

# Lorentz en zijn berekening van de Afsluitdijk

1918-  
1926

Negentig jaar geleden, op 28 mei 1932, was de Afsluitdijk klaar met de dichting van het laatste gat, de Vlieter. Nog tien jaar eerder zat natuurkundige Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) sinds 1918 midden in een voor hem ongewoon toegepast project: de Staatscommissie Zuiderzee. Het ging om de berekening van de gevolgen voor de normale waterstanden van een afsluitdijk – toen nog zonder hoofdletter – van de Zuiderzee. Met zo'n dijk zouden overstromingen als in 1916 tot aan Amersfoort tot het verleden behoren [1,2]. En bij storm, hoe hoog zou het zeewater dan langs de Waddenzee kust komen met die nieuwe dijk? Zoals vaak bij nieuwe ontwikkelingen waren sommige deskundigen pessimistisch: op toekomstige waterhoogtes zou alleen intuïtief gekokt kunnen worden. De onderzoeksvraag voor de Staatscommissie werd overgenomen in de lange titel van het eindverslag van 1926 [3] (figuur 1).

**L**orentz schreef daarin zorgelijk: “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 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 vermeden had, te hulp moesten worden geroepen.”

Maar Lorentz meende dat met natuurkundige principes toch een redelijk betrouwbare oplossing mogelijk was. Hij ging zich indekken met uitgebreide extra berekeningen: een schaar aan modellen met iets andere constanten voor de bodemweerstand, correctiefactoren voor lineaire benaderingen, afschattingen voor de krachten van Bernoulli en Coriolis, enzovoort.

## Achtergrond

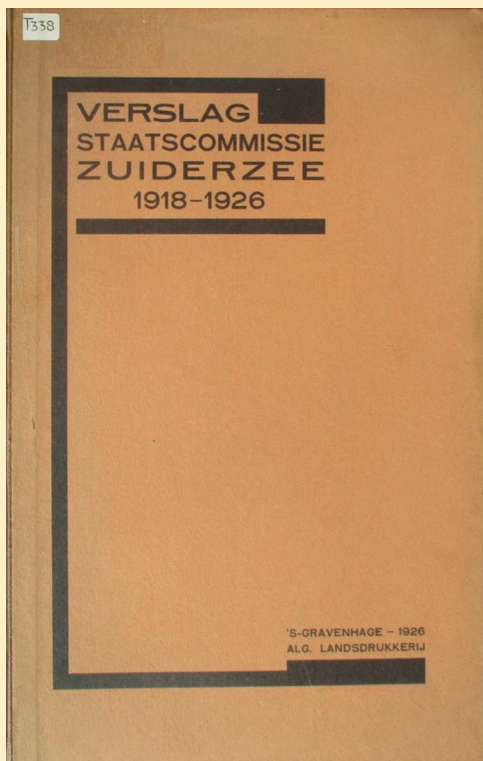
De zoveelste watersnood van 13 en 14 januari 1916 met zestien doden op Marken gaf de doorslag na een slepend politiek debat sinds 1877. Nederland moest de Zuiderzee afsluiten en voor voedselproductie deels inpolderen, volgens de Zuiderzeewet van 14 juni 1918. Voor de technische details van de waterstanden was een Staatscommissie Zuiderzee nodig, maar Lorentz was niet de eerste keus als voorzitter [1]. Eerst werd de ingenieur en sterrenkundige H.G. van de Sande Bakhuyzen (1838-1923) aangezocht, die al eerder staatscommissies voor de Nieuwe Waterweg en Graadmeting en Waterpassing voorzat. Maar die bedankte vanwege zijn leeftijd van tachtig jaar. Daarom vroeg minister van Waterstaat Cornelis Lely (1854-1929, Liberale Unie) Lorentz, lid van de Vrijzinnig Democratische Bond, met wie hij al eerder had gepubliceerd. Lorentz stemde meteen toe. Zes auteurs van soms kritische publicaties over het pro-

ject werden in de commissie van samen achttien leden opgenomen. De taken van de Staatscommissie Lorentz, zoals zij ook wel werd genoemd, werden verdeeld over verschillende afdelingen, die apart vergaderden en specialistische nota's schreven over hun expertisegebieden. Afdeling A behelsde waterloopkunde, B meteorologie en oceanografie, en C theorie. Afdelingen A en B stonden onder leiding van respectievelijk H. Wortman van Rijkswaterstaat en E. van Everdingen van het KNMI, C bestond alleen uit Lorentz zelf. Er waren in acht jaar heel efficiënt maar vier “algemeene” vergaderingen van alle secties samen. Hier weerlegde Lorentz ooit een commissielid, dat later opmerkte dat hij “nog nooit zo aardig voor gek versleten was.” [1].

