



Kees Vreugdenhil

Universiteit Twente,
Faculteit Technologie en Management,
Afdeling Civiele Techniek,
Postbus 217, 7500 AE Enschede
c.b.vreugdenhil@ctw.utwente.nl

Gerard Alberts

Werkgroep Wetenschap en Samenleving
Katholieke Universiteit Nijmegen
Centrum voor Wiskunde en Informatica
Postbus 94079, 1090 GB Amsterdam
g.alberts@cw.nl

Pieter van Gelder

Technische Universiteit Delft,
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Postbus 5048, 2600 GA Delft
P.vanGelder@ct.tudelft.nl

Een eeuw wiskunde en werkelijkheid

Waterloopkunde

Onderzoekers van het Waterloopkundig Lab, de Deltadienst van Rijkswaterstaat, TNO en het Mathematisch Centrum bestudeerden in vredige competitie het dynamisch gedrag van de Haringvlietsluizen. De uiteenlopende tradities om de wiskunde in dienst te stellen van de waterbouwkunde, schaalmodellen, analogons, wiskundige modellen en rekenwerk, kwamen in een zogenaamde klapclub samen. De beslissing bleef uit. Korte tijd later raakten al deze inspanningen op de achtergrond door de revolutie in de richting van een heel nieuw type rekenmodellen.

In de twintigste eeuw veranderde in de civiele techniek de relatie tussen wiskunde en werkelijkheid ingrijpend. Eerst geleidelijk, later met grote omwentelingen. Maakten de civiel ingenieurs zich in de eerste helft van de eeuw los van het zoeken naar waarheid met wiskunde om te kiezen voor een meer pragmatische aanpak, de laatste jaren lijkt wonderlijk genoeg dankzij de computer het waarheidsstreven teruggekeerd.

Foto p. 266. De doorbraak van de dijk tussen Alblaserdam en Papendrecht tijdens de watersnoodramp van 1953. Foto: Spaarnestad Fotoarchief.

Hydrodynamici en waterloopkundigen

Het wiskundig modelleren mag een twintigste-eeuwse uitvinding zijn (zie [1], [2]), de toepassing van wiskunde op natuurlijke verschijnselen is veel eerder begonnen. Op het gebied van waterstromingen is er met name in de 18e eeuw een enorme ontwikkeling geweest. Vooraanstaande wiskundigen als Bernoulli, Euler, d'Alembert en Laplace bereikten in de theorie van de hydrodynamica resultaten die tot vandaag van belang zijn, getuige de vergelijkingen van Laplace en van Euler. Deze resultaten waren nogal theoretisch en hadden hun beperkingen. Zo was de getijdentheorie van Laplace alleen geldig voor een oceaan die de hele aardbol bedekt — de bruikbaarheid voor concrete situaties als de Noordzee was dus beperkt. Een nog beruchter voorbeeld is de paradox van d'Alembert die zegt dat op een lichaam, geplaatst in een stroming — een potentiaalstroming — geen netto kracht wordt uitgeoefend. Dit is uiteraard in ernstig conflict met de dagelijkse waarneming.

In de loop van de negentiende eeuw begon zich een onderscheid af te tekenen tussen *hydrodynamici* en *hydraulici*. Hydrodynamici waren mensen als Laplace die mooie theorieën maakten zonder veel praktische waar-

de. Met hydraulici werden de mensen bedoeld die praktische waterloopkundige problemen oplosten [25], ingenieurs in de traditie van Vierlingh, Leeghwater en Stevin. Zo deden Chézy en Manning waarnemingen aan de stromingsweerstand in een leiding, Darcy aan de stroming in de grond, Froude aan weerstand van varende schepen. Wiskunde kwam hier nauwelijks aan te pas, anders dan in empirische relaties die we tegenwoordig als 'curve fitting' zouden beschouwen. Ook tegenwoordig wordt deze aanpak nog wel gevolgd voor het beschrijven van moeilijk te doorgronden verschijnselen, zoals zandtransport in stromend water, zij het dat nu de gelijkvormigheidstheorie een wat betere theoretische basis biedt om vast te stellen welke dimensieloze combinaties van parameters een rol kunnen spelen.

In de negentiende eeuw stonden het theoretische zoeken naar waarheid en het oplossen van praktische problemen tegenover elkaar. In de twintigste eeuw kwam er een kentering en lukte het geleidelijk aan om verbanden te leggen tussen de theorie van de hydrodynamica en de praktijk van de waterbouw. Vanuit de praktijk trad een zekere verwetenschappelijking in. Vanuit de



H.A. Lorentz

theorie werden rekenwijzen ontwikkeld die sommige concrete problemen bestudeerbaar maakten. Typerend voor de verwetenschappelijking vanuit de praktijk was de bouw van schaalmodellen. De ingenieurs bouwden daartoe niet zomaar een maquette van een schip of sluis, maar een afbeelding op schaal waarin men onder bepaalde aspecten kon observeren en experimenteren. Vanuit de theorie slaagde men erin bijzondere gevallen van waterstromen en getijdenbeweging zo vereenvoudigd te beschrijven dat eraan gerekend kon worden. Een derde brug tussen theorie en praktijk werd geslagen waar men inzichten leende uit andere gebieden van de techniek.

De leer van de elektriciteit was geformuleerd met een beroep op de metafoer van water: stroom. Begin twintigste eeuw deden de hydraulici omgekeerd een veel concreter beroep op de elektriciteitstheorie om waterstromen te beschrijven: met elektrische analogons. Het meten van de stroom in een circuitje met weerstanden en condensatoren gaf een redelijke voorspelling van het stromen van water in rivieren.

In de twintigste eeuw, en dan vooral vanaf 1920, leverden de Nederlandse hydrodynamici en hydraulici aanzienlijke bijdragen aan deze ontwikkelingen. In het kader van de Zuiderzeewerken en later de Deltawerken werden problemen zo urgent dat langs alledrie de aangeduide routes verbindingen werden

gezocht tussen theorie en praktijk. We schetsen in het eerste deel van dit artikel de ontwikkeling in Nederland van 1920, rond het begin van het Zuiderzeewerken-onderzoek met de Staatscommissie Lorentz, tot 1960 toen die verschillende routes bijeenkwamen in de klapclub. In het tweede deel laten we zien hoe, mede onder invloed van de computer, verrassende ontwikkelingen inzetten met een nieuw type rekenmodellen. Het rekenen breidde zich uit tot stochastische benaderingen en de modellen kregen zo'n brede definitie dat er ook sociale en bestuurlijke aspecten in konden worden meegenomen.

Zuiderzee en Delta

Na een lobby van decennia kon ir. C. Lely als minister van Waterstaat op 14 juni 1918 de *Wet tot afsluiting en droogmaking van de Zuiderzee* door het parlement loodsden. De gevolgen van de aanleg van een afsluitdijk voor de hoogwaterstanden hadden in de debatten van de voorafgaande jaren telkens een bijkomstige rol gespeeld, maar vormden toch een vraagstuk van zo groot belang dat Lely bij de behandeling van het wetsontwerp een onderzoek toezegde. Drie weken later, op 4 juli 1918, stelde hij de Staatscommissie Zuiderzee in, naar haar voorzitter ook wel Staatscommissie Lorentz genoemd. Hier begon een toegepast hydrodynamisch onderzoek, dat op zichzelf al 8 jaar zou duren en de aanzet vormde tot een brede stroom van research waarin zich verschillende tradities zouden ontwikkelen.

