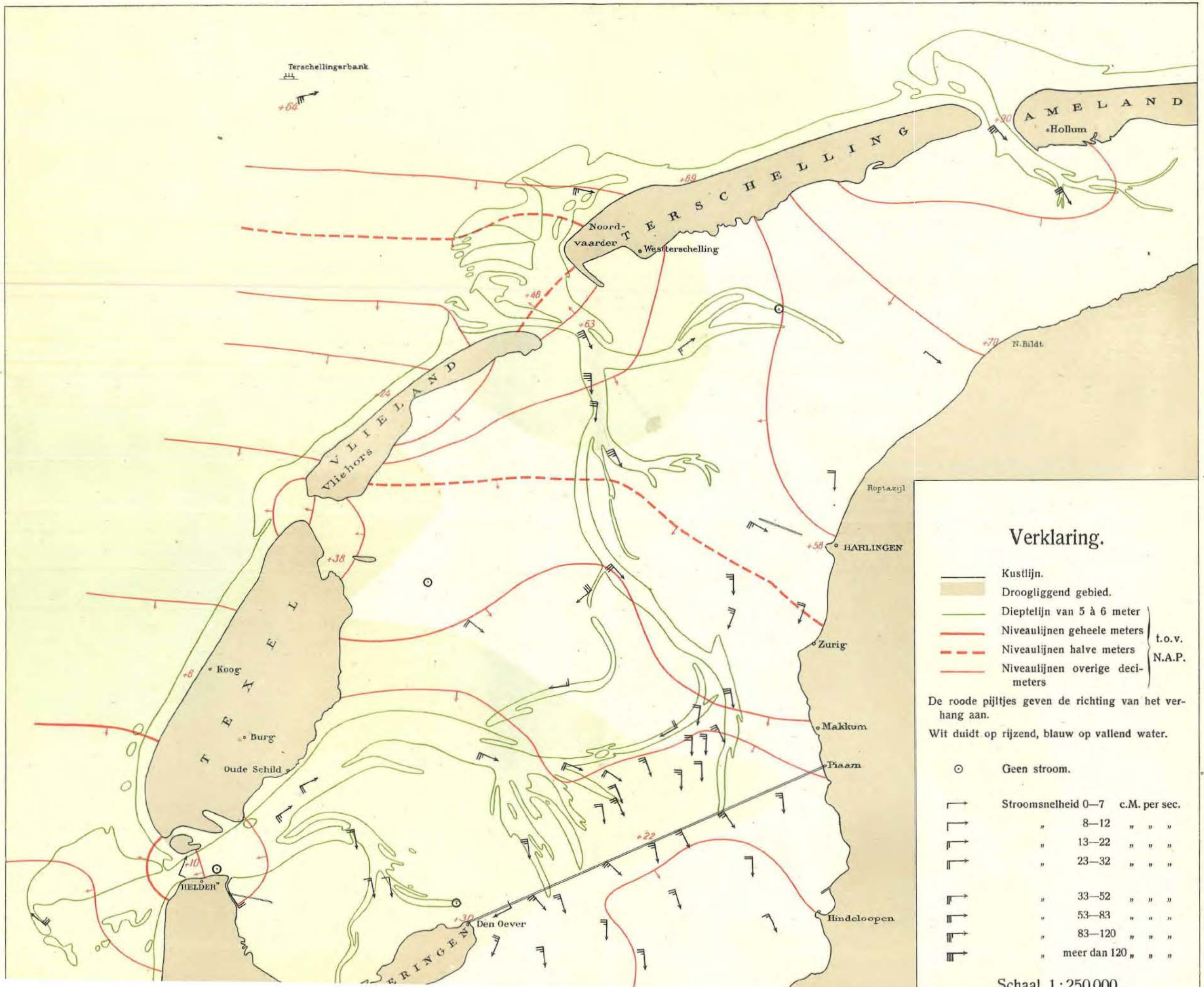
Wit duidt op ryzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- Stromsnelheid 0-7 c.M. per sec.
- " 8-12 " " "
- " 13-22 " " "
- " 23-32 " " "
- " 33-52 " " "
- " 53-83 " " "
- " 83-120 " " "
- " meer dan 120 " " "

Schaal 1 : 250 000.

