

Studies naar het ontstaan van stormvloeden in Nederland

Een beknopt historisch overzicht tot 1980, met biografische aantekeningen

Inleiding

Het begrip 'stormvloed' is in ons land zo algemeen bekend dat het veel weg heeft van 'water naar de zee dragen' wanneer we proberen een Nederlander te vertellen wat een stormvloed is en hoe deze ontstaat. Schijn bedriegt ook hier. Als geen ander volk hebben wij Nederlanders weliswaar ervaren wat overstromingen zijn, maar welke rol de stormvloeden daarin spelen is velen niet echt duidelijk. Een overstroming kan het gevolg van allerlei factoren zijn, de stormvloed is er slechts één van. Toch worden stormvloeden en overstromingen dikwijls in één adem genoemd, net zoals de begrippen 'vuur en brand' of 'geluid en lawaai'. Voor een goed begrip is het nodig om oorzaak en gevolg te kunnen scheiden, dus: een overstroming kan veroorzaakt worden door een stormvloed, maar (gelukkig) heeft niet elke stormvloed een overstroming tot gevolg.

Wat is een stormvloed? Een stormvloed is een combinatie van een door het getij voortgebracht hoogwater met een door sterke wind veroorzaakte opwaaiing van het wateroppervlak. Stormvloeden komen voor langs de kust, met name daar waar de waterdiepte gering is en het uitgestrekte wateroppervlak aan langdurige sterke wind wordt blootgesteld. In ons land hebben stormvloeden zich het sterkst doen gelden in de riviermondingen en in de voormalige Zuiderzee.

Stormvloeden laten zich moeilijk voorspellen, ze laten zich lastig meten en beschrijven en, eenmaal historic geworden, is het moeilijk ze tot lering mee te laten tellen.

Uit oude berichten kennen we de datering van talloze overstromingen. Vele ervan zullen het gevolg geweest zijn van stormvloeden. Dat valt eerder op te maken uit de lokaties van de calamiteiten dan uit de deskundigheid van de geschiedschrijver in kwestie. Deze laatste immers werd meer geïmponeerd door de gevolgen die hij zag dan dat hij zich een goede voorstelling kon maken van de oorzaak van het verschijnsel. Bovendien was de oorzaak iets abstracts dat niet in woorden of beelden was uit te drukken. De gevolgen daarentegen waren concreet: ellende en ontreddering werden in alle toonaarden aan het papier toevertrouwd: dichters berijmden de gevolgen van een dijkbreuk alsof ze hoogstpersoonlijk in de bres waren gesprongen en tekenaars wisten nog eeuwen later de misère in beeld te brengen alsof deze zich voor hun eigen ogen voltrokken had. Resultaat hiervan is dat wij Nederlanders zeer veel literatuur geproduceerd hebben over de gevolgen van stormvloeden, maar de betrouwbaarheid van zulke informatie is dikwijls twijfelachtig. Men hoede zich voor foutieve interpretaties van de dikwijls sensationele aantekeningen. Een afrekening hiermee, tevens een zeer uitvoerige inventarisatie van literatuur over de in ons land plaatsgevonden overstromingen is het onvolprezen werk van M.K.E. Gottschalk.¹

Van heel andere aard is de literatuur over het ontstaan van stormvloeden als fysisch verschijnsel. Deze is van recenter datum en gebaseerd op een andere filosofie: wie niet de veronderstelling accepteert dat bovenmenselijke krachten een stormvloed laten ont-

J.D. van der Tuin

1

1 Maria Karoline Elisabeth Gottschalk; geboren te Mönchen-Gladbach op 28 oktober 1912 en overleden te Amsterdam op 14 september 1989. Na een loopbaan als onderwijzeres en lerares aardrijkskunde begon zij in 1949 haar studie sociale geografie in Utrecht waar ze in 1955 promoveerde op de historische geografie van westelijk Zeeuws-Vlaanderen. Sinds 1958 was zij als wetenschappelijk medewerker voor de historische geografie in Utrecht en sinds 1962 ook in Amsterdam werkzaam waar ze tot haar pensionering lector in de historische geografie was.

Afb. 1. Ramptafereel van een overstroming in Nederland.



staan die een overstroming tot gevolg kan hebben, tracht dit ontstaan op rationele gronden te verklaren. Eerst in de 19e eeuw werden, gesteund door waarnemingen, studies verricht naar de fysische factoren die als oorzaak van het verschijnsel 'stormvloed' kunnen worden aangemerkt. Dit nu is het onderwerp van dit artikel; maar eerst meer over het verschijnsel zoals dat sinds mensenheugenis werd ervaren door de bewoners van de lage landen aan zee.

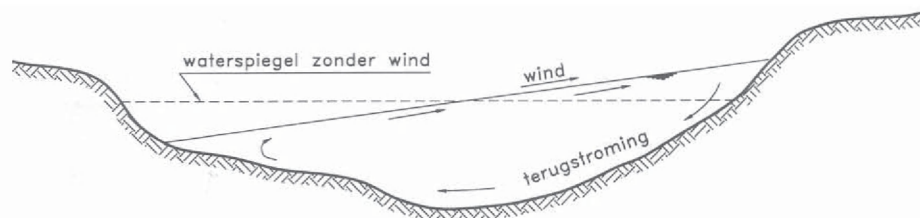
Opwaaiing en afwaaiing

Door de geringe diepte van de Nederlandse kust wateren blijkt de wind een relatief grote invloed te hebben op de waterstanden. Bij wat langer aanhoudende wind blijft het zeeoppervlak als gevolg van windwrijving niet horizontaal maar wordt het opgestuwd, een verschijnsel dat 'opwaaiing' wordt genoemd. Deze opwaaiing veroorzaakt tegenkrachten die een compenserende terugstroming over de zeebodem tot gevolg hebben zodanig en zo lang totdat er een evenwichtstoestand intreedt. Eén en ander is voor een doorsnede van een meer in afbeelding 2 weergegeven.