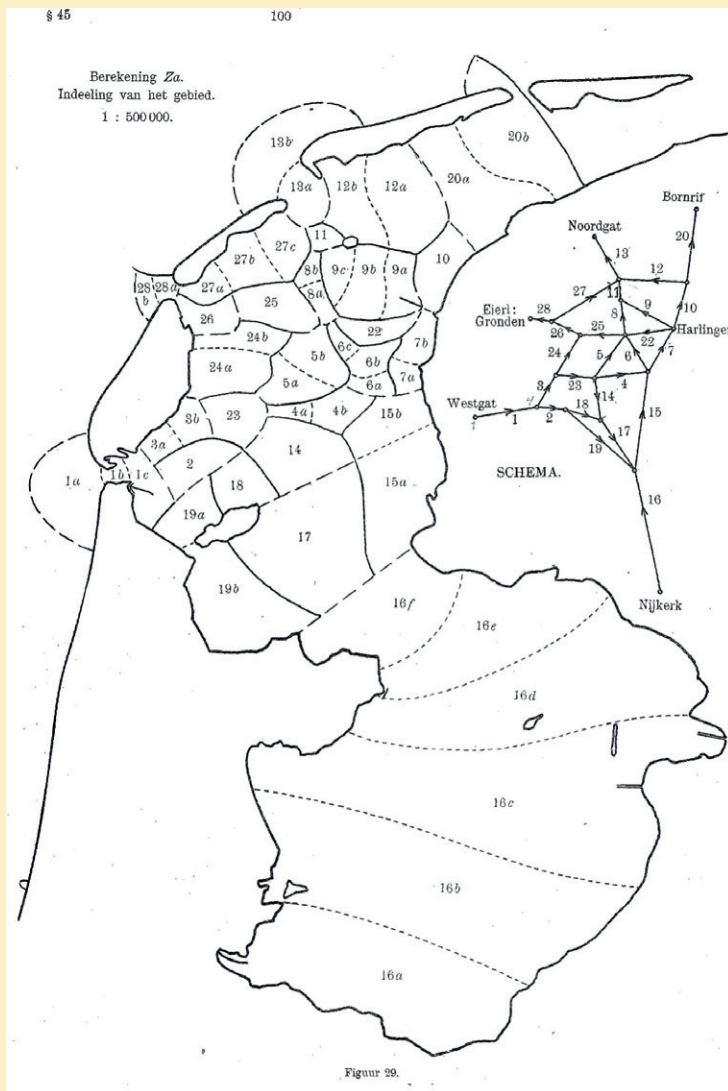
## Minstens zes situaties

Veel van de theorie en de rekenmethode ontwikkelde Lorentz in samenspraak en schriftelijke correspondentie met de net afgestudeerde J. Th. 'Jo' Thijsse, de tweede secretaris van de Staatscommissie en zoon van de natuurbeschermer Jacques P. Thijsse (figuur 5 en 6 [5]). (Jo Thijsse werd in 1938 hoogleraar hydraulica aan toen nog de Technische Hogeschool Delft.) Ten minste zes toestanden moesten doorgerekend worden.

1. De nog open Zuiderzee en voorliggende Waddenzee zoals die waren bij normale getijdenbeweging (toestand Z, van Zuiderzee). Veel meetgegevens ontbraken en moesten dus aangevuld worden.
2. Idem bij storm. Van de toen recente grote stormen van 1894 en 1916 waren voldoende meetgegevens beschikbaar.
3. De geprojecteerde afgesloten Zuiderzee en Waddenzee bij normale getijdenbeweging (toestand A, van afgesloten). De afsluitdijk moest lopen van Wieringen naar Piaam onder Makkum in Friesland.
4. Idem bij storm.
5. Verder werd nog situatie A' bekeken: een afsluitdijk



Figuur 1. *Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918-1926*, Algemeene Landsdrukkerij, 's Gravenhage (1926). Foto: Boekwinkeltjes.nl, Wikimedia Commons.