# Toestand 4 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 10 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v. N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

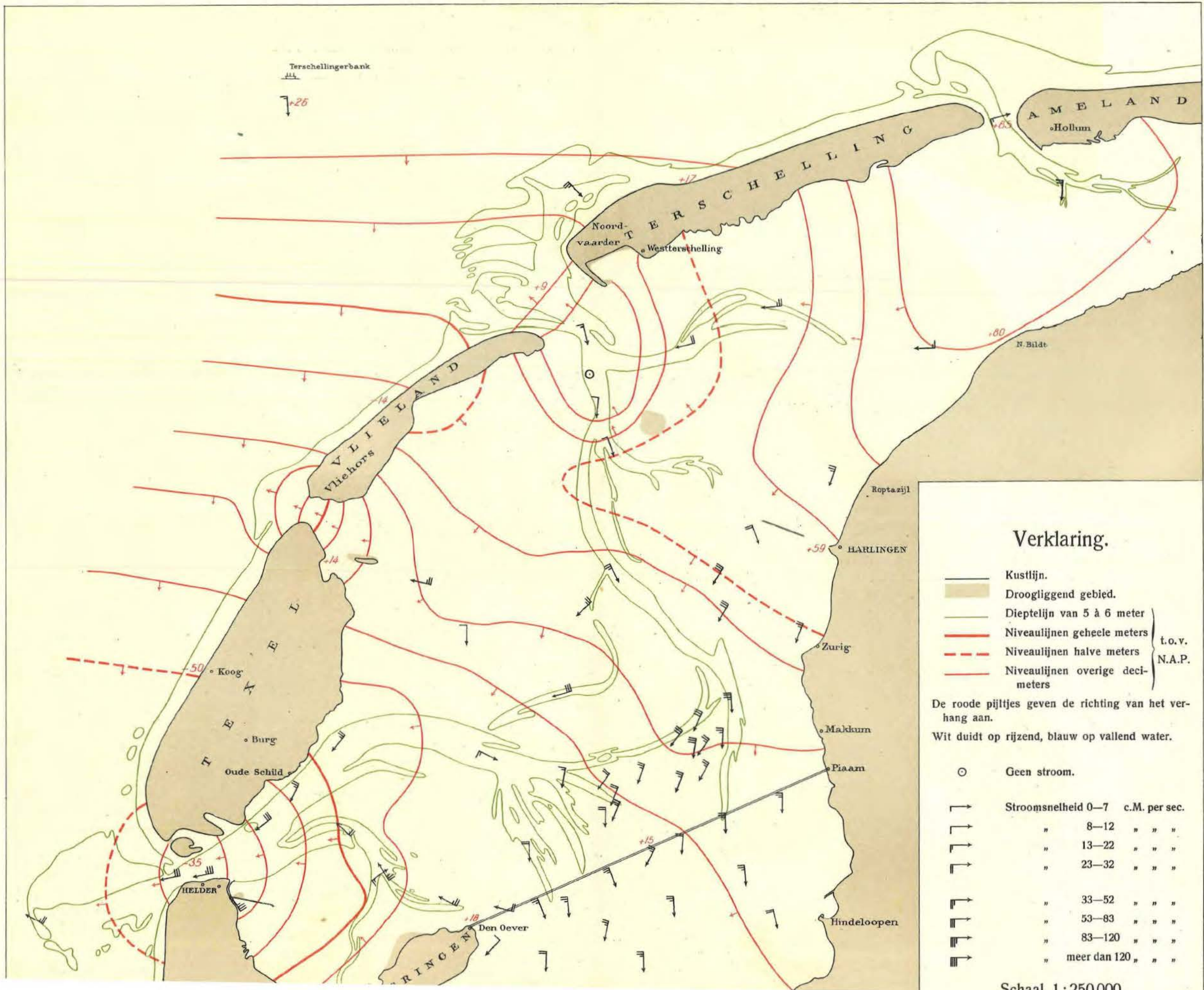
Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- Stroomsnelheid 0-7 c.M. per sec.
- " 8-12 " " "
- " 13-22 " " "
- " 23-32 " " "
- " 33-52 " " "
- " 53-83 " " "
- " 83-120 " " "
- " meer dan 120 " " "

Schaal 1 : 250 000.