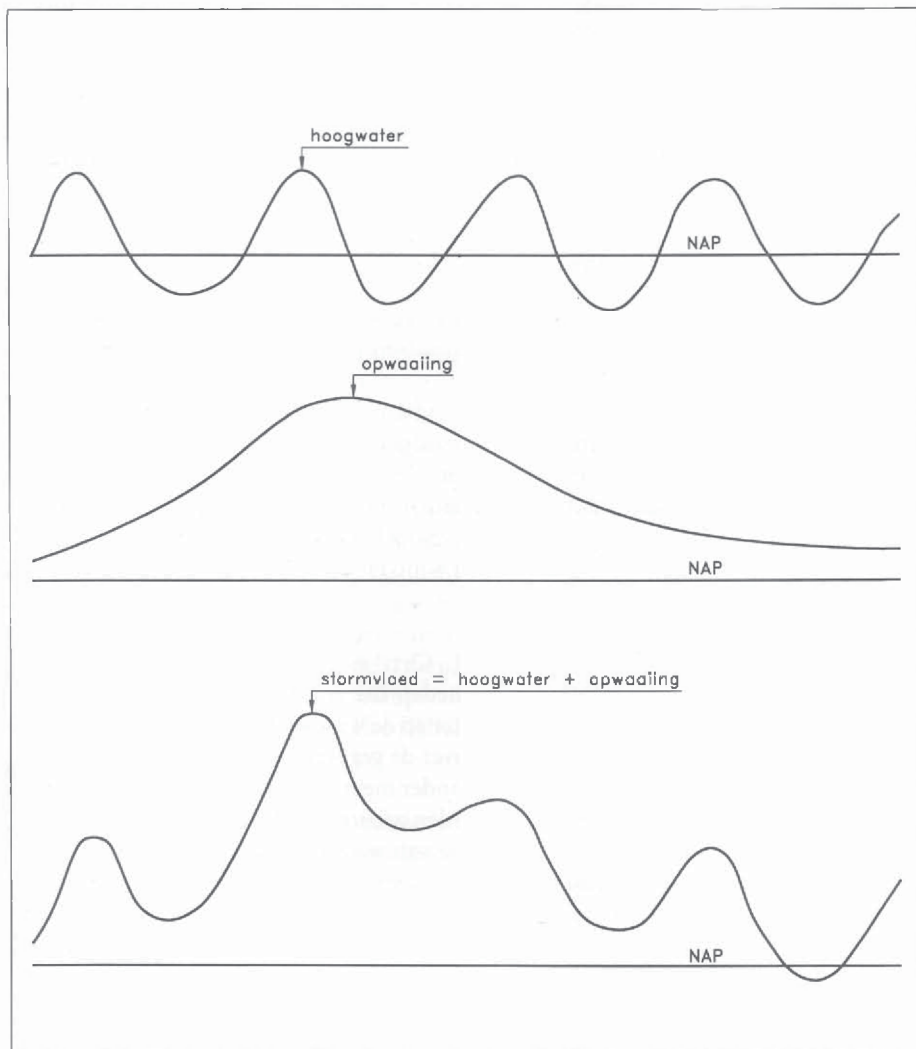
Aan de andere zijde van het water, aan de lijoeve, vindt het tegenovergestelde plaats: een door 'afwaaiing' sterk verlaagde waterstand met als gevolg onvoldoende vaardiepte voor de schepen die in dat geval stranden of zelfs op het droge komen te liggen.

In een voordracht op 26 april 1872 gehouden, in een vergadering van de Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam, presenteerde J.R.T. Ortt² resultaten van opwaaiingsmetingen verricht op diverse plaatsen langs de Nederlandse kust, op de voormalige Zuiderzee en het toen nog open IJ bij Amsterdam. Hij stelde vast dat de waterspiegel onder invloed van de wind een helling aanneemt die steiler is naarmate het water ondieper is. Bij zuidwestelijke wind mat hij een opmerkelijke verlaging op het IJ doordat de afwaaiing ter plaatse kennelijk niet gecompenseerd werd door het onderlangs terugstromen van water. Dit werd namelijk verhinderd door de ondiepte van het Pampus. Zo werd op 1 februari 1868 op het IJ een waterstand van slechts 2.63 m – A.P. gemeten!

2 Jonkheer Jacob Reinbout Theodoor Ortt; geboren te Amsterdam op 30 november 1817 en overleden te 's-Gravenhage op 16 juni 1887. Was hoofdinspecteur-titulaire van de Rijkswaterstaat.



Afb. 2. Doorsnede van een meer waarin opwaaiing en stroming als gevolg van wind zijn weergegeven.



Afb. 3. Drie diagrammen waarin de waterstand (vertikaal) is weergegeven als functie van de tijd (horizontaal): het getij, het windeffect en de sommatie van beide.

Hoe ontstaat een stormvloed?

De waterstanden in de Nederlandse kustwateren worden beheerst door een combinatie van zogenoemde astronomische en meteorologische factoren.

De astronomische factoren veroorzaken een min of meer regelmatige rijzing en daling van het wateroppervlak, de getijbeweging. Deze beweging kan, ook op langere termijn, goed voorspeld worden maar bij tijd en wijle op onregelmatige wijze worden verstoord door meteorologische factoren: wind en luchtdrukverschillen. Zoals we in de vorige paragraaf reeds vaststelden, kan vooral de wind aanzienlijke peilveranderingen veroorzaken, zowel in positieve als negatieve zin (opwaaiing respectievelijk afwaaiing). De combinatie van een door het getij ontstaan hoogwater met een door storm veroorzaakte opwaaiing wordt, wanneer het wateroppervlak boven een bepaald grenspeil³ stijgt, een stormvloed genoemd. Afbeelding 3 geeft het waterstandsverloop tijdens stormvloed weer als sommatie van getij en opwaaiing. Valt een stormvloed samen met een springtij, dan noemt men het resulterend hoogwater een springvloed.

³ Het grenspeil is de waterstand die, statistisch bepaald, eenmaal in de twee jaar wordt bereikt.



Afb. 4. Voorkant van de 100ste uitgave van de Getijtafels voor Nederland. ©1995 Sdu Uitgeverij-Den Haag

Eerste analyses van stormvloedwaarnemingen

Het was E. Engelenburg die als eerste de invloed van het getij elimineerde bij zijn analyse van stormvloedwaarnemingen over de jaren 1887 en 1888 te Vlissingen. Reeds sinds 1833 bevond zich hier een peilmeetstation waar de waterstanden op een peilschaal werden afgelezen. Hij bepaalde van de dagelijks gemeten hoog- en laagwaterstanden de gemiddelde waarden, zogenaamde halftijwaarden. Zijn veronderstelling hield in dat afwijkingen ten opzichte van deze halftijwaarden veroorzaakt werden door wind en luchtdruk. Daarom correleerde hij elke berekende halftijwaarde met de dagelijks gemeten windsnelheid, windrichting en barometerstand. Naast het verband dat hij vond tussen windsnelheid en opwaaiing berekende hij een waterstandsverschil van 6 mm voor elk luchtdrukverschil van een mm kwikkolom bij oostenwind en zelfs 8 mm bij westenwind. De onderzoeken door Engelenburg hadden eerder een verklarend dan een voorspellend doel.

Getijtafels als hulpmiddel

Eerst in 1895 begon de Algemene Dienst van de Rijkswaterstaat met de jaarlijkse uitgave van getijtafels. Deze geven voor diverse plaatsen langs de kust de door berekening voorspelde waarden en tijdstippen van hoog- en laagwater, gebaseerd op de stand van de voornaamste getijverwekkende hemellichamen, namelijk de maan en de zon. Dergelijke getijtafels worden nog steeds elk jaar uitgegeven, sinds kort ook onder de titel Getij-Generator op floppy voor gebruik met de PC.

Deze getijgegevens zijn dus uitsluitend op astronomische en niet op meteorologische factoren gebaseerd. Daardoor bieden ze de mogelijkheid om, door vergelijking met waargenomen waterstanden, de invloed van wind en luchtdruk snel en eenvoudig vast te stellen.