Figuur 2. Een van de gebruikte netwerken van 27 geulen in de Waddenzee en IJsselmeer voor eendimensionale berekening met veertien vertakkingspunten. (Kanaal 21 ontbreekt.) De geprojecteerde 'afsluitlijn' loopt hier nog van Wieringen naar Piaam bij Makkum, ten zuiden van het uiteindelijke noordelijker traject naar Zurich. *Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918-1926*, pagina 100 [3].



Figuur 3. De Afsluitdijk onder constructie. Foto: Technische Dienst Luchtvaartafdeeling - Wikimedia Commons.



Figuur 4. Het schilderij *Dichten van de Vlieter* gemaakt door Johan Hendrik van Mastenbroek. Volle bedrijvigheid bij het sluitgat de Vlieter een week voordat deze zou worden gesloten op 28 mei 1932. Foto: Zuiderzeemuseum Enkhuzen - Wikimedia Commons.

niet naar Piaam, maar naar het noordelijker gelegen Zurig (Zurich) boven Makkum.

6. Idem bij storm.

Hier werd ten slotte voor gekozen vanwege berekende lagere waterstanden daar na afsluiting. Met lineaire benaderingen was optellen en aftrekken van randvoorwaarden en oplossingen (superpositie) toegestaan en dus rekenen met verschiltoestanden  $V$  van stromen en waterstanden,  $V = A - Z$  of  $A' - Z$ . Dit bleek vaak acceptabel.

**Methoden**

Destijds stonden Lorentz in principe verschillende methoden ter beschikking:

1. Een experimentele aanpak met een schaalmodel en echt water. Dit bleek niet zinvol, al werden wel windtunnel- en waterloopkundige experimenten gedaan, en metingen met water in een golfbak van de Dienst Zuiderzeewerken voor de golfoploop op dijken bij storm [3]. Een elektrische schakeling van weerstanden, condensatoren en spoelen had ook als model voor de differentiaalvergelijkingen van het probleem kunnen dienen. Maar voor zover bekend uit de bronnen werd dit niet overwogen [5].
2. Een analytische exacte oplossing van de continuïteits- en bewegingsvergelijkingen voor de stroming. Maar dit bleek onmogelijk door de bodemweerstand die kwadratisch met de watersnelheid opliep, zodat de differentiaalvergelijkingen niet lineair waren en het principe van superpositie niet kon worden toegepast.
3. Semi-analytische integratie van de vergelijkingen na vereenvoudiging door linearisering en discretisering op een goed gekozen netwerk van geulen met vertakkingspunten (knooppunten) om de Waddenzee met zijn geulen en de eenvoudiger Zuiderzee weer te geven.

Deze laatste methode werd gekozen met ééndimensionale benaderingen van soms wel 45 geulen in de Waddenzee. Figuur 2 toont een versie met 27 geulen. Vier inlaten vanuit de Noordzee bleken voldoende, met vele vertakkingspunten van de geulen. Daarna konden rekenaars Jo Thijsse en Jan P. Mazure met rekenmachines als de Millionär en Burroughs Calculator aan de slag, maar later werd ook de rekenliniaal gebruikt. Veel berekeningen werden uitgevoerd door de Algemene Dienst van Rijkswaterstaat onder leiding van de heer S. Blok. Verdere individuele rekenaars, mogelijk jonge vrouwen zoals destijds gebruikelijk, werden niet in het Verslag [3] vermeld. Ze werkten met een precisie van ten minste vijf cijfers en noteerden in totaal meer dan een miljoen cijfers [1]. Zo nodig werden parallelle “nevengeulen” met verschillende dwarsprofielen voor één traject gebruikt, soms wel vier zoals voor geulen nummer 4. Doove Balg Oost, 14. Vlieter en 15b. Middelgronden Zuid in figuur

2. Allerlei eerst niet-berekende effecten konden met correcties gerepareerd worden, zoals de coriolis- en bernoullikrachten. De parameters als de weerstandscostante van Eytelwein (Johann Albert Eytelwein, 1764-1849), of het aantal gebruikte zeegaten aan de Noordzee enzovoorts werden gevarieerd in scharen van numerieke modellen.