# Toestand 3 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 11 uur voormiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v. N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

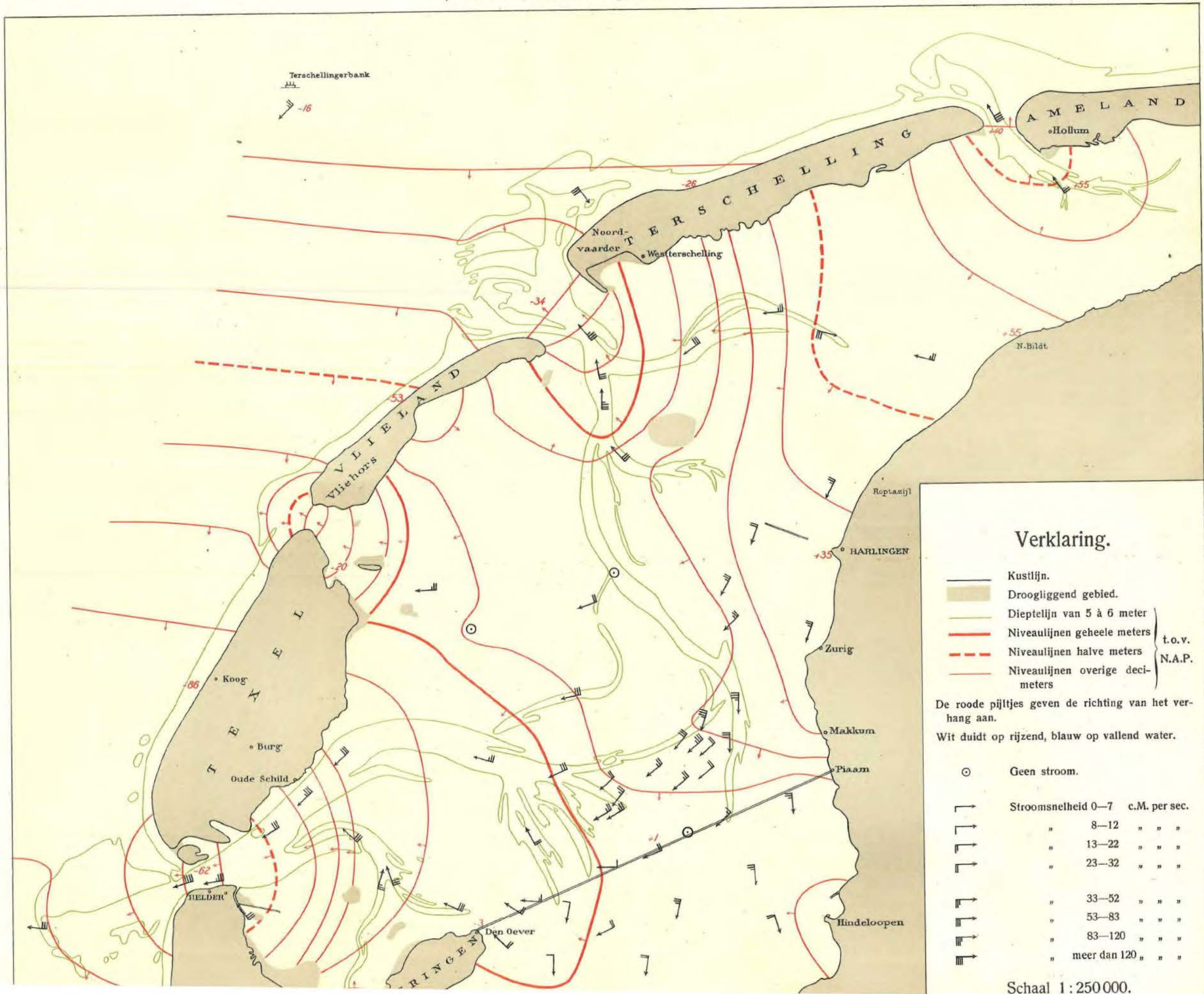
Wit duidt op ryzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- Stroomsnelheid 0-7 c.M. per sec.
- " 8-12 " " "
- " 13-22 " " "
- " 23-32 " " "
- " 33-52 " " "
- " 53-83 " " "
- " 83-120 " " "
- " meer dan 120 " " "

Schaal 1 : 250 000.