Het is de verdienste van de Nederlander F.L. Ortt⁴ in 1897 zeer waardevolle gegevens te hebben gepubliceerd over de wetmatigheden die er bestaan tussen de opwaaiing enerzijds en de afmetingen van een open water en de windsnelheid anderzijds. In tegenstelling tot Engelenburg beschikte hij wel over de gegevens van de getijtafels. In plaats van met halftijwaarden te rekenen kon hij zonder meer de waargenomen en voorspelde waterstanden vergelijken: de verschillen werden gecorreleerd met windsnelheid, windrichting en barometerstand. Uit zijn analyse van waarnemingen, gedaan te IJmuiden en Hoek van Holland, concludeerde hij dat er geen verschil is tussen de opwaaiing bij eb of bij vloed. Dit betekent dat een peilverhoging als gevolg van opwaaiing zonder meer opgeteld mag worden bij elke stand van het getij. Verder stelde hij vast dat de wind een zekere tijd nodig heeft om de maximale opwaaiing te doen ontstaan. In zijn onderzoek vond Ortt voor dit tijdsinterval circa 6 uur. Het zal niemand verbazen dat ook de windrichting van belang is; de windinvloed is het grootst in de windrichting en nihil in de richting loodrecht daarop. Tenslotte vond Ortt een kwadratisch verband tussen opwaaiing en windsnelheid, met andere woorden: een tweemaal zo grote windsnelheid heeft een viermaal zo hoge opwaaiing tot gevolg.

Onderzoek na de stormvloed van 1916

In 1916 had op 13 en 14 januari een zware stormvloed grote overstromingen veroorzaakt met name langs de kusten van de voormalige Zuiderzee. Bij de plannen tot afsluiting van de Zuiderzee rees dan ook terecht de belangrijke vraag welke invloed een dergelijke afsluiting zou hebben op toekomstige stormvloeden langs de Friese en Groningse kust.

Het was P.H. Gallé⁵ die in 1917 de resultaten van een belangrijk onderzoek hierover publiceerde als rapport van de Zuiderzeevereniging. Hij ging voor 42 stormperiodes uit het nabije verleden na hoe de gemiddelde luchtdrukverdeling was boven de oceaan in de omgeving van Groot-Brittannië en IJsland twee dagen en één dag vóór de stormdag en op de stormdag zelf. Hij bewerkstelligde een volledige eliminatie van het getij

4 Jonkheer Felix Louis Ortt; geboren in Groningen op 6 juni 1866 als zesde kind van J.R.T. Ortt, overleden te Soest op 15 oktober 1959. Studeerde van 1883 tot 1887 aan de Polytechnische School te Delft. Was van 1888 tot 1899 ingenieur bij de Algemene Dienst van de Rijkswaterstaat; zijn voornaamste taak was het berekenen van getijtafels. In 1899 brachten zijn levensbeschouwelijke principes hem in conflict met de taakopvatting binnen zijn werkring en werd hij daarna als Felix Ortt voorman van idealistische bewegingen, redacteur van humanitaire tijdschriften, filosoof en auteur (van onder meer een kinderbijbel).

5 P.H. Gallé; geboren op 18 juni 1873 en overleden op 9 mei 1934. Was van 1906 tot 1919 adjunct-directeur van het KNMI te De Bilt en van 1919 tot aan zijn dood directeur van de filiaalrichting te Amsterdam. Legde grote werkzaamheid aan de dag in de weerdienst en de stormwaarschuwingsdienst. Publiceerde over cyclonen en de invloed van het weer op de scheepvaart in oceanen en tropische zeeën. Hij werd op 4 juli 1918 benoemd als lid, later als secretaris van de Staatscommissie Zuiderzee. Mede voor het in die functie verrichte werk werd hem in 1932 door ZKH prins Hendrik de grote gouden De Ruyter-medaille uitgereikt.

voor elk uur van de dag door toepassing van harmonische analyse van het getij. Het bleek dat door het naderende windveld dat bij deze luchtdrukverdelingen behoorde, ook vóór de stormdag het zeewater reeds naar de Noordzee werd gestuwd; het zogenoemde 'verwijderde effect'. In overeenstemming daarmee werd dan ook reeds vóór de stormdag gemiddeld een bepaalde opzet gevonden die niet verklaard kon worden uit de invloed van de lokale wind alleen. Ter illustratie hiervan berekende hij voor de periode van 1 t/m 12 januari 1916 (de 12 dagen voorafgaand aan de eigenlijke stormvloed), in welke periode er voortdurend buigig stormachtig weer uit zuidwestelijke en westelijke richting was, een gemiddelde waterstand te Elburg, Kraggenburg en Schokland van maar liefst 0.71 m boven NAP. Tevens stelde hij vast dat het getij zich bij dergelijke hogere waterstanden sneller voortplant waardoor ook de tijden van hoog- en laagwater vervroegd worden.

Naar aanleiding van dezelfde stormvloed in 1916 bracht een daartoe ingestelde commissie in 1920 rapport uit van een grondig onderzoek naar de voortplanting van stormvloeden op de Rotterdamse Waterweg. Hiervoor waren de gegevens van honderd verschillende dagen tussen 1887 en 1917 geanalyseerd waaruit 2562 hoge waterstanden konden worden gerelateerd aan de windsnelheid en windrichting, daarbij luchtdruk en verwijderd effect buiten beschouwing te hebben gelaten.

De resultaten van laatstgenoemde studie werden naderhand gebruikt door E. van Everdingen⁶ bij de opzet van een stormvloedwaarschuwingdienst. Reeds in 1913 werd aan het KNMI en de Algemene Dienst van de Rijkswaterstaat opdracht verleend tot het ontwerpen van een stormvloedwaarschuwingdienst. Na jarenlange proefnemingen en regelmatige bijstelling van de instructie voor stormvloedwaarschuwing werd de stormvloedwaarschuwingdienst als instituut bij ministeriële beschikking pas op 22 september 1938 ingesteld. De leiding ervan was in handen van P.J. Wemelsfelder⁷ die in 1939 een voor die tijd bijzondere publicatie over een logaritmische frequentieverdeling van stormvloeden het licht deed zien. Reorganisatie en een andere werkwijze van de dienst volgden na de februari-ramp van 1953. De dienst behoort tegenwoordig tot het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) van Rijkswaterstaat en is dus als vanouds gevestigd in 's-Gravenhage.