Nobelprijswinnaar H.A. Lorentz verleende de commissie niet alleen een onvergelykelijk gezag, hij gaf ook actief leiding aan het onderzoek, dat in hoofdzaak door en onder leiding van ir. J.Th. Thijsse werd uitgevoerd. De suggesties en hypothesen uit het debat werden onder hun handen serieuze onderwerpen van onderzoek. Het denkbeeld dat hoogwaterstanden hoger zouden worden, speciaal bij stormvloed, was door de betrokkenen aanvaard. Hoe groot de verhoging zou zijn en hoe die berekend kon worden, daarover bestonden slechts suggesties.

"Toen wij in 1918 [...] van de Regeering de opdracht kregen om het probleem van den invloed van de afsluiting der Zuiderzee op de waterstanden bij stormvloed te bestudeeren, ben ik persoonlijk daarvoor wel wat teruggeschrikt. Ik moet eerlijk verklaren, dat

ik er erg tegen opzag, want een physicus is niet gewoon aan problemen met zulke mate van ingewikkeldheid en met zoo weinig vaststaande gegevens."

Bij terugblik was Lorentz hier al te bescheiden over zijn competenties. In feite had zijn visie het onderzoek gedomineerd met een benadering die vanuit de theorie neerdaalde op de praktijk door vereenvoudigingen aan te brengen en pas op het laatste moment de specifieke omstandigheden in aanmerking te nemen. Over het uitgangspunt bestond geen compromis, de waarheid volgens de theorie; de com-

De paradox van d'Alembert

Voor rotatievrije, wrijvingsloze stroming om een cylinder geldt een potentiaal

$$\phi(r, \theta) = U \cos \theta \left(r + \frac{a^2}{r} \right),$$

waarin (r, θ) cylindercoördinaten ten opzichte van de as van de cylinder zijn, U de aanstroomsnelheid en a de straal van de cylinder. De stroomsnelheid (u, v) wordt dan gegeven door

$$(u, v) = \nabla \phi.$$

De druk die op de cylinderwand wordt uitgeoefend kan hieruit worden afgeleid:

$$p(\theta) = \frac{1}{2} U^2 \sin^2 \theta.$$

De totale drukkracht op de cylinder wordt gevonden door integratie van de horizontale en verticale componenten van de drukkracht, bijvoorbeeld

$$F_x = \int_0^{2\pi} p a \cos \theta d\theta = 0.$$

Dit staat bekend als de paradox van d'Alembert: een lichaam in een (potentiaal)stroming zou een nettokracht van 0 ondervinden. Dit is ook te zien aan het symmetrische karakter van potentiaal en drukverdeling.

In werkelijkheid ziet het stroombeeld er heel anders uit: de stroming laat los en wordt sterk asymmetrisch. Ook de druk 'voor' en 'achter' wordt verschillend waardoor er wel degelijk een netto drukkracht ontstaat.

1 Lorentz in beraadslaging bij [28]. H.A. Lorentz die in 1902 samen met P. Zeeman de Nobelprijs voor de Natuurkunde had gekregen, was internationaal een zeer vooraanstaand wetenschapper. In Nederland was hij onder meer voorzitter van de Afdeling wis- en natuurkunde van KNAW van 1910 tot 1921. In de richting van de techniek bewoog hij zich reeds als voorzitter van de Wetenschappelijke Commissie van Advies en Onderzoek in het Belang van Volkswelvaart en Weerbaarheid, 1918, de voorloper van de Commissie Went die TNO voorbereidde. Zie [18]

Lorentz linearisering

De wrijving tussen water en bodem hangt niet-lineair af van de stroomsnelheid u . Linearisering was niet zonder meer mogelijk, omdat er geen sprake was van een kleine variatie rondom een gemiddelde toestand, maar, integendeel, een grote (getij)variatie gesuperponeerd op een kleine gemiddelde stroming. Lorentz kwam met het idee van middeling (pas veel later herontdekt en goed gemotiveerd): hij verving de kwadratische bodemwrijving door een lineaire die *gemiddeld over een getijperiode* evenveel energie zou dissiperen.

kwadratisch: $\tau = \rho c_f u^2$

lineair: $\tau = \rho k u$

waarin

τ = schuifspanning

ρ = dichtheid van water

u = stroomsnelheid

c_f = wrijvingscoëfficiënt (dimensieloos)

k = effectieve lineaire wrijvingscoëfficiënt

De coëfficiënt k wordt zodanig bepaald dat de verrichte arbeid gedurende een periode T voor beide gelijk is:

$$\int_0^T \tau u dt = \int_0^T \rho c_f u^2 |u| dt$$

$$= \int_0^T \rho k u^2 dt.$$

Nemen we hierin $u = u_0 + u_1 \sin(2\pi t/T)$, dan kan k worden bepaald. Let wel dat deze een functie is van de vooralsnog onbekende u_0 en u_1 , zodat er een iteratie moet worden toegepast.

promissen werden gesloten in het benaderen van de werkelijkheid, approximatie. Andere benaderingen kwamen in, en onmiddellijk aansluitend op, het werk van de Staatscommissie Lorentz tot ontwikkeling, maar stonden aanvankelijk op het tweede plan.

De methode van Lorentz

Uit het debat over de waterstanden waren drie methoden naar voren gekomen, drie benaderingen om de waterstanden zo te beschrijven dat er ook over de situatie na afsluiting iets zinnigs te zeggen zou zijn. De derde methode, de methode van Kooper, werkte Thijsse uit met adviezen van zijn voorzitter tot de methode van Lorentz ([28], p. 7). De eerste ba-

sale vereenvoudiging van deze methode bestond erin de Waddenzee en Zuiderzee voor te stellen als een netwerk van geulen waardoor de getijstroming kon binnendringen. Voor de stroming in een geul bestond een hydrodynamische theorie. Lorentz greep voor de wiskundige theorie terug op Saint-Venant (eendimensionale stromingsvergelijkingen) en Riemann (quasi-lineaire stelsels partiële differentiaalvergelijkingen). Het tweede essentiële punt was de vervanging van de kwadratische hydrodynamische wrijving door een lineaire.