# Toestand 2 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 12 uur middag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v. N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

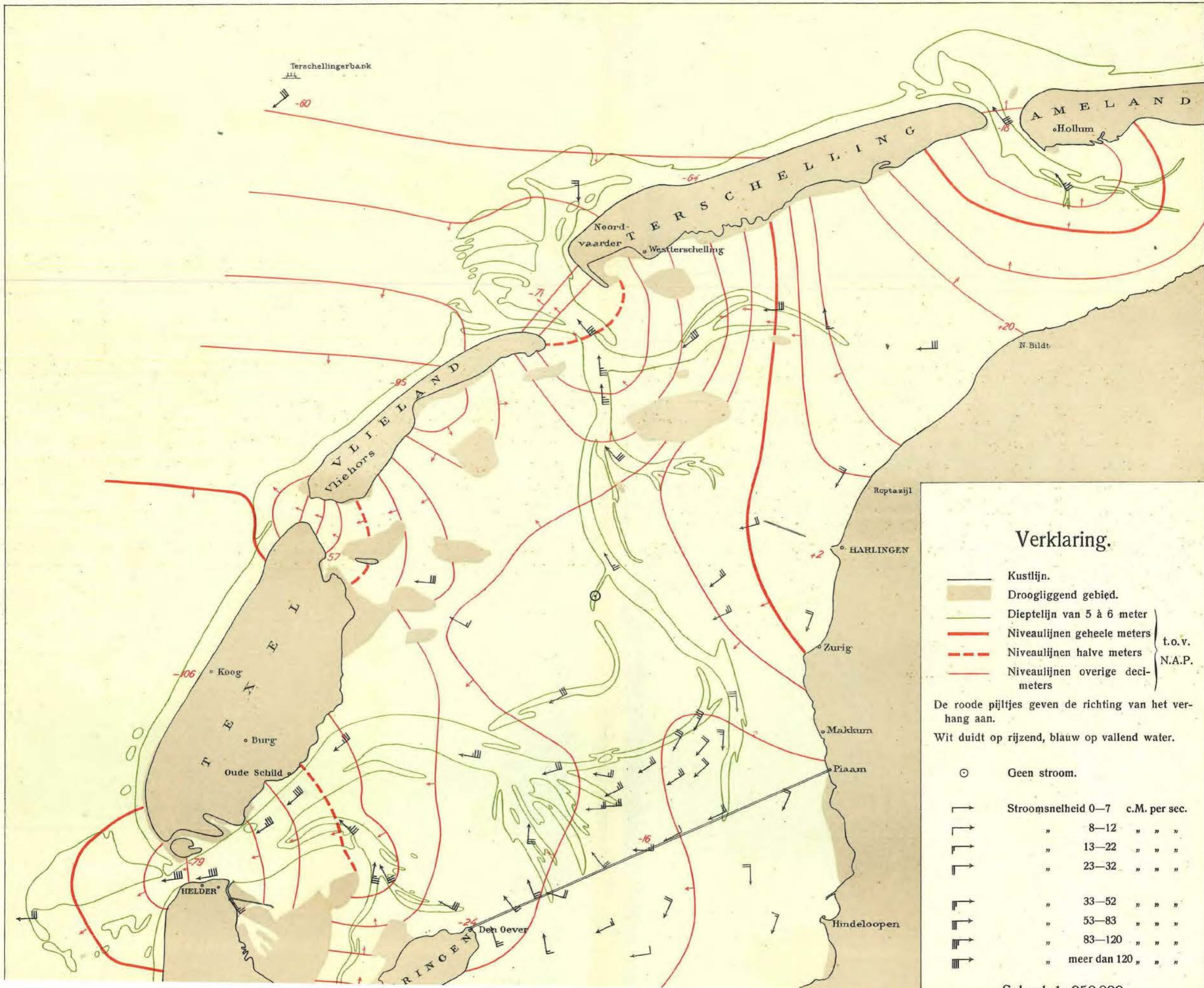
Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
|  | Geen stroom.                     |
|  | Stroomsnelheid 0-7 c.M. per sec. |
|  | " 8-12 " " "                     |
|  | " 13-22 " " "                    |
|  | " 23-32 " " "                    |
|  | " 33-52 " " "                    |
|  | " 53-83 " " "                    |
|  | " 83-120 " " "                   |
|  | " meer dan 120 " " "             |

Schaal 1:250 000.

# Toestand 1 uur voor maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 1 uur namiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - - - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