Op 4 juli 1918 werd de Staatscommissie Zuiderzee ingesteld, onder voorzitterschap van H. A. Lorentz.⁸ Doel was de gevolgen vast te stellen van de afsluiting van de Zuiderzee voor de waterstaatkundige toestand van het Waddengebied en voor de dijken van de aangrenzende provincies. De ingewikkelde waterbeweging vereiste een mathematisch-fysische behandeling waarbij Lorentz zowel voor de getijbeweging als voor het stormvloedverschijnsel een effectieve berekeningsmethode ontwikkelde. Het gehele gebied van Zuiderzee en Waddenzee werd daarbij geschematiseerd tot een netwerk van geulen en knooppunten. In dit verband moet zeker ook het werk vermeld worden van C.W. Lely⁹ die in 1921 promoveerde op het onderzoek naar de invloed van de afsluiting op de stormvloedstanden langs de Friese kust. Bijzondere inbreng bij het rekenwerk had ook J.Th. Thijsse¹⁰ die in 1919 als tweede secretaris aan de Staatscommissie was toegevoegd en verantwoordelijk was voor de invoer van de meetgegevens. De bevindingen van de Staatscommissie werden in 1926 gerapporteerd. Metingen verricht na de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 bleken in goede overeenstemming te zijn met genoemde berekeningen.

Berekening van opwaaiing en stormvloeden

In 1935 besteedde het Internationaal Scheepvaartcongres speciale aandacht aan de factoren die de waterstanden op lange kanaalpanen beïnvloedden. De Nederlandse expertise op dit gebied werd gerapporteerd door J.Th. Thijsse die de formule presenteerde waarmee de opwaaiing kan worden berekend uit windsnelheid, windrichting, waterdiepte en strijklengte.¹¹ Gebaseerd op de eerder beschreven studies, werd deze praktische formule door waterloopkundigen dankbaar gebruikt en zelfs bekend als 'de formule van Thijsse'.

6 Ewoud van Everdingen; geboren te Delft op 26 februari 1873 en overleden te Amersfoort op 19 juli 1955. Studeerde vanaf 1891 wis- en natuurkunde te Leiden en promoveerde daar in 1897 op 'Metingen over het verschijnsel van Hall en de toename van den weerstand in het magnetisch veld'. Was van 1900 tot 1908 privaat-docent natuurkunde, van 1905 tot 1938 hoofd-directeur van het KNMI en van 1910 tot 1946 buitengewoon hoogleraar in de meteorologie, klimatologie en oceanografie te Utrecht.

7 Pieter Jacobus Wemelsfelder; geboren te Goes op 18 november 1907 en overleden te Almen op 1 juli 1995. Studeerde in 1930 af aan de TH te Delft als civiel-ingenieur en kwam in dienst van het Waterloopkundig Laboratorium te Delft. In 1934 trad hij in dienst van Rijkswaterstaat en was tot 1972 hoofd van de Hydrometrische Afdeling van de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging. Hij was het die in 1939 de relatie tussen extreme waterstanden en hun kans van voorkomen aanschouwelijk maakte. De ontwikkeling van methoden en instrumenten voor het meten van waterstanden, golven en getijden is één van zijn grootste verdiensten voor ons land. 'Niet tot weten zonder meten' en 'één waarneming is geen waarneming' zijn bekende, van hem afkomstige zinspreuken.

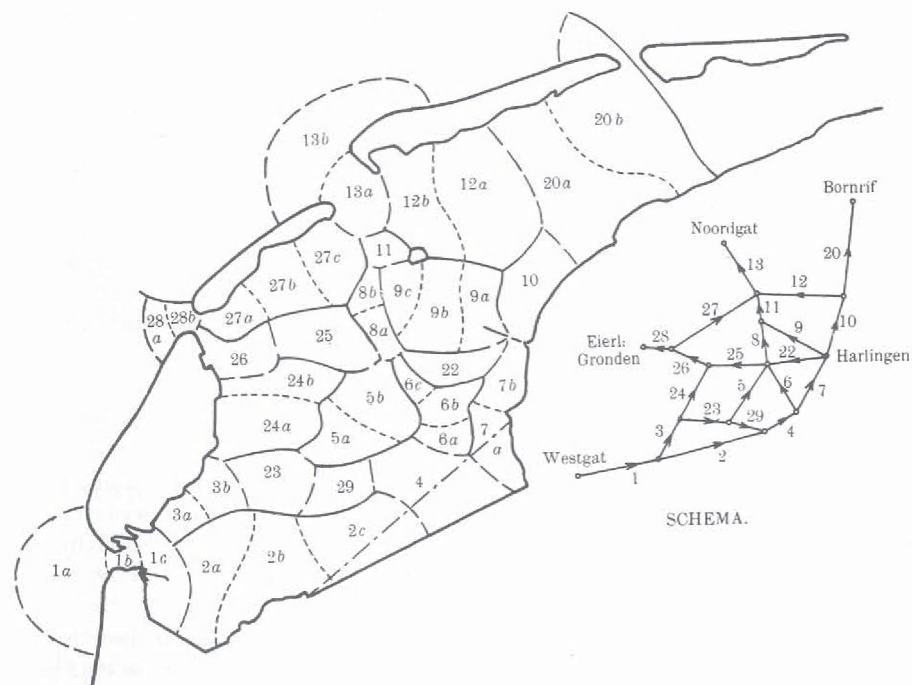
8 Hendrik Antoon Lorentz; geboren te Amsterdam op 18 juli 1853 en overleden te Haarlem op 4 februari 1928. Studeerde wis- en natuurkunde te Leiden en promoveerde er in 1875 op de terugkaatsing en breking van licht. Werd in 1877 hoogleraar in de theoretische natuurkunde te Leiden welke functie hij in 1912 neerlegde na zijn benoeming tot curator van het Teyler's Laboratorium te Haarlem. In 1902 werd hem, samen met Zeeman, de Nobelprijs voor natuurkunde toegekend. Van 1918 tot 1926 was hij voorzitter van de Staatscommissie Zuiderzee, ook bekend als de Commissie Lorentz.

9 Cornelis Willem Lely; geboren te Deventer op 9 juni 1885 als zoon van de bekende Cornelis Lely en overleden te Aintree (GB) op 8 april 1932. Studeerde af aan de TH te Delft als civiel ingenieur, trad in dienst van Rijkswaterstaat en promoveerde in 1921 op de invloed van de Zuiderzee op de stormvloedstanden langs de Friese kust. Grootste bekendheid verwierf hij echter in 1926 als ontwerper van de plannen ter verbetering van de Maas; de uitvoering ervan heeft hij wegens zijn vroegtijdig overlijden echter niet mogen meemaken.

10 Johannes Theodoor Thijsse; geboren te Amsterdam op 11 april 1893 als zoon van de bekende bioloog Dr. Jac. P. Thijsse en overleden te Lisse op 30 april 1984. Studeerde in 1917 cum laude af als civiel ingenieur aan de TH te Delft. In 1919 werd hij tijdelijk aangesteld als ingenieur bij de Staatscommissie Zuiderzee, verantwoordelijk voor de invoer van meetgegevens in de berekeningen die onder leiding van Prof. Dr. H. A. Lorentz werden uitgevoerd en waarvoor hij in 1927 werd onderscheiden. Van 1920 tot 1958 was hij werkzaam bij de Dienst der Zuiderzeewerken, laatstelijk als hoofd-ingenieur-directeur welke functie hij van 1927 tot 1960 combineerde met die van directeur van het Waterloopkundig Laboratorium. In 1938 werd hij benoemd tot buitengewoon hoogleraar en in 1946 tot gewoon hoogleraar in de theoretische en experimentele hydraulica aan de TH te Delft. Hij vervulde dit hoogleraarschap tot aan zijn pensionering in 1963.