**Een semi-analytisch geulenmodel**

Lorentz werkte met vergelijkingen in twee veranderlijken [4]: de waterhoogte  $h$  boven een referentieniveau en de stroom  $s$ , die beide “functiën” van plaats en tijd zijn. De waterstroom  $s$  door een kanaal of geul werd met  $b$  de breedte,  $q$  de diepte,  $h$  de hoogte van de geul en  $v$  de stroomsnelheid van het water gedefinieerd als

$$s = b(q + h)v \approx bqv \text{ voor } h \ll q \tag{1}$$

Dus de stroom  $s$  is het debiet van water in kubieke meter per seconde. De continuïteitsvergelijking – er raakt geen water zoek – met de x-as langs een geul luidde

$$\partial s / \partial x = -b \partial h / \partial t \tag{2}$$

De bewegingsvergelijking met krachten door verhang – de stroming door de zwaartekracht over een verschil in waterstand – bodemweerstand  $W$  en wind  $F$  werd

$$\partial s / \partial t = -gq \partial h / \partial x + W + \rho F \tag{3}$$

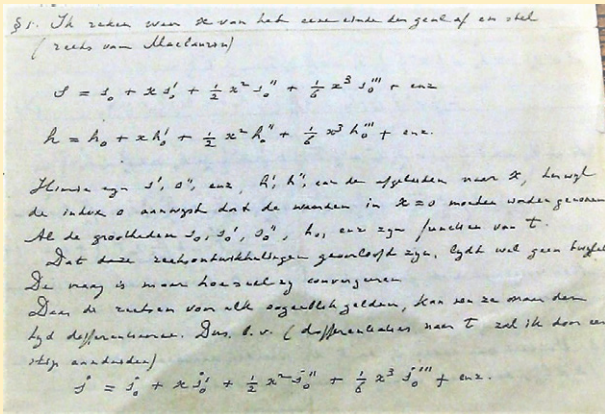
met  $\rho$  de dichtheid van water,  $g$  de valversnelling,  $W = -g|s|q^2 C^2$  de bodemweerstand en  $F$  de windkracht per kubieke meter water (figuur 6).  $C$  is de constante van Eytelwein, die weer een functie van de diepte  $q$  is. Vaak werd voor de Waddenzee  $C = 530 \text{ cm}^{1/2}/\text{s}$  gebruikt in het CGS-stelsel.

Het effect van eb en vloed kon worden voorgesteld door complexe functies voor de hoogte  $h(x, t)$  en de waterstroom  $s(x, t)$

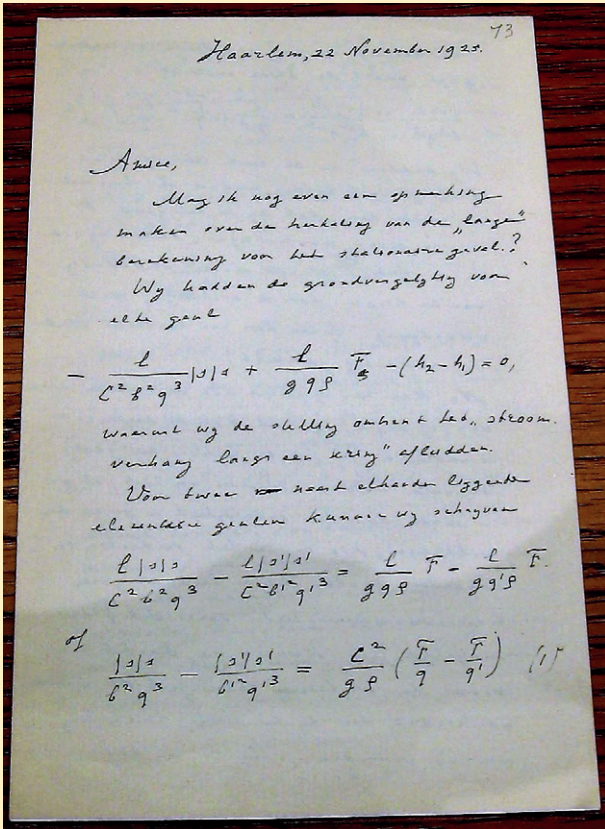
$$h = a e^{int + ux} \text{ en } s = c e^{int + ux} \tag{4}$$

met  $a$  en  $c$  constanten,  $n = 2\pi/T$  getij,  $t$  de tijd,  $u$  de complexe demping en zo nodig ook een teruglopende golf in de min x-richting. Dan kregen de rekenschema’s tevens een interne controle: het imaginaire deel van de numerieke integratie moest op vrijwel 0 uitkomen, anders moesten de stapgrootten in ruimte en tijd verkleind worden. Door “beproeuvenderwijze” te “proberen” werd met heen en weer rekenen in het netwerk aan de randvoorwaarden en continuïteit in de vertakkingspunten voldaan. De rekenmethode werd bevredigend getoetst aan metingen in het Kanaal van Bristol, de Golf van Suez en de Straat van Madoera in Nederlands-Indië. Voor de aparte berekening van waterstanden bij storm (“stormhoogtes”) werd eerst volgens *Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik* van B. Riemann