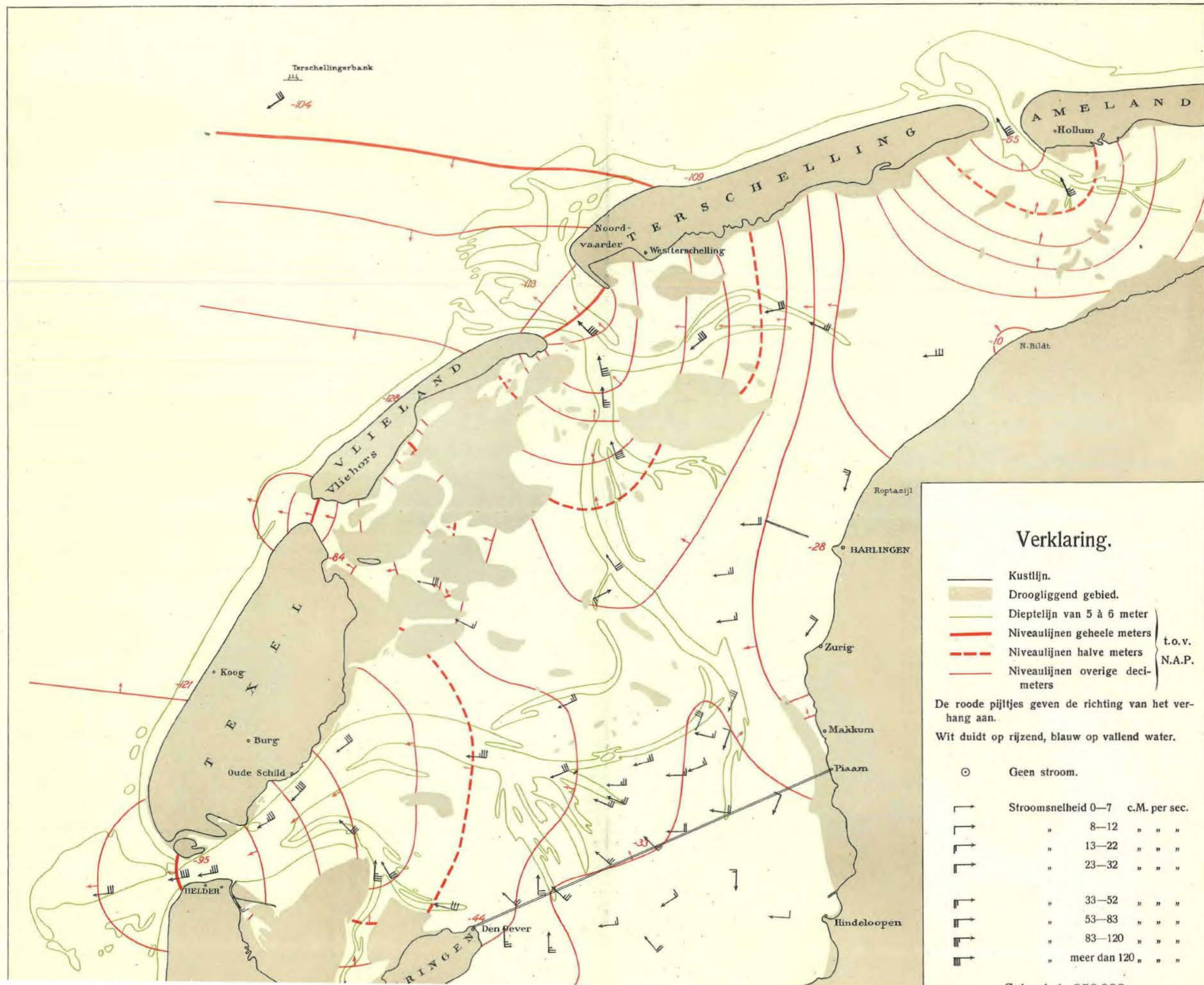
De rode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- | Stroomsnelheid | 0—7          | c.M. per sec. |
|----------------|--------------|---------------|
| ↗              | 8—12         | " " "         |
| ↘              | 13—22        | " " "         |
| ↖              | 23—32        | " " "         |
| ↙              | 33—52        | " " "         |
| ↗              | 53—83        | " " "         |
| ↘              | 83—120       | " " "         |
| ↖              | meer dan 120 | " " "         |

# Toestand bij maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 2 uur namiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - - - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v.  
} N.A.P.