11 Strijklengte: afstand in de windrichting waarover watergolven door de wind worden opgewekt.

Afb. 5. Schematisatie van het westelijk Waddengebied voor de berekening van getijden en stormvloed door de Staatscommissie Zuiderzee.



12 Jo Johannis Dronkers; geboren te Poortvliet op 24 mei 1910 en overleden te 's-Gravenhage op 20 februari 1973. Studeerde van 1928 tot 1934 wis- en natuurkunde te Leiden en trad hierna in dienst van Rijkswaterstaat bij de Studiedienst Benedenrivieren onder leiding van dr. ir. Johan van Veen. In 1939 promoveerde hij aan de Universiteit te Leiden op 'stratificeerbare congruenties', een puur wiskundig onderwerp. Hij was van 1949 tot 1963 werkzaam bij de Centrale Studiedienst (na 1959: Directie Waterhuishouding en Waterbeweging) onder leiding van ir. J.B. Schijf. Hij had als hoofdwiskundige een belangrijk aandeel in de voorstudies voor het Deltaplan. Sinds 1963 was hij hoofd van de Waterloopkundige Afdeling van de Dieldienst. In 1965 ontving hij van het K.I.V.I. de Conrad-medaille voor zijn bekende boek 'Tidal Computations'.

13 Jannis Pieter Mazure; geboren te Rotterdam op 24 december 1899 en overleden te 's-Gravenhage op 3 november 1990. Studeerde in 1923 af als civiel ingenieur aan de TH te Delft. Verrichtte zeer veel 'langwijdig' rekenwerk voor de Staatscommissie Zuiderzee. Promoveerde in 1937 op de berekening van getijden en stormvloed op benedenrivieren (waaronder met name de Biesbosch). Was van 1923 tot 1950 werkzaam bij de Dienst der Zuiderzeewerken en was van 1950 tot 1964 hoogleraar in de toegepaste mechanica aan de TH te Delft.

14 Willem Frederik Schalkwijk; geboren te Amsterdam op 22 april 1913 en overleden te Eindhoven op 4 februari 1989. Studeerde in 1940 af in de wis- en natuurkunde aan de VU te Amsterdam en was tot 1947 als wetenschappelijk medewerker werkzaam bij het KNMI te De Bilt. Promoveerde in 1947 aan de RU te Utrecht op het onderzoek naar stormvloed langs de Nederlandse kust. Was van 1947 tot 1973 werkzaam als hoofdfysicus bij N.V. Philips te Eindhoven en was van 1969 tot 1983 als buitengewoon hoogleraar verbonden aan de Economische Faculteit van de VU te Amsterdam.

15 Johan Christoph Schönfeld; geboren te Vlissingen op 5 juni 1918. Studeerde in 1943 af als natuurkundig ingenieur bij Prof. ir. J.Th. Thijssse aan de TH te Delft op een afstudeeronderzoek over getijden. Werkte van 1943 tot 1948 bij de Octrooiraad. Daarna trad hij in dienst van Rijkswaterstaat bij de Centrale Studiedienst onder leiding van ir. J.B. Schijf. In 1951 promoveerde hij aan de TH te Delft op de voortplanting van getijden en soortgelijke golven. Naast hydrodynamisch onderzoek, onder meer van turbulentie en diffusie in zee, had hij een werkzaam aandeel in de toepassing van de analoge rekentechniek en automatisering van rekenwerk en metingen. Hij werd in 1965 benoemd tot buitengewoon en in 1969 tot gewoon hoogleraar in de Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde van de TH te Delft.

16 Johan van Veen; geboren te Uithuizermeeden op 21 december 1893 en overleden te Voorburg op 9 december 1959. Studeerde

In 1935 vond J.J. Dronkers¹² met zijn zogenaamde 'exacte methode' een oplossing voor het probleem veroorzaakt door de invloed van de bovenafvoer op de berekening van de getijbeweging op benedenrivieren.

Toepassing van de tot dusver vergaarde kennis over het ontstaan van stormvloed en de voortplanting van getijden op benedenrivieren resulteerde in 1937 in een proefschrift van J.P. Mazure.¹³ In feite borduurde hij voort op de door Lorentz ontwikkelde methode, maar dan speciaal toegepast op benedenrivieren.

Aan de verdere uitdieping van de theorie werd in belangrijke mate bijgedragen door W.F. Schalkwijk.¹⁴ In zijn proefschrift (1947) geeft hij een gedegen historisch overzicht van vroegere studies, zowel in binnen- als buitenland uitgevoerd en gaat uitvoerig in op het 'verwijderde effect'. Hij verdeelde de Noordzee in twee vakken en bepaalde met behulp van gemeten waterstanden te Hoek van Holland de variatie van deze waterstanden in afhankelijkheid van windrichting en windsnelheid in deze twee vakken en in een vak dat het Kanaal omvatte. Indien de variaties van de waterspiegel in afhankelijkheid van de wind in de drie vakken eenmaal bekend waren, kon met behulp van een voorspeld windveld op de Noordzee en in het Kanaal ook de waterstand te Hoek van Holland voorspeld worden.

Een belangrijke bijdrage aan de kennis van de voortplanting van getijden en andere lange golven werd in 1951 gepresenteerd in het proefschrift van J.C. Schönfeld¹⁵, met name wat daarin de toepassing van de methode der karakteristieken betreft.