Zo rekenden Thijsse en Lorentz toch alsof de weerstand evenredig was met de snelheid: "Het blijkt dat, wanneer men in elke geul k maar de juiste waarde geeft, de uitkomst in het algemeen aan de werkelijkheid beantwoordt." De periodieke stroming in het kanalenetwerk werd nu in analogie met elektrische netwerken bepaald door iteratief correcties aan te brengen in 'stroomkringen', een methode die later door Hardy-Cross [7] is generaliseerd tot niet-lineaire situaties, met name voor mechanische vakwerken. De berekeningen van de staatscommissie Lorentz werden op mechanische rekenmachines uitgevoerd door Thijsse en zijn mensen². Vóór de afsluiting werd de getijgolf sterk gedempt, maar bij afsluiting zou de lengte van het gebied in de buurt komen van 1/4 golflengte, hetgeen de ideale lengte is voor resonantie en daardoor een grote versterking van het getijde-effect. De (uiteraard later verzamelde) waarnemingen ná afsluiting bevestigden dit. Behalve dit inzicht hebben de berekeningen ook een rechtstreekse invloed op het ontwerp van de Afsluitdijk gehad. Oorspronkelijk was het plan, de dam te laten lopen van Den Oever naar Piaam, maar de berekeningen wezen uit dat de vergroting van de amplitude zou afnemen naarmate men de dijk aan de Friese kant noordelijker zou leggen. De ingenieurs van de Dienst Zuiderzeewerken vreesden dat de dijk gemakkelijk zou verzakken in de veengronden in de Zuiderzeebodem voor Piaam en Makkum. Nu er deze overweging van de Staatscommissie bij kwam was het pleit gauw beslecht en besloot men tot een draaiing van het tracé, van Den Oever richting Zürich ([21], p. 42). Om uit dit alles te bepalen hoe hoog de Afsluitdijk moest worden en hoeveel de Friese en Noordhollandse dijken verhoogd moesten worden, hield de commissie rekening met een onzekerheidsmarge van 20% in haar metingen en berekeningen. Er werd niet voluit

Dimensieloze kentallen

Het getal van Froude: $F = \frac{U}{\sqrt{gH}}$

Het getal van Reynolds: $Re = \frac{UH}{\nu}$

Het getal van Mach: $Ma = \frac{U}{c}$

met U = stroomsnelheid, g = zwaartekracht, H = waterdiepte, ν = viscositeit en c = geluidssnelheid.

een waarschijnlijkheidstheoretische overweging en berekening op losgelaten, maar veel eerder een redenering voor de zekerheid aan toegevoegd.

Karlsruhe: schaalmodellen

In de details van de Afsluitdijk boden de theoretische berekeningen geen uitsluitsel. Men kon bijvoorbeeld gegeven de maximale stroomsnelheid in de sluitgaten nog berekenen hoe zwaar de stenen moesten zijn om niet meegeleurd te worden, maar andere vragen waren zo overzichtelijk niet. Hoe de sluisen aangelegd moesten worden, welke capaciteit de sluisen moesten hebben, welk profiel van dijk het gunstigst was tijdens de werkzaamheden, al dergelijke vragen behoeften een andere aanpak. Voor een deel voorzagen de ingenieurservaring van de waterstaatsmensen hierin, voor een ander deel stond men voor kunstwerken van een nog niet vertoonde omvang. In opdracht van de Staatscommissie verrichtte het *Flussbaulaboratorium* van Th. Rehbock in Karlsruhe van 1922 tot 1925 experimenten aan schaalmodellen, vooral modellen van de sluisen [23].



J.Th. Thijsse

² Over het rekenwerk zie [13], [12]. Kox suggereert dat Lorentz zelf al het (reken)werk uitvoerde [18], maar Lorentz vertelt zelf dat hij het na één poging, waarin bleek dat hij telkens vergissingen maakte, weer aan de ingenieurs overliet [28]



J. van Veen

Aan het eind van de 19e en in het begin van de 20e eeuw werd op allerlei gebieden onderzoek aan schaalmodellen ingevoerd. Wetenschappers als Froude, Reynolds en Mach leidden regels af, waaraan die modellen moeten voldoen om bepaalde verschijnselen goed weer te kunnen geven. Dergelijke regels komen erop neer dat bepaalde dimensieloze kentallen in model en werkelijkheid gelijk moeten zijn, afhankelijk van de vraag welk verschijnsel men wil weergeven. Het is in het algemeen niet mogelijk om alle facetten van de werkelijkheid tegelijk op verkleinde schaal weer te geven anders dan op schaal 1 (dat wil zeggen in de werkelijkheid zelf). Er moet dus altijd water bij de wijn worden gedaan, ook een schaalmodel is een vereenvoudigd model. In vele gevallen zijn die schaalregels af te leiden uit een wiskundige formulering van de verschijnselen. Ook met dit schaalmodelonderzoek, dat meer wortelde in de ingenieurspraktijk dan in de theorie, maakte de staatscommissie Lorentz dus een aanvang op het gebied van de waterbouw in Nederland.

In 1926 bracht de commissie rapport uit [33]. De inhoudelijke aanbevelingen konden onmiddellijk opgenomen worden in de werkzaamheden van de in 1919 opgerichte Dienst der Zuiderzeewerken — Thijsse en zijn mensen waren ook bij deze dienst aangesteld. Lorentz beval bovendien aan om het onderzoek dat hier zo voortvarend was gestart, voort te zetten. Dat gebeurde ook, en wel op verschillende plaatsen, zij het juist niet in de richting van Lorentz' toegepast-theoretische aanpak.

Thijsse stortte zich met een vuur alsof hij nooit meer een rekenmachine wilde aanraken op het schaalmodellenonderzoek naar het voorbeeld van Karlsruhe. Hij kreeg in 1926 de gelegenheid zich te oriënteren op de mogelijkheden van modelonderzoek en in 1927 begonnen in Delft de werkzaamheden van het Waterbouwkundig Laboratorium onder zijn leiding. Reeds vanaf 1919 was er gedebatteerd over de oprichting van een waterloopkundig laboratorium in Delft en in de tuin van een van de gebouwen van Rijkswaterstaat in Den Haag had men al modelproeven gedaan om het verschijnsel golfoploop te onderzoeken. In 1927 begon het dus serieus. Ondanks een behoedzaam begin groeide dit instituut tot een van de toonaangevende laboratoria in de wereld. Thijsse bleef behoedzaam in dienst bij Zuiderzeewerken, gedetacheerd bij het laboratorium tot de formele oprichting van het Waterloopkundig Laboratorium in 1933. Het laboratorium heette aanvankelijk *waterbouwkundig laboratorium*. In 1933 kwam er een stichting Waterbouwkundig Laboratorium waaronder het Waterloopkundig Lab ressorteerde en vanaf 1934 ook het Laboratorium voor Grondmechanica [10], [22]. Men werkte er liever met water dan met wiskunde. Absolute hoogtijdagen beleefde het Waterloopkundig Laboratorium ten tijde van de Deltawerken in de jaren 1950 en 1960, toen in een groot schaalmodel van de Zeeuwse en Zuidhollandse eilanden iedere beweging, iedere afsluiting en iedere variant op een afsluiting werd uitgeprobeerd met zand en water.