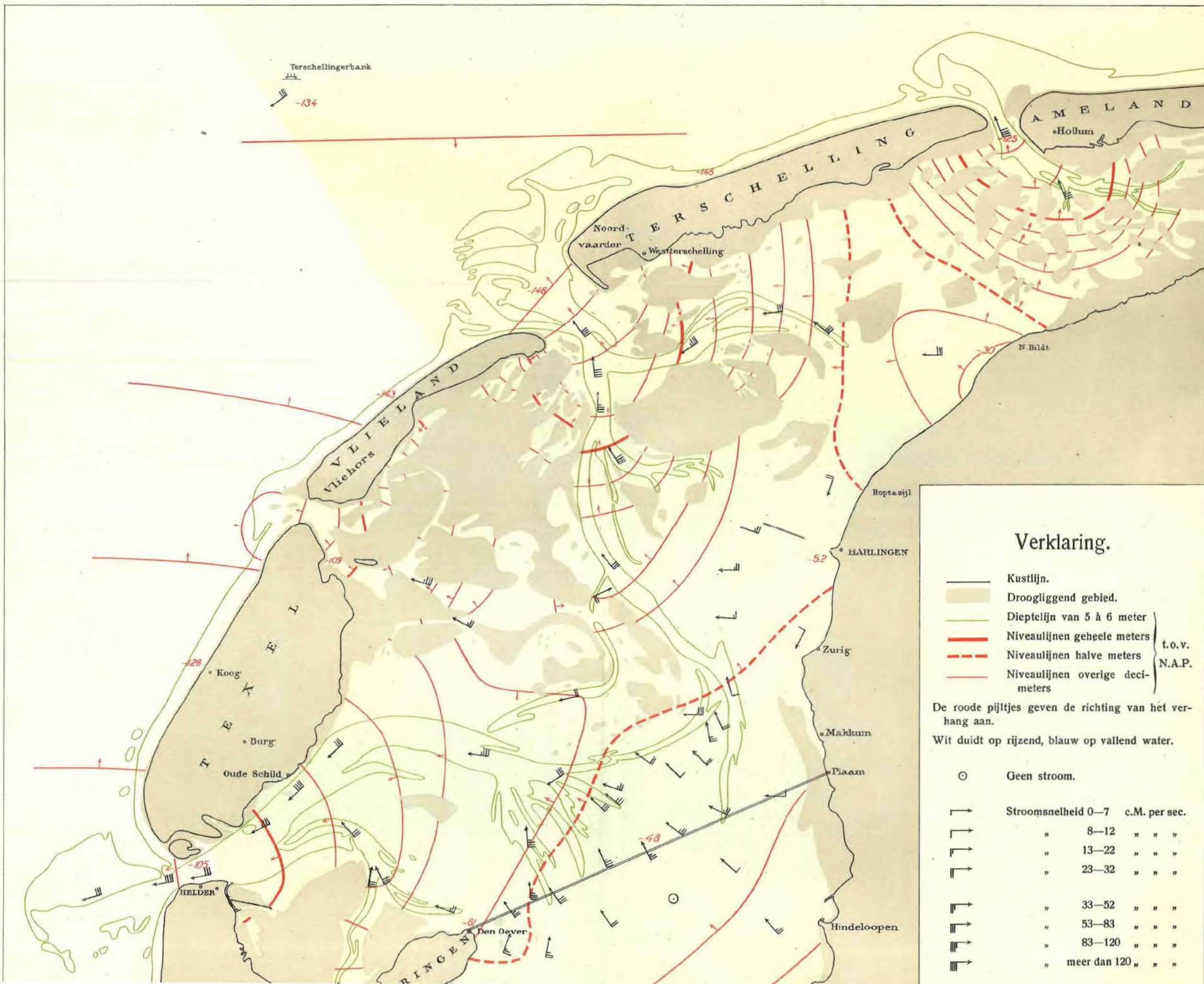
De rode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

|          |                                  |
|----------|----------------------------------|
| ○        | Geen stroom.                     |
| ↔        | Stroomsnelheid 0—7 c.M. per sec. |
| ↔↔       | " 8—12 " " "                     |
| ↔↔↔      | " 13—22 " " "                    |
| ↔↔↔↔     | " 23—32 " " "                    |
| ↔↔↔↔↔    | " 33—52 " " "                    |
| ↔↔↔↔↔↔   | " 53—83 " " "                    |
| ↔↔↔↔↔↔↔  | " 83—120 " " "                   |
| ↔↔↔↔↔↔↔↔ | " meer dan 120 " " "             |

# Toestand 1 uur na maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 3 uur namiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

- Kustlijn.
- Droogliggend gebied.
- Dieptelijn van 5 à 6 meter
- Niveaulijnen geheele meters } t.o.v.
- - - Niveaulijnen halve meters } N.A.P.
- Niveaulijnen overige decimeters