Ontwikkeling van het getij-analogon

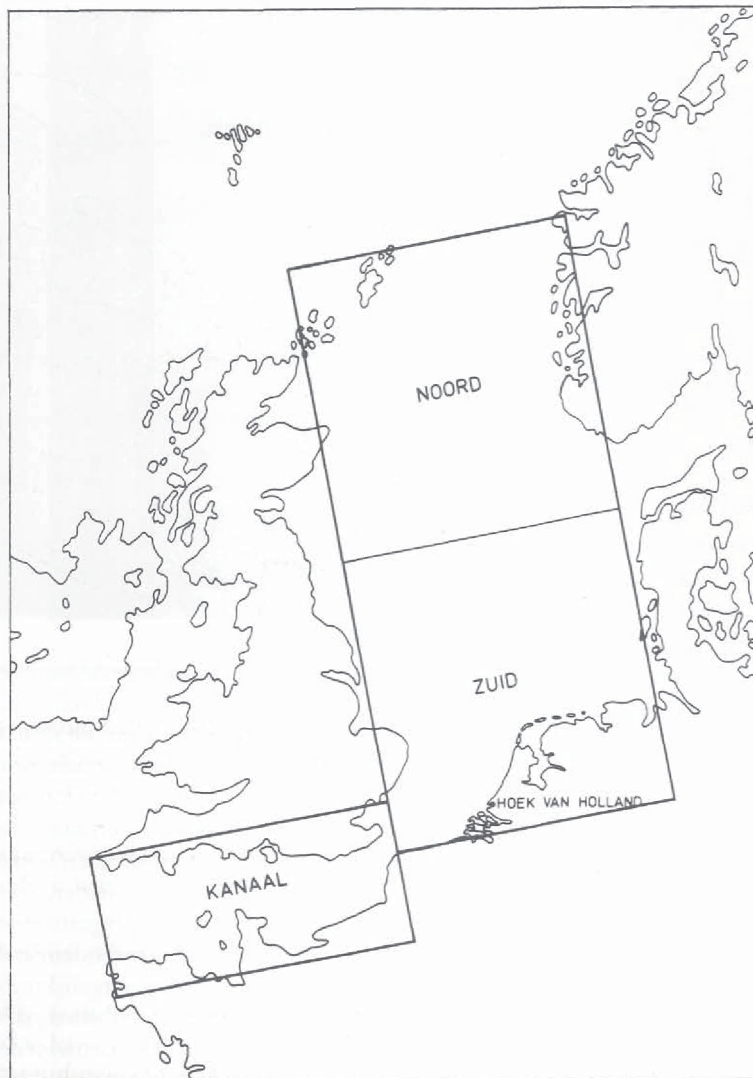
Reeds tijdens de Zuiderzee-studie constateerde Lorentz dat, bij benadering, de vergelijking voor de voortplanting van een getijgolf in een geul door hetzelfde formalisme wordt beschreven als de vergelijking voor de voortplanting van een signaalgolf in een telecommat. Echter, voor toepassing van die analogie was destijds nog geen techniek voorhanden.

In een artikel in De Ingenieur van 1937 heeft J. van Veen¹⁶ een analogie beschouwd tussen getijstromen en elektrische stromen. Daarop heeft J.M. Burgers, in hetzelfde jaar en tijdschrift, een essentieel commentaar gegeven. Van Veens opvatting van de analogie was principieel ontoereikend doordat zijn vergelijking van een getijdenetwerk met een elektrisch netwerk gebaseerd was alleen op de bewegingsvergelijking. De

continuïteitsvergelijking¹⁷ had hij buiten beschouwing gelaten en de analogie van de waterberging met de elektrische capaciteit over het hoofd gezien.

Echter, het idee van een elektrische analogie heeft Van Veen niet losgelaten. In de veertiger jaren was het technisch mogelijk om het voortplantingssysteem van de getijgolf analoog-elektrisch te simuleren. Daarvan gebruik makende heeft H.J. Stroband¹⁸ een elektrisch analoog voor een getijdenetwerk ontwikkeld. Met deze 'voorloper van de computer' werd dus voortgeborduurd op het principe waarbij een getijgebied wordt geschematiseerd tot een netwerk van geulen en knooppunten. Ging het eerder om Zuiderzee en Waddenzee, nu betrof het de wateren van het Nederlandse Deltagebied. Hiermee was een belangrijke stap gezet in de aanpak van een complex rekenprobleem. Het analoog kreeg de vorm van een aaneenschakeling van elektronisch-gevarieerde elementen voor capaciteit, zelfinductie en weerstand. Begin 1953 was het analoog gereed voor een deel van het Nederlandse Deltagebied. Na de stormvloed van 1953 werd besloten dit analoog uit te breiden tot het gehele Deltagebied, waarbij men de gebleken beperkingen in nauwkeurigheid en in reproduceerbaarheid heeft geaccepteerd.

Te zelfder tijd werd besloten om bij de Centrale Studiedienst een analoog-rekenmachine te ontwikkelen die zou moeten voldoen aan hogere eisen van nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid. Deze machine, Deltar genaamd, werd ontwikkeld door C.J.D.M. Verhagen met theoretische ondersteuning door J.C. Schönfeld. De Deltar is van 1961 tot 1982 in gebruik geweest.



Afb. 6. Vakindeling voor de berekening van stormvloedstanden te Hoek van Holland volgens de methode van Schalkwijk.

Onderzoek na de stormvloed van 1953

Zoals eerder de stormvloed van 1916 de afsluiting van de Zuiderzee belangrijk had bespoedigd, gaf ook de stormvloed van 1953 een doorslaggevende stoot tot de afsluiting van de zeegaten in het zuidwesten van Nederland, de Deltawerken. Zulke omvangrijke afsluitingswerken kunnen niet verantwoord worden voorbereid zonder een goed inzicht in het ontstaan en de voortplanting van stormvloed en vormen derhalve een sterke stimulans voor het onderzoek.

Op 21 februari 1953 werd de Deltacommissie ingesteld onder voorzitterschap van A.G. Maris, destijds directeur-generaal van Rijkswaterstaat. Doel was te onderzoeken welke waterstaatstechnische voorzieningen in de getroffen gebieden nodig waren en of daarbij ook de afsluiting van de zeearmen wenselijk zou zijn.

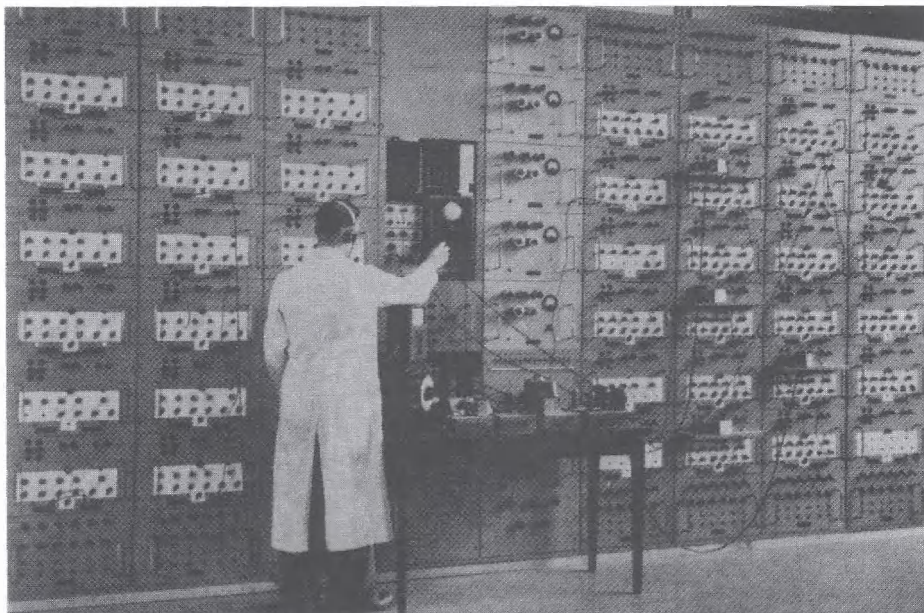
Het Rapport Deltacommissie verscheen in 1961 en bevat, in de delen 2, 3 en 4, uitvoerige beschouwingen over stormvloed en getijbeweging waaronder bijdragen van eerdergenoemde onderzoekers Dronkers, Schönfeld, Stroband en Wemelsfelder. Bij het Mathematisch Centrum werd door H.A. Lauwerier en zijn medewerkers gewerkt aan numerieke modellen voor stormvloed op de Noordzee. De resultaten hiervan werden ook afzonderlijk gepubliceerd in de artikelenreeks 'Het Noordzee-probleem'.