Figuur 5. Brief van H. A. Lorentz aan J. Th. Thijsse van 18 juni 1925 met Maclaurin-reeksontwikkelingen van stroom S en hoogte h naar de plaats langs een geul x. Een accent ' geeft een afgeleide naar de plaats langs een geul aan, en de bovenpunt een tijdsafgeleide. Detail van pp. 1. Noord-Hollands Archief NHA 757, doos 2. Vergelijk Verslag [3], p. 155. Foto: Hans Muller.



Figuur 6. Brief van H. A. Lorentz aan J. Th. Thijsse van 22 november 1925, p. 1 "Amice, Mag ik nog even een opmerking maken..." Met een bewegingsvergelijking voor de stelling omtrent het "stroomverhang langs een kring" door twee parallelle geulen (waterhoogte h, breedte b en diepte q, met en zonder accent), waarbij het verschil in bodemwrijving opweegt tegen het verschil in aandrijving door de wind F, "opwaaing". Noord-Hollands Archief NHA 757, doos 2. Vergelijk Verslag [3], pp. 130, 161, 164,170 en 215. Foto: Hans Muller.



Figuur 7. Hendrik Lorentz en zijn vrouw Aletta Lorentz-Kaiser in 1925. Ze staan voor een muur te wachten op het begin van de viering van Lorentz' gouden doctoraat. Foto: Rijksmuseum Boerhaave - Wikimedia Commons.

en H. Weber (1900) een Besselfunctie van de nulde orde  $J_0(iz)$  gebruikt, maar die even machtreeks convergeerde niet. Daarom zocht Lorentz in juni 1925 zijn toevlucht tot MacLaurin-reeksontwikkelingen van hoogte  $h$  en stroom  $s$  tot de derde orde in de afstand langs een geul (figuur 5). Hiermee konden de bewegingsvergelijkingen wél numeriek in voldoende precisie worden opgelost met goniometrische en hyperbolische functies. De waarnemingen van de storm van 22-23 december 1894 werden er bevredigend mee gereproduceerd [3].

## Verslag

In november 1926 verscheen het kloeke Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918-1926 van 342 bladzijden (totaal meer dan 200.000 woorden) plus veertien kaarten [3], grotendeels van de hand van voorzitter Lorentz met bijdragen van onder meer commissielid Cornelis Willem Lely (1885-1932), de tweede zoon van minister Cornelis Lely. Het verslag beantwoordde de gestelde vragen naar de verwachte waterstanden bij afsluiting van de Zuiderzee: onder meer bij Zurich 95 cm hoger en een gestegen getijverschil van 105 tot 165 cm. Bovendien een sterkere stroming door het Helderse gat en de Vlie, die Lorentz verklaarde doordat de afsluitdijk daar de verlagende interferentie van een inkomende met een weerkaatste getijgolf uit de Zuiderzee wegnam. Na een beschrijving van de waarnemingen en voornaamste stormvloed bespreekt Lorentz drie “wijzen van berekening”. De eerste methode, van commissielid P.H. Gallé (KNMI), schatte de opwaaiing van het water in de Waddenzee naar de Friese kust maar schoot tekort door te veel linearisering. De tweede methode, uit het proefschrift van C.W. Lely, schaalde de stormen bij open Zuiderzee om gewaagd te extrapoleren naar de situatie na afsluiting. Deze enorme inham had een verlagend effect, omdat binnen de duur van een storm de Zuiderzee nog niet volliep; een effect dat zou verdwijnen bij afsluiting. Maar de hoogte bij Piaam was 38 cm te laag en de extrapolatie van de stormhoogte na afsluiting was te onzeker. Daarna gaf Lorentz zijn “derde methode” zoals boven kort beschreven. De getijden – vooral het hoofdgetij M2, de tweemaal daagse eb en vloed door de Maan – werden berekend met en zonder de voorziene afsluitdijk en vergeleken met de metingen. Doordat het Amsteldiep tussen Den Helder en het toenmalige eiland Wieringen al in 1924 afgesloten werd, konden de berekeningen daar tot tevredenheid met de meetresultaten gestaafd worden. Bijvoorbeeld bij Westerland was een verhoging van 30 à 35 cm berekend en 32 cm gemeten.