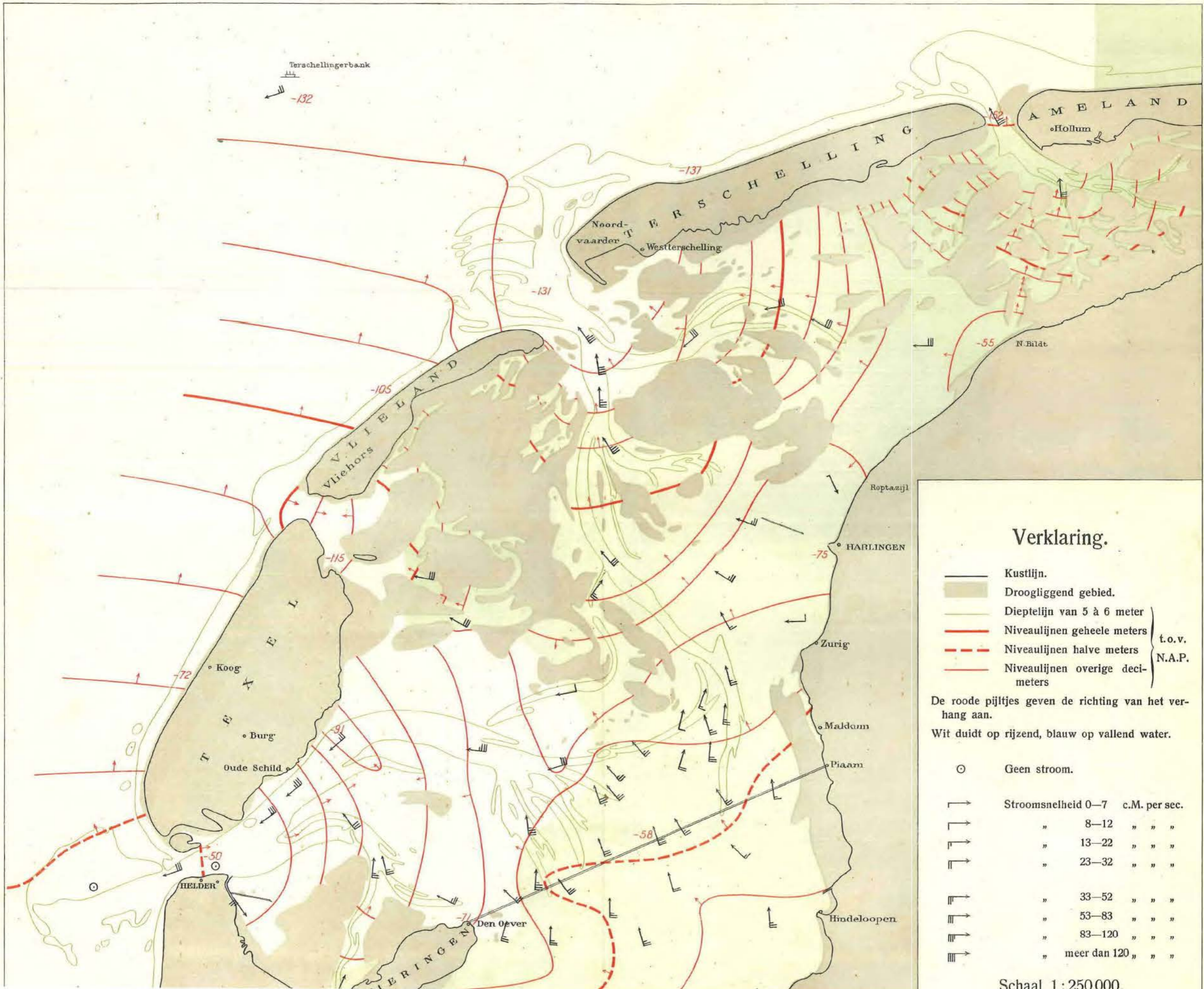
De roode pijtjes geven de richting van het verhang aan.

Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- Stromosnelheid 0—7 c.M. per sec.
- " 8—12 " " "
- " 13—22 " " "
- " 23—32 " " "
- " 33—52 " " "
- " 53—83 " " "
- " 83—120 " " "
- " meer dan 120 " " "

# Toestand 2 uur na maansdoorgang.

(31 Mei 1919, 4 uur namiddag, Amsterdamsche tijd.)