Analogons

Ook Rijkswaterstaat zelf entameerde onderzoek. De vorming in 1929 van de *Studiedienst van de Zeearmen, Benedenrivieren en Kusten* van Rijkswaterstaat had weliswaar een andere achtergrond dan de Staatscommissie Lorentz, het succes van deze commissie maakte het de minister van Waterstaat ongetwijfeld gemakkelijker zo'n studiedienst in te stellen "ter verkrijging van volledig inzicht in het mechanisme van de getijwateren". Binnen de studiedienst begon ir. Johan van Veen in 1929 met onderzoek naar verzanding en zandverplaatsing, maar al spoedig verbreedde de aandacht zich naar getijbeweging, zandhuishouding en bedijking. Van Veen ontwikkelde een eigen rekenmethode die hem tot de man van de elektrische analogons zou maken. Dat we elektriciteit als 'stroom' aanduiden heeft zijn oorspong in de vloeistof-metafoor voor dit eertijds relatief onbekende verschijnsel. Nu kon men natuurlijk de metafoor in omgekeerde richting bewandelen en dit liet zich zelfs concretiseren tot het gebruik van elektrische circuits om waterstromen te beschrijven. In plaats van zich rekenwerk op de hals te halen, mat men aan een plaatsvervangend materiaal. Klassiek geworden is het gebruik van elektrisch geleidend papier als analogie voor grondwaterstroming voor tweedimensionale stromingstoestanden in een homogeen grondpakket. De analogie is erop gebaseerd dat we aannemen dat beide processen zich laten beschrijven met een potentiaal-(Laplace)vergelijking. Zodra er complicaties



Het Waterloopkundig Laboratorium was aanvankelijk midden in Delft gevestigd. Hier tussen de achtertuintjes het model van de benedenrivieren.

optreden in de vorm van driedimensionale effecten of een vrije waterspiegel, moeten echter trucs worden toegepast. Een andere aanpak is een netwerk van weerstanden en eventueel condensatoren, gebaseerd op een *discretisatie* van de potentiaalvergelijking, toegepast op eindige onderdelen van de vloeistof. Eigenlijk praten we dan al over voorbodes van de analoge computer.

Van Veen begon echter niet met het bouwen van elektrische circuits. De vergelijkingen die hij had opgesteld voor een praktisch vraagstuk³ waren verwant aan de vergelijkingen voor elektrische stroom en lieten zich eenvoudig oplossen. Omdat dit een nieuwe, mogelijk minder nauwkeurige, aanpak was, kreeg J.P. Mazure, ingenieur bij de Zuiderzeewerken, het verzoek een controleberekening uit te voeren volgens een variant van de methode van Lorentz. De uitkomsten verschilden en binnenskamers ontspoon zich een discussie over de juistheid van de methoden.

In 1934 trok de Studiedienst van de Zee-armen, Benedenrivieren en Kusten zelf een wiskundige, J.J. Dronkers, aan om de lijn van Lorentz voort te zetten. Dronkers was degene die inhoudelijk de draad van de Staatscommissie Zuiderzee weer oppakte en de formules van Lorentz aanpaste voor de situatie in de benedenrivieren, waar niet alleen het tij maar ook de rivierafvoer een rol speelt, en uitwerkte tot rekenschema's. Dronkers kreeg in de jaren dertig de ruimte om een groep rekenaars op te bouwen. Zijn aanpak was, geheel in de lijn van Lorentz' 'exacte methode', wezenlijk anders dan die van zijn chef Van Veen. Wonderlijk was dat zijn wiskundige aanpak die zeer veel rekentijd vergde en slechts mondjesmaat resultaat opleverde, in deze ingenieursomgeving als de juiste gold. In een omgeving waar het mathematisch zijn van een aanpak niet op zichzelf het overtuigende argument was, moet het gezag van Lorentz een belangrijke rol hebben gespeeld. Van Veen werkte zijn 'elektrische methode' verder uit, gebruikte hem in de loop van de jaren 1930 voor verschillende berekeningen [30] en bouwde in de oorlogsjaren, in 1944, zelfs een eenvoudig elektrisch analogon [31]. Na de oorlog voerden Van Veen en Dronkers een heftig debat, ditmaal een publiek debat tussen chef en ondergeschikte in het tijdschrift *De Ingenieur*. Beiden bleven bij hun standpunt en volhardden in hun werkwijze.



De DELTAR, de analoge rekenautomaat voor de Deltawerken.

DELTAR

In zijn elektrische model stelde Van Veen discrete riviersecties voor door elektrische netwerkjes bestaande uit weerstanden, condensators en zelfinducties. In feite werd hierin een differentiebenadering van de hydrodynamische vergelijkingen opgelost. Getijstroming werd gesimuleerd door hoogfrequent wisselstroom [26]. Aanvankelijk stelde Van Veen de wrijving voor als een lineair van de stroming afhankelijk verschijnsel, overeenkomstig de linearisering van Lorentz. In de volgende versie van het analogon introduceerde zijn medewerker Schönfeld niet-lineaire weerstandselementen, die het echter nog steeds niet mogelijk maakten om het werkelijke, waterstand-afhankelijke verloop van weerstand te beschrijven.

Om dit laatste te bereikten gebruikten Van Veen en Schönfeld uiteindelijk mechanische componenten, die wel weer de snelheid van de simulatie ernstig beperkten. Zo kwam in 1954 een groter elektrisch analogon gereed. De ontwikkeling culmineerde in de DELTAR, een analoge rekenautomaat gebouwd voor de Deltadienst van Rijkswaterstaat door de Technisch Fysische Dienst (TNO/TH). De DELTAR simuleerde 120 riviersecties en was in gebruik van begin jaren 1960 tot 1982 voor praktische toepassingen in het Deltagebied, met name voor diverse afsluitingen.

Cassandra

Van Veen liet voor zijn onderzoek in de jaren dertig metingen verrichten aan waterstromen in de Waddenzee en in de Zeeuwse wateren. Hij stelde daarbij vast dat het met de dijken in de bestudeerde wateren bepaald slecht gesteld was. Als een Cassandra, zoals hij het zelf observeerde,⁴ waarschuwde hij dat de dijken te laag zouden blijken, zodra er een werkelijk grote storm zou opsteken. Zijn alarmberichten leidden tot de instelling van een Stormvloedcommissie in 1939 en het in studie nemen, na de Tweede Wereldoorlog, van een drie-eilanden en een vijf-eilandenplan. In 1947 besloot deze commissie zelfs een schaalmodel van het hele Deltagebied te laten aanleggen door het Waterloopkundig Laboratorium. Na de watersnoodramp van 1953 stond men hier dus onmiddellijk klaar om een Deltaplan te formuleren en uit te voeren. Van Veen is vanwege die vooruitziende blik wel de vader van het Deltaplan genoemd. Het was inderdaad zijn idee, en hij werd ook secretaris van de op 18 februari 1953 ingestelde Deltacommissie, maar wat onderzoek betreft sponnen vooral Thijsse en het Waterloopkundig Laboratorium er garen bij. Zo moest Cassandra het aan de ene kant afleggen tegen het gezag van het rekenwerk van Dronkers, aan de andere kant tegen de invloedrijke Thijsse en zijn ingenieurs.

³ Het vraagstuk betrof het nooit aangelegde Koedoodkanaal, verbinding tussen Oude en Nieuwe Maas. Dit voorbeeld en de discussie tussen Van Veen en Dronkers is elders spannend beschreven [12], [13]

⁴ J. van Veen schreef in de oorlogsjaren op verzoek van J.A. Ringers een historisch overzicht. Naar eigen zeggen begon hij vanaf 1937 publiek lucht te geven aan zijn waarschuwingen: [32]



De Delta-commissie bij haar installatie in februari 1953. Op de eerste rij geheel links J. van Veen, geheel rechts J.A. Ringers en J.Th. Thijsse.