## Hydrodynamica

Dan gaf Lorentz in 43 bladzijden een pittig college theoretische hydrodynamica in de stijl van zijn leerboeken als *Beginselen der natuurkunde* (1888). Als alternatief overzicht wordt het leerboek *Hydrodynamics* (1924) van Horace Lamb vermeld. Lorentz leidde alle benodigde theorie af en gaf toepassingen voor stormen en kana-

len waar exacte oplossingen mogelijk zijn. Het verslag besloot met een hoofdstuk over de “golfploep” aan de dijken en de gevolgen van afsluiting voor het Amelandse wad, en bijvoorbeeld het effect van een extra dijk van Terschelling naar Friesland. In de bijlagen werden peilschalen met elektrische aflezing en allerlei meetgegevens besproken, met gedetailleerde voorbeelden van de numerieke oplossingen voor getij en storm in Waddenzee en IJsselmeer [3, 4].

## Tijdsbeslag en betekenis

Na de begrafenis van Lorentz op 9 februari 1928 in Haarlem klaagde Einstein bij Jo Thijssse dat het Zuiderzeeproject Lorentz te lang van het front van de natuurkunde had afgehouden. Bij elkaar zou het Lorentz wat meer dan een jaar continu gekost hebben, naast allerlei andere activiteiten voor de Conseils Solvay, de Volkenbond, de Onderwijsraad, drie promovendi, tweemaal vier maanden gastcolleges in de Verenigde Staten en Lorentz' maandagochtendcolleges natuurkunde in Leiden [1,2]. Maar het denkwerk over de Zuiderzee en de intensieve samenwerking met Jo Thijssse was zeven jaar doorgegaan. Bij latere stormen bleek dat de Commissie Lorentz de waterhoogtes op sommige plaatsen toch nog met 20 à 25 cm onderschat had [1]. In 1952 bedankte de regering Lorentz postuum voor zijn werk door de sluizen bij Kornwerderzand voortaan de Lorentzsluizen te noemen. In 1957 schreef Thijssse terugblikkend dat de betekenis van Lorentz' werk aan de Afsluitdijk niet alleen lag in de redelijk correcte voorspelling van de waterstanden, maar ook in zijn wetenschappelijke fundering van de waterbouwkunde met nauwgezette rechtvaardiging van de toegepaste benaderingen [6].

## REFERENTIES

- 1 Frits Berends en Dirk van Delft, Lorentz. Gevierd fysicus, geboren verzoener, Prometheus Amsterdam (2019). Hoofdstuk 39: Van Piaam naar Zurich, pagina's 483-503.
- 2 Anne J. Kox, Hendrik Antoon Lorentz, natuurkundige 1853-1928. 'Een levend kunstwerk'. Balans, Amsterdam (2019). Hoofdstuk 9: De Zuiderzee, pagina's 178-191.
- 3 Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918-1926. Volledige titel: 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 hogere waterstanden, en een grotere golfploep, 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. 's-Gravenhage. Algemeene Landsdrukkerij. De verschijningsdatum was pas in november 1926 [1]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:f5a4fe20-b26a-4875-9f96-6be04ba16c59?collection=research>.
- 4 Schaling, linearisering, discretisering en Fouriertransformatie in [3], pagina's 90, 155-183, 223-248, 309-321 en in Jeroen Hazewinkel, Lorentz linearization and its application in the study of the closure of the Zuiderzee, 2004 Physics of Coasts, [www.lorentz.leidenuniv.nl/history/zuiderzee/Lorentz\\_linearisation.pdf](http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/zuiderzee/Lorentz_linearisation.pdf).
- 5 Lorentz Archief NHA 364, Archief Commissie tot uitgave van de wetenschappelijke correspondentie van H.A. Lorentz NHA 757 (met de correspondentie tussen Lorentz en J. Th. Thijssse), beide in het Noord-Hollands Archief in Haarlem, en het Archief van de Staatscommissie Zuiderzee 1918-1926, nummer 1023 in Het Flevolands Archief in Lelystad. Dit laatste archief was niet toegankelijk wegens digitalisering.
- 6 J. Th. Thijssse, Enclosure of the Zuiderzee, in G.L. de Haas-Lorentz, H.A. Lorentz. Impressions of his life and work, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1957), pagina's 129-144.