## Verklaring.

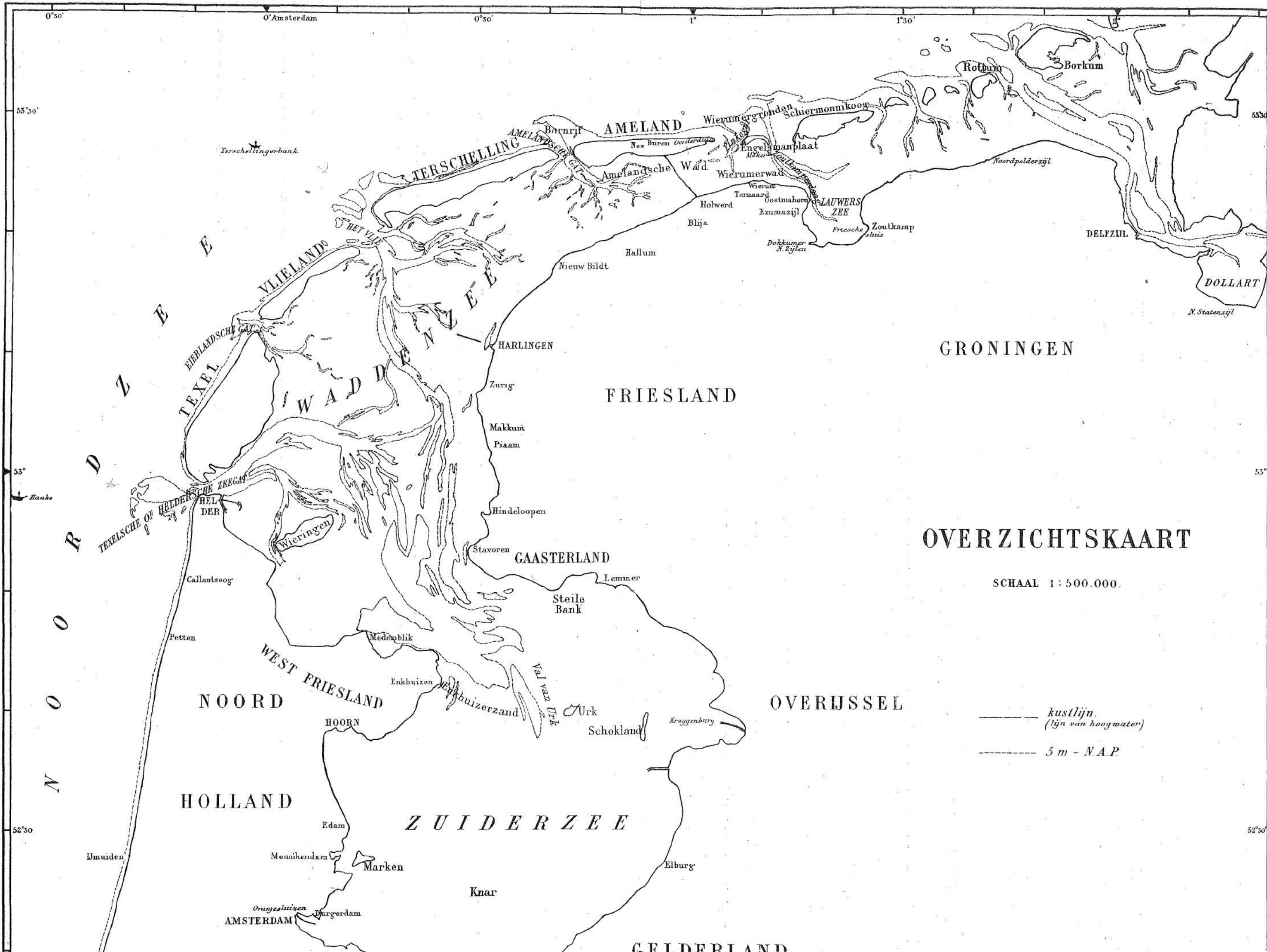
- Kustlijn.
  - Droogliggend gebied.
  - Dieptelijn van 5 à 6 meter
  - Niveaulijnen geheele meters
  - - - Niveaulijnen halve meters
  - Niveaulijnen overige decimeters
- } t.o.v. N.A.P.

De roode pijltjes geven de richting van het verhang aan.

Wit duidt op rijzend, blauw op vallend water.

- Geen stroom.
- ↗ Stroomsnelheid 0—7 c.M. per sec.
- ↘ " 8—12 " " "
- ↖ " 13—22 " " "
- ↙ " 23—32 " " "
- ↗ " 33—52 " " "
- ↘ " 53—83 " " "
- ↖ " 83—120 " " "
- ↙ " meer dan 120 " " "

Schaal 1:250 000.



# OVERZICHTSKAART

SCHAAL 1 : 500.000.

— kustlijn.  
(tjn van hoogwater)  
- - - 5 m - N.A.P.