Deltadienst

Voor de uitvoering van de Deltawerken formeerde Rijkswaterstaat de Deltadienst en daarin werd het onderzoek van de Studiedienst Benedenrivieren ingelijfd: in de afdeling Waterloopkundig Onderzoek. H.A. Ferguson, afkomstig van die studiedienst, werd in 1955 hoofd van de afdeling Waterloopkundig Onderzoek. Hij had in 1945, bij de droogmaking van Walcheren, en in 1953, bij het sluiten van de Zeeuwse dijken, ervaren hoe wettelijk de getijdenberekeningen van Dronkers en het schaalmodellenonderzoek van Thijsse elkaar aanvulden en hoe nodig het was tussen deze theoretische onderzoekingen en het harde werk in de praktijk te bemiddelen.

“Bij de Deltawerken meenden wij in deze leemte te moeten voorzien en ervoer te moeten zorgen dat we ook zelf binnen de dienst over een team van deskundigen zouden kunnen beschikken, dat als trait d’union zou fungeren tussen de modellenwereld en de werkelijkheid op de werken.”

Ferguson stelde zich voor bij ieder project een ingenieur aan te stellen als tolk tussen theorie en praktijk:

“Deze pragmatische oplossing die nog uitging van het idee dat een ingenieur van vele markten thuis moet zijn, hield er echter onvoldoende rekening mee, dat de waterloopkunde zich juist in die tijd aan het ontwikkelen was van een algemene, nog aanschouwelijke wetenschap tot een conglomeraat van zich krachtig ontwikkelende specialismen, elk gericht op één onderdeel, zoals golven, stromingen, sedimenttransport en getijden.” ([14], p. 58)

Deze specialismen waren, het behoeft weinig

toelichting, sterk wiskundig getoonzet. De samenwerking in multidisciplinaire teams was kenmerkend voor de veranderende stijl van wetenschapsbeoefening in de jaren vijftig. Het wiskundig modelleren, dat hier ten volle doordrong, vroeg ook een pragmatischer aanpak dan de vroegere compromisloze werkelijkheidsapproximatie. Ferguson ervoer dit als een generatiewisseling.

“Tegenwoordig komt het samenwerken van een zo uiteenlopend gezelschap vaker voor, maar in de jaren vijftig was dit nog een betrekkelijk nieuwe ervaring. In de ingenieurswereld voerden toen bovendien nog tal van oudere gerenommeerde figuren de boventoon; zij waren nog gewend aan individueel optreden en persoonlijk domineren; zij voegden zich niet gemakkelijk in projectteams. We bevonden ons bij dit ontwerp op de grens tussen een oude en een nieuwe tijd, en we waren nog op zoek naar

een nieuwe weg. Dit aspect kreeg wellicht nog extra reliëf doordat bij dit project verscheidene bijzonder markante figuren elkaar ontmoetten, zowel van de oude als van de nieuwe stijl. Zo waren daar Eggink, Jansen en Thijsse van de oude garde, en Bischoff, Blokland, Bijker, Kuiper en Van de Velde, die men tot de jongeren mocht rekenen.” ([14], p. 62)

Het project waar Ferguson in deze laatste passage in het bijzonder op doelde, was het ontwerp van de Haringvlietsluizen, het spectaculaire Deltamonument, waar elk van de Rijkswaterstaatsdirecties graag zijn stempel op zou drukken. In het perspectief van de jaren vijftig, toen er nog geen twijfel was aan de afsluiting van de Oosterschelde, gold immers deze open beveiliging van het Haringvliet als het technisch meest spectaculaire kunstwerk.

De klapclub

De Deltawerken zorgden voor een sfeer van alle hens aan dek. Na de ramp van 1953 was er overigens van concurrentie nauwelijks sprake, hooguit van een competentiestrijd. Alle onderzoek was nodig en alle beschikbare deskundigheid werd ingeschakeld. Zo verwierf ook het Mathematisch Centrum (MC) in Amsterdam een aanzienlijke opdracht van de Deltacommissie, vanuit het MC gezien meteen de grootste klus in zijn bestaan [5]. Van al die Rijkswaterstaatsdirecties was het de Deltadienst — onder directeur Jansen — die het voortouw had bij het ontwerp van de Haringvlietsluizen.

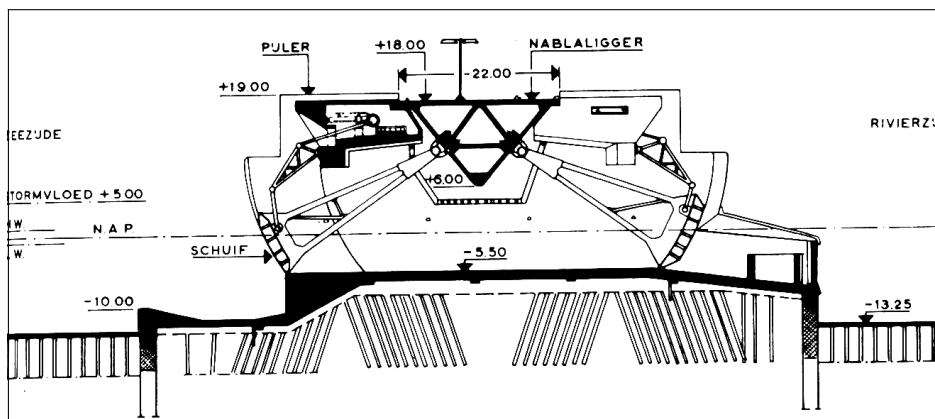
Hier wilden al die ‘markante figuren’ bij betrokken zijn. Een van Fergusons multidisciplinaire teams onder leiding van genoemde Bischoff, ir. W.C. Bischoff van Heems-



Een zeer vroege voorloper van het klapclub-onderzoek. Rijkswaterstaat bouwde in 1920 in de tuin van een van haar Haagse gebouwen een modelgoot om de golfploep te meten.

kerck, nam de golfoploop in beschouwing. Het team bestudeerde het 'dynamisch gedrag van de Haringvlietsluizen'. De spuisluizen kregen een bijzondere constructie om kleine schepen en eventueel ijs door te kunnen laten: een niet eerder beproefde constructie met grote stalen schuiven opgehangen aan een driehoekige betonconstructie, de 'nabla-ligger'. Deze constructie moest bestand zijn tegen de klappen van de oplopende golven en omdat golven een snel veranderend verschijnsel zijn kon de studie niet volstaan met statische berekeningen van een eenmalig uitgeoefende kracht, maar vereiste ze een dynamische beschouwingwijze. Zou de nabla-ligger bestand zijn tegen herhaalde klappen, dat was de vraag. Daarom heette dit team in de wandeling de 'klapclub'. P.Ph. Jansen, directeur van de Deltadienst, deed mee. W.J. van der Eb van de directie Bruggen (van Rijkswaterstaat) droeg bij door, met de hand, de eigenfuncties van de betonconstructies te berekenen. De uitkomsten van zijn eigen werk waren veel te globaal om echt iets bij te zetten, maar als waar teamlid haalde hij de fouten uit het werk van de anderen. F.K. Ligtenberg van het TNO-Laboratorium voor Experimenteel Spanningsonderzoek bestudeerde elastisch-hydraulische modellen. P. Kolkman van het Waterloopkundig Laboratorium bouwde in samenwerking met Rijkswaterstaat een schaalmodel van de stalen schuif. Men beproefde modellen in de windgolfgoot. J.C. Schönfeld rekende eraan met een elektrisch analogon. Vanuit het Mathematisch Centrum droegen A. van Wijngaarden en J. Zonneveld bij met berekeningen die deels op de computer werden uitgevoerd.