in 1919 af aan de TH te Delft als civiel ingenieur, werkte tot 1926 bij de Provinciale Waterstaat van Drenthe en tot 1928 bij de Surinaamse Bauxiet Mij. In 1929 trad hij in dienst bij het arrondissement Dordrecht van de Rijkswaterstaat; de totstandkoming van de Hellegatdam was een tastbaar resultaat van zijn onderzoekingen. In 1936 promoveerde hij te Leiden op 'Onderzoekingen in de Hoofden in verband met de gesteldheid der Nederlandsche kust'. Hij was secretaris van de in 1929 opgerichte Stormvloedcommissie en van de in 1953 opgerichte Deltacommissie. In 1942 werd hij benoemd tot hoofd van de studiedienst van de Directie Benedenrivieren. Kort na 1953 werd het onder zijn beleid ontwikkelde analoog van het Nederlandse Deltagebied voltooid. Vanaf 1955 was hij hoofd van de Directie Algemene Dienst en Waterhuishouding. Hij wordt algemeen beschouwd als de geestelijke vader van het Deltaplan.

¹⁷ Zonder hierover in detail te treden, zij opgemerkt dat beide vergelijkingen een onmisbare basis vormen voor berekeningen op dit gebied.

¹⁸ Henricus Johannes Stroband; geboren te Leeuwarden op 26 juli 1914 en overleden te Bennekom op 7 oktober 1985. Studeerde

Afb. 7. Gedeelte van de elektrische analogon-rekenmachine, de zogenaamde Deltar, voor het bestuderen van de waterbeweging in het Deltagebied.



De studies verricht vóór de stormvloed van 1953 waren vooral gericht op de verklaring van het verschijnsel stormvloed (het ontstaan). Met het oog op mogelijke herhaling en dus ook ten aanzien van de noodzaak tot het treffen van technische maatregelen, was de aandacht nu vooral gericht op de mogelijkheden om stormvloed door middel van berekeningen te kunnen voorspellen.

Beperkte het onderzoek zich aanvankelijk tot een directe vergelijking gebaseerd op een zeker evenwicht tussen wind en waterstand, in werkelijkheid is het verschijnsel stormvloed aanzienlijk ingewikkelder. Zo speelt de factor tijd een bijzondere rol: de zee zal vaak niet voldoende tijd krijgen om een evenwicht van krachten te bereiken. Ook wrijvingskrachten langs de zeebodem en het Coriolis-effect (gevolg van de draaiing van de aarde) maken het stelsel vergelijkingen waarmee gerekend moet worden erg ingewikkeld. Pas in de tweede helft van de jaren zestig werd het, door het gebruik van de computer, beter mogelijk om stormvloed in al hun complexiteit te berekenen. Het waren P. Groen en M. P. H. Weenink die een berekeningsmethode uitwerkten waarbij het aantal vakken, zoals door Schalkwijk geïntroduceerd, werd uitgebreid en waarbij de oplossing van de vergelijking met acceptabele vereenvoudiging in principe voor de gehele kust, ja zelfs voor de gehele Noordzee gold.

Om in Nederland de coördinatie op dit gebied tot stand te brengen en te bevorderen, werd in 1968 de Raad van Overleg voor het Fysisch-Oceanografisch Onderzoek van de Noordzee ingesteld. Hieraan wordt deelgenomen door KNMI, Rijkswaterstaat, Technisch-Physische Dienst TNO-TUD, Rijks Geologische Dienst, Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine, Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee en Waterloopkundig Laboratorium.

Eind jaren zeventig werd overgegaan op voorspellingen met een atmosferisch model dat door het KNMI was ontwikkeld. Dergelijke modellen bestrijken een zeer groot gebied, in feite de gehele wereld, en lenen zich dus voor voorspellingen op langere termijn, zij het met betrekkelijke nauwkeurigheid.

Latere ontwikkelingen

Mathematisch-fysisch worden getijbeweging, stormvloed en allerlei andere verschijnselen met betrekking tot de waterbeweging alle door hetzelfde stelsel differentiaalvergelijkingen beschreven, bekend als de 'ondiepwatervergelijkingen'. Ondanks de veelheid van toepassingen blijven er nog allerlei fundamentele vragen onopgelost liggen. Eén daarvan is onze gebrekkige kennis van het turbulentieverschijnsel. Turbulentie is een stromingstype waarbij stroming en drukverdeling op zeer onregelmatige wijze

in 1935 af aan de HTS te Leeuwarden als waterbouwkundige. Was tot aan zijn pensionering onafgebroken werkzaam bij Rijkswaterstaat te 's-Gravenhage, aanvankelijk bij de studiedienst van de Directie Benedenrivieren onder dr. ir. Johan van Veen. In 1944 kreeg hij de leiding van de rekenafdeling en ontwikkelde hij een elektrisch analogon voor de simulatie van de getijbeweging in het Nederlandse deltagebied. Werd in 1956 hoofd van de rekenafdeling van de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst en kreeg in 1964 een nevenfunctie als wetenschappelijk hoofddamtenaar A bij de TH te Delft. Voor zijn bijzondere verdiensten werd hij bij zijn 25-jarig ambtsjubileum in 1960 onderscheiden als Ridder in de Orde van Oranje Nassau.

ze fluctueren. De wijze waarop dit verschijnsel in de berekeningen wordt meegenomen is medebepalend voor de betrouwbaarheid van de resultaten die uit de berekeningen volgen. Naast dergelijke fysische vraagpunten zijn er ook complicaties van modeltechnische aard die maken dat de studies naar het voorspellen van stormvloed nog volop in ontwikkeling zijn. Het schrijven van een recente historie van voorspellingsmethoden valt dan ook buiten het bestek van deze publikatie.