Men werkte eendrachtig en in wederzijds respect samen. Er waren wel kleine wrijvingen; zo konden de ingenieurs van de directie Bruggen er maar moeilijk toe gebracht worden om hun schuif niet te sterk te maken, opdat de liggers het — volgens voorschrift — in een storm niet eerder zouden begeven dan de schuiven. De klapclub stelde zich met zoveel woorden ten doel de verschillende reken- en modelleerbenaderingen te vergelijken. De eerder geschetste tradities kwamen inderdaad samen, het mathematisch rekenwerk van het MC, het schaalmodel van het WL, het analoog rekenen van Rijkswaterstaat en de wiskundige modellen van TNO. Ondanks al het goede en enthousiaste werk kwam het niet tot een synthese. Iedereen was ook te laat klaar. Het werk moest vanwege de noodzakelijke voortgang van de Deltawerken aanbesteed worden eer de klapclub in 1962 zijn onderzoeken voltooide. Tot een echte eva-



Schema van het ontwerp van de Haringvlietsluizen. In het midden de nabla-ligger (genoemd naar de karakteristieke ∇ -vorm), daaraan opgehangen de schuiven.

luatie kwam het dus ook niet. Een concurrentiestrijd van 40 jaar, sinds de Staatscommissie Lorentz, eindigde zonder winnaar of verliezer.

Wiskundig modelleren

Het rekenen aan praktische fysische verschijnselen was inmiddels in andere gebieden met kracht ter hand genomen. Beroemd of berucht is de numerieke weersvoorspelling van Richardson [24], waarvoor hij de berekeningen uitvoerde met potlood op stukjes papier terwijl hij in de Eerste Wereldoorlog als hospitaalsoldaat achter de linies in Frankrijk lag. Zijn voorspelling, eigenlijk een 'naspelling', hindcast, was een daverende mislukking omdat hij — achteraf gezien — van een te onnauwkeurige begintoestand uitging (zie [35]). Richardson is in de wiskunde trouwens in meerdere opzichten bekend (inderdaad, de Richardson extrapolatie). Von Neumann heeft na 1945 Richardsons werk opgepakt en met behulp van de computer de eerste realistische weersvoorspelling gemaakt [6], [3]. Hansen, en in Nederland onder anderen Lauwerier en Leendertse, hebben zich in deze richting door meteorologische problemen laten inspireren [16]. Een ander voorbeeld van hard rekenwerk aan fysische verschijnselen is dat van Thom [29] die met de hand de laminaire stroming rond een cylinder uitrekende op basis van de Navier-Stokes vergelijkingen: het probleem van d'Alembert dus, maar nu goed. Tot in de jaren zestig zijn er voorbeelden geweest van dergelijk monnikenwerk, bijvoorbeeld een berekening van stroming in de kanalen van een Gronings waterschap, waaraan één man een half jaar fulltime gewerkt heeft. Met behulp van rekenlinealen en (electro)mechanische tafelrekenmachines werden dergelijke berekeningen tot ver na de Tweede Wereldoorlog uitgevoerd, in Nederland door groepen bestaande uit 5

tot 10 rekenaar(ster)s: de meisjes van Van Wijngaarden op het MC, de rekenaars van Dronkers bij Rijkswaterstaat en die onder leiding van Benthem en Burgerhout bij het Nationaal Luchtvaart Laboratorium (NLL).

In 1960 werd J.Th. Thijsse als directeur van het Waterloopkundig Laboratorium opgevolgd door H.J. Schoemaker. Het WL was steeds het bolwerk van schaalmodellen geweest. De mathematische benadering liet men over aan de mensen van Rijkswaterstaat, in het bijzonder aan Dronkers en zijn groep. Schoemaker had in de jaren vijftig, net als Ferguson, de groei van de sterk wiskundige specialismen in de waterbouw opgemerkt en verbond consequenties aan het groeiend succes van de rekenende benadering. Dat succes had natuurlijk veel te danken aan de beschikbaarheid van de eerste rekenautomaten. Waar men voorheen — om überhaupt binnen de tijd van een mensenleven tot resultaat te komen — moest vereenvoudigen en afknotten tot er een nauwelijks meer realistisch resultaat overbleef, was men nu in staat tot veel uitgebreider berekeningen waarin niet op voorhand iedere kwadratische term geschrapt hoefde te worden. De specialismen waren beperkter, omdat ze de vraagstellingen nog maar onder één of enkele aspecten beschouwden, ze waren ook flexibeler dankzij de pragmatische stijl van wiskundig modelleren. De getijmodelleerders en de betonmodelleerders konden gemakkelijker met elkaar overweg door zich te realiseren dat ze geen van beiden de waarheid in pacht hadden, maar ieder in een team iets bijdroegen. Misschien was dat de grootste betekenis van de klapclub. Het was een tendens in de wetenschap die in Delft ook zichtbaar werd in de wiskundig ingenieursopleiding, door R. Timman vormgegeven, gestart in 1956, en in de zogenaamde theoretische afstudeerrichtingen bij de andere oplei-



Schaalmodel van de Haringvlietsluizen in het Waterloopkundig Laboratorium in De Voorst. De ingenieur zit op het model van de nabla-ligger.

dingen. Rond diezelfde tijd waren er dus afgestudeerde wiskundig ingenieurs, wiskundig modelleerders van nature, beschikbaar. Toen Schoemaker eenmaal directeur was geworden van het Waterloopkundig Laboratorium zette hij in bescheiden omvang in op wiskundig onderzoek, wiskundig modelleren, naast de schaalmodellen die nog immer de hoofdstroom vormden.

Mekong

De revolutie op dit terrein kwam echter van buiten. De UNESCO had een groot plan ontwikkeld om het water in de delta van de Mekongrivier het gedeelte in Vietnam en Cambodja beter te beheersen. Dit zou mogelijk worden door het meer Tonle Sap in Cambodja als opslagreservoir te gebruiken. Het doel was zowel overstromingen te voorkomen als de voedselproductie te verhogen. Een aanzienlijke opschudding ontstond in de waterloopkundige wereld toen UNESCO de opdracht om



De Haringvlietsluizen in de winter. De openingen moesten breed zijn — en daarom de nabla-ligger heel sterk — met het oog op eventuele ijsgang, maar die heeft zich in de praktijk nooit voorgedaan.

dit project met een onderzoek voor te bereiden, niet gunde aan een van de bekende schaalmodellenlaboratoria, maar aan het Franse Sogréah in Grenoble, dat een wiskundig model had aangeboden. Het is later beschreven door Zanobetti en Lorgéré [40]. De opzet was, al of niet bewust, in hoge mate verwant aan die van Lorentz: het gebied werd in vakjes verdeeld op basis van lokale kenmerken zoals dijken of wegen, onderling verbonden door kanaaltjes en stuwen. Men kan zich ongezien voorstellen hoe de natuurlijke situatie van rijstvelden en dijkes uitnodigt tot deze opzet. De vergelijkingen werden niet harmonisch maar door tijdintegratie opgelost. De ordening van de vakjes werd zo gekozen dat een groot blok-tridiagonaal stelsel ontstond, dat in iedere tijdstap met het bekende Thomas algoritme werd opgelost, een opvallend moderne aanpak. Sogréah schafte speciaal met het oog op dit project een computer aan, een IBM 704 — toen een van de krachtigste 'grote rekenmachines'. Het Mekong-model is tot voor kort in gebruik geweest, hoewel er van het oorspronkelijke idee niets is uitgevoerd door de politieke lotgevallen van Zuidoost-Azië.