Literatuur

- Dronkers, J.J., 'Een getijberekening voor benedenrivieren', *De Ingenieur*, 50 (1935), no. 34.
- Dronkers, J.J. en J.C. Schönfeld, 'Tidal computations in shallow water', *Proc. ASCE, Hydr. Divn.*, Separate 714, 1955, 50 p.
- Dronkers, J.J., *Tidal computations in rivers and coastal waters*. Amsterdam, North-Holland Publ. Cy., 1964, 518 p.
- Engelenburg, E., 'Over den invloed van windrichting en luchtdrukking op den zeespiegel', *De Ingenieur*, 6 (1891), no. 39, p. 349-352.
- Everdingen, E. van, *Annales de la Commission pour l'étude des raz de marée*. 4 (1933), p. 116-129.
- Gallé, P.H., *Stormvloed langs de Noordzee en de Zuiderzeekusten*. Amsterdam, Zuiderzeevereniging, 1917, 54 p.
- Gottschalk, M.K.E., *Stormvloed en rivieroverstromingen in Nederland*. Assen, Van Gorcum, 1971-1977, 3 dln.
- *Graphische voorstelling der waterstanden in de Zuiderzee bij Zeeburg, in het IJ voor Amsterdam en op Rijnland's boezem te Spaarndam van 1 Junij 1872 tot en met 25 Maart 1876*. Uitg. onbekend [±1876], 154 p.
- Groen, P., 'The KNMI-method of forecasting wind induced sea level height disturbances', *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 14 (1961), no. 3, p. 93-98.
- Lauwerier, H.A., 'The North Sea problem', *Proc. KNAW*, A 63, nos. 2-5, A 66, no. 2, 1960-1963, 8 dln., 119 p.
- Lely, C.W., *De invloed van de Zuiderzee op de stormvloedstanden langs de Friesche kust*. Delft, proefschrift TH, 1921.
- Mazure, J.P., *De berekening van getijden en stormvloed op benedenrivieren*. Delft, proefschrift TH, 1937, 223 p.
- Niekerk, D.J. van, *Kort overzicht betreffende ontstaan en werkwijze van de Stormvloed Waarschuwingsdienst*. 's-Gravenhage, Algemene Dienst van de Waterstaat, maart 1935.
- Ortt, F.L., 'De invloed van wind en luchtdruk op de getijden'. 's-Gravenhage, *Verh. Kon. Inst. van Ingenieurs 1896-1897*, p. 117-130.
- Ortt, J.R.T., 'Eenige waarnemingen en opmerkingen over het opwaaien van water'. Amsterdam, *Versl. en Med. Kon. Akad. van Wetenschappen*, Afd. Nat., 2e reeks, 6 (1872), 48 p.
- Schalkwijk, W.F., *Onderzoekingen over stormvloed*. De Bilt, KNMI, colloquium 19 feb. 1943, 7 p.
- Schalkwijk, W.F., *A contribution to the study of storm surges on the Dutch coast*. Utrecht, RU, proefschrift, 1947, De Bilt, KNMI, no. 125, 111 p.
- Schönfeld, J.C., *Propagation of tides and similar waves*. Delft, TH, proefschrift, 1951.
- Schönfeld, J.C. en H.J. Strobant, 'Getijonderzoek door middel van de hydraulisch-elektrische analogie', *Rapport Deltacommissie*. 's-Gravenhage, Staatsuitgeverij, 1961, deel 4, bijdrage III.8, p. 211-230.
- *Stormvloedrapporten*. 's-Gravenhage, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ)/Rijkswaterstaat, 1948 tot heden.
- Strobant, H.J., 'De voortplanting van het getij bepaald met behulp van de elektro-techniek, met inachtneming van de kwadratische weerstandswet', *Polytechnisch Tijdschrift*, 3 (1948), no. 45-46, p. B661-B667, no. 47-48, p. B691-698.
- Thijssse, J.Th., *Onderzoek betreffende den invloed van rijzingen en dalingen van den waterspiegel op lange panden van optredende (heerschende) winden op de scheepvaart*

- en op de in standhouding van de oevers*. Brussel, 16e Int. Scheepvaartcongres, 1935, 1e Afd., 1e vraag, p. 30-33.
- Timmerman, H., *Waterstanden langs de Nederlandse kust*. De Bilt, KNMI, Versl. V-174, 1965, 36 p.
 - Timmerman, H., 'Windeffecten op de Noordzee'. In: Otto, L en M.P. Visser, *Het KNMI en de zee 1950-1980*. De Bilt, KNMI, Publ. nr. 157, 1980, p. 121-136.
 - Veen, J. van, 'Getijstroomberekening met behulp van wetten analoog aan die van Ohm en Kirchhoff', *De Ingenieur*, 52 (1937), no. 19, p. B73-B82. Commentaar van J.M. Burgers: no. 28, p. B112-B113.
 - Veen, J. van, 'Electrische nabootsing van getijden', *De Ingenieur*, 58 (1946), no. 2, p. B17-B20. Commentaar van J.J. Dronkers: no. 8, p. B70-B73.
 - *Verslag van de Staatscommissie inzake buitengewoon hoge waterstanden tijdens den stormvloed van 13/14 januari 1916 voorgekomen op de in Zuidholland gelegen Benedenrivieren, meer bepaaldelijk op den Rotterdamschen Waterweg*. 's-Gravenhage, Gebr. J.& H. Langenhuysen, 1920, 3 dln.
 - *Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918-1926*. 's-Gravenhage, Algemene Landsdrukkerij, 1926, 345 p.
 - Vreugdenhil, C.B., 'Numerieke getijmodellen; na 25 jaar nog aktueel?', *Nieuw Archief voor Wiskunde*, 30 (1982), no. 3, p. 167-194.
 - Weenink, M.P.H., *A theory and method of calculation of wind effects on sea levels in a partly-enclosed sea, with special application to the southern coast of the North Sea*. Utrecht, RU, proefschrift, 1959, De Bilt, KNMI, Med. en Verh. no. 73, 1958, 111 p.
 - Weenink, M.P.H. en P. Groen, 'A semi-theoretical, semi-empirical approach to the problem of finding wind effects on water levels in a shallow partly enclosed sea', *Proc. Kon. Ned. Akad. van Wetenschappen*, B 61, 1958, p. 198-213.
 - Wemelsfelder, P.J., 'Wetmatigheden in het optreden van stormvloeden', *De Ingenieur*, 54 (1939), no. 9, p. B31-B35.
 - Wemelsfelder, P.J., 'Klassificatie van stormvloeden', *Land en Water*, 7 (1963), no. 1, p. 8-13, no. 2, p. 42-46.

Summary

This publication presents a brief historical survey of studies on the origin and computation of storm surges in The Netherlands. Since times immemorial, storm surges in the low countries by the sea form the subject of numerous historical records, journal articles, books and reports. Classical publications on storm surges do not treat their causes but their effects: floods including all the damages and miseries involved, i.e. storm-surge disasters. On the other hand, more recent studies, especially on the development of predictive methods, have also been omitted in this publication. Closely related to the studies described are the prominent parts played therein by the researchers mentioned. It is for this reason that some biographical data have been included.

Dankbetuiging

Bij de totstandkoming van dit artikel heb ik dankbaar gebruik mogen maken van door onderstaande personen verstrekte informatie: Drs J. van den Borne van het Centraal Bureau voor Genealogie te Den Haag, de heer J. van der Lingen van het KNMI te De Bilt, mevrouw J. Rousel van het RIKZ te 's-Gravenhage, mevrouw H.C. Schalkwijk-van Geyt te Heeze, Prof.Dr.Ir J.C. Schönfeld te Nijensleek, mevrouw J. Stroband-Hiensch te Veenendaal, Prof.Dr.Ir C.B. Vreugdenhil te Zeist, en mevrouw H. Wemelsfelder-van der Waa te Goes.