Deze gebeurtenis gaf de stoot tot een wereldwijde heroriëntatie van de hydraulische laboratoria op wiskundige modeltechnieken, waarin de ideeën van Van Veen, Dronkers en Schönfeld direct of indirect alsnog hun erkenning kregen. Hun rekenwerk aan vereenvoudigde, voor een groot deel gelineariseerd beschreven compartimenten van Zuiderzee en benedenrivieren, kreeg in het Ton-

le Sap-project een vervolg dat — geïnspireerd door de Vietnamese werkelijkheid van natuurlijke compartimentering — wiskundig gezien heel dicht bij de eindige-elementenmethode kwam. De bijbehorende wiskundige modellen waren veel handzamer dan de eerdere benaderingen. In combinatie met de toegenomen rekenkracht van de computers leverde dit een succesvol voorbeeld van wiskundig modelleren op, een doorbraak in de civiele techniek. De waterloopkunde was met de doorbraak van het wiskundig modelleren relatief laat, later dan bijvoorbeeld de vliegtuigbouw, de meteorologie, de operations research of de mathematische statistiek. De doorbraak voltrok zich vervolgens snel en heden ten dage is de situatie vrijwel helemaal omgekeerd: de hydraulisch adviseurs werken grotendeels met wiskundige modellen tenzij dat door onbekendheid van de fysische processen echt niet mogelijk is. Schoemaker bleek met zijn inzet op de wiskunde een vooruitziende blik te hebben gehad.

Mathematisch Centrum

Uit de zijlijn had zich het wiskundig modelleren reeds aangekondigd in de waterbouw, namelijk in de bijdragen van het Mathematisch Centrum aan het advies van de Deltacommissie, maar het raakte nog niet de kern van die technische praktijk. In 1953 had het Centrum door alert initiatief van Van Dantzig en dankzij zijn goede connecties met Van Veen die secretaris van de Deltacommissie was geworden, een omvangrijk cluster van opdrachten van de commissie verworven [5], [39] waarin het wiskundig modelleren een essentiële rol speelde. De windgedreven stroming in de Noordzee werd aanvankelijk door Lauwerier en Van Dantzig analytisch benaderd in een reeks artikelen onder de noemer Het Noordzeeprobleem. Uiteindelijk werd toch de rechtstreekse numerieke aanpak gekozen [19]. Als modelleerexercitie maakte de econometrische behandeling de meeste indruk van dijkhoogte, economisch verlies, verlies aan menselijke levens en kosten van de investering in hun onderlinge relaties. Van Dantzig en Kriens betraden hier onbekend terrein en toch wisten ze er iets zinnigs over te zeggen [8]. Het bleven overigens adviezen van algemene strekking. Hoewel Hemelrijk vanuit het MC zijn *finest hour* beleefde, toen op grond van zijn mathematische statistische berekeningen [9] en overtuigingskracht de Deltahoogte voor de dijken een halve meter hoger werd gesteld dan de gevestigde ingenieurs nodig hadden geoordeeld, drong het wiskundig modelleren nog niet door tot het hart van de waterloopkunde.

Stochastiek

Reeds in de 16e eeuw werd nagedacht over de hydraulische randvoorwaarden van dijken. Andries Vierlingh deed in 1570 de beroemde uitspraak "De meeste salicheijt hanght aen de hoochte van eenen dijk" en formuleerde de randvoorwaarden van dijkontwerpen avant la lettre [34], [17]. De ontwikkeling van de probabilistiek in de waterloopkunde kwam tot stand door Amerikaanse onderzoekers in het begin van de 20e eeuw. In Nederland werd de statistiek van dijkhoogten in de dertiger jaren opgepakt door Begemann [4] en Wemelsfelder [38], ingenieurs van Rijkswaterstaat.

De bouw van de stormvloedkering in de Oosterschelde in de jaren zeventig en tachtig was wereldwijd een van de eerste grote projecten waarin het ontwerp op probabilistische leest geschoeid werd [20], [37]. Met enig pathos kan men zeggen dat hier aan de traditie van het hydraulisch werk van Daniel Bernoulli die van de kansrekening van zijn oom Johan Bernoulli werd toegevoegd. Hier ontmoetten de Laplace van de waarschijnlijkheidsrekening en dezelfde Laplace van de hemelmechanica en de getijden elkaar weer.

Scenario's

Van Dantzig had met zijn economisch beslissingsprobleem een eerste verkenning gewaagd op het terrein van de wisselwerking van modelleren en politiek. In 1974 leidde een omslag in het denken over de afsluiting van de Oosterschelde tot een regelrechte botsing tussen techniek en politiek. Dat was een van de eerste gevallen waarin naast veiligheid ook andere waarden zoals natuur, milieu en cultuurbezit een beslissende rol gingen spelen, een wezenlijk nieuwe aanpak. Eenmaal op het spoor van wiskundig modelleren — waarbij vooral in de economische beslissingsproblemen ook het politieke karakter naar voren kwam — zette men ook in de waterbouwkunde de stap naar het in de beschouwing betrekken van de politieke overwegingen. Realiseert men zich dat wiskundige modellen afgestemd zijn op deze of gene politieke doelstelling, dan komen de scenario's in het vizier. Zo traag als de waterbouw was geweest met de receptie van het wiskundig modelleren, zo vlot was ze met het scenariodenken. Daarin is een reflectiestap verder gezet. De verhouding tussen enerzijds technische en wetenschappelijke kennis en anderzijds politieke besluitvorming is zelf mede onderwerp van studie.

PAWN

Niet de veiligheid ten opzichte van de zee, niet de afvoer van rivierwater, maar het hele beheer van water in Nederland nam Rijkswaterstaat in 1976 tot onderwerp van een beleidsstudie. Het ging over veiligheid en scheepvaart, over regenval en droogte, over landbouw en economie. De Club van Rome had in 1969 de toon gezet met zijn wereldmodellen en scenario's. Rijkswaterstaat volgde en verstrekte een tweetal opdrachten in verband met de Oosterschelde, POLANO en BARCON. In 1976 volgde een grote zeer groots opgezette beleidsstudie, PAWN, Policy Analysis of Watermanagement in The Netherlands. PAWN was een opdracht aan de Amerikaanse RAND-corporation; RAND was de verzelfstandigde rekencentrum en OR-afdeling van het Amerikaanse leger. Van Nederlandse zijde deed ook het Waterloopkundig Laboratorium mee. Met een zeer uitgebreid multidisciplinair team dat van de kant van Rijkswaterstaat onder leiding stond van J.W. Pulles, produceerde RAND een serie van twintig rapporten [15]. Nu was er niet alleen empooi voor ingenieurs en wiskundigen, maar ook voor sociologen en politologen, milieudeskundigen en economen. Alles, inclusief het hele beleid van Nederland ten aanzien van het water, had zijn plaats gekregen in de modellen. De scenariostudies deden een enorme claim op de politiek en de besluitvormingsprocedures. De pretentie van alomvattendheid spat ervan af, ook voor wie na 25 jaar de verschillende deelstudies raadpleegt.

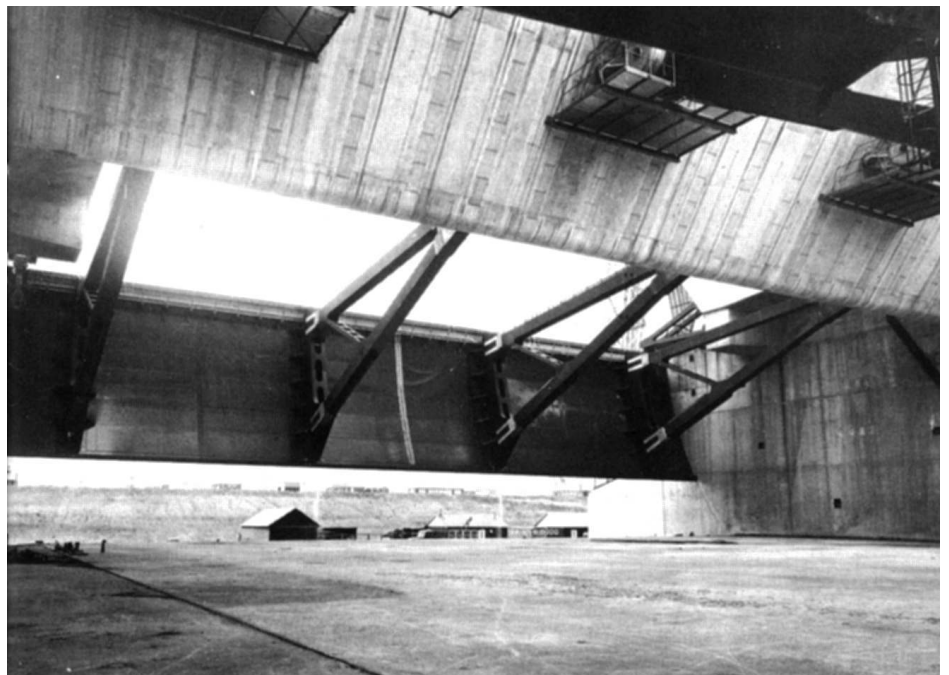
Epiloog

PAWN was het hoogtepunt en een voorlopig eindpunt van het ontwikkelen van steeds flexibeler theorieën, steeds pragmatischer wiskundige modellen en steeds rigouzeuzer rekenwerk. De alomvattende aanpak van PAWN is hier gebruikt maar ook weer verlaten. Wel is de integratie van technisch-fysische en socio-economische aspecten van beslissingsproblemen blijvend in de belangstelling blijven staan en wordt er hard aan gewerkt om deze op de 'juiste' wijze in wiskundige modellen te vangen.

Het gat tussen hydrodynamici en hydraulici, dat in de 19e eeuw is ontstaan en in het begin van de 20e waarschijnlijk alleen nog maar gegroeid, lijkt inmiddels wel gedicht te zijn. De inzet van computers heeft het mogelijk gemaakt ook de meer complete theorieën ook werkelijk toe te passen. Maar hoe goed moeten wij eigenlijk modelleren? Stevin [27] gaf daar al een antwoord op. De theorie is volgens hem volmaakt en de praktijk altijd beperkt. Hoever moeten we in de praktijk nu gaan in ons streven de perfectie van de theorie te benaderen:

"inde daet [praktijk] alwaermen deur nauwer toesicht de volcommenheyt der spiegheling [theorie] so na mach commen, alsde saecks einde tot smenschen ghebruyck vereyscht."

Met andere woorden: een model moet zo perfect als voor het doel dat men op dat moment dient, vereist is.



De Haringvlietsluizen in aanbouw met de nabla-ligger in beton.

De steeds toenemende reken capaciteit en geavanceerder mathematische schema's in de waterloopkunde voeden het vertrouwen dat hiermee de werkelijkheid in het vizier komt. Het is de vraag of dit correct is, aangezien

er inmiddels op allerlei gebieden grenzen aan de voorspelbaarheid zijn geconstateerd — denk maar aan de meteorologie. Bovendien, wat er gedaan wordt is simuleren van de werkelijkheid en in hoeverre begrijpen we

iets als we het kunnen simuleren? De oude vraag naar de wiskunde als model dan wel als benadering van de waarheid lijkt daardoor opnieuw actueel. ◀

Literatuur

- 1 G. Alberts, *Wiskunde en praktijk in historisch perspectief*. CWI, Amsterdam, 1994
- 2 G. Alberts, *Jaren van berekening. Toepassingsgerichte initiatieven in de Nederlandse wiskunde-beoefening 1945–1960*. AUP, Amsterdam, 1998
- 3 W. Aspray, *John Von Neumann and the Origins of Modern Computing*, MIT Press, Cambridge (Mass.), 1990.
- 4 S.H.A. Begemann, 'Toepassing van de waarschijnlijkheidsleer op hydrologische waarnemingen', *De Waterstaatsingenieur*, januari 1931.
- 5 *Beschouwingen over stormvloed en getijbeweging*. Rapport Deltacommissie Deel 3: Bijdragen II, Mathematisch Centrum. SDU, 's-Gravenhage, 1961.
- 6 J.G. Charney, R. Fjørtoft, J. von Neumann, 'Numerical integration of the barotropic vorticity equation', *Tellus* **2**, 1950, 237–254.
- 7 Hardy, Cross, 'Analysis of flow in networks of conduits or conductors', Univ. Illinois Eng. Exp. Station, Bull. 286, 1936.
- 8 D. van Dantzig, 'Econometric decision problems for flood prevention', *Econometrica*, **24**, 1956, 276–287.
- 9 D. van Dantzig, J. Hemelrijk, 'Extrapolatie van de overschrijdingslijn van de hoogwaterstanden te Hoek van Holland met behulp van geselecteerde stormen', in: *Beschouwingen* . . . , 1961, 7–56.
- 10 J.M. Dirkzwager, *Water - van natuurgebeuren tot dienstbaarheid*. M. Nijhoff (uitgegeven t.g.v. 50-jarig bestaan van het WL), 's-Gravenhage, 1977.
- 11 J.J. Dronkers, *Tidal computations, in rivers and coastal waters*, North Holland Publ., Amsterdam, 1964.
- 12 J. van den Ende, *The Turn of the Tide. Computerization in Dutch Society 1900–1965*. Delft University Press, Delft, 1994.
- 13 J. van den Ende, F. de Jong, 'Rekenen aan waterstromen; getijdenonderzoek in Nederland, 1920–1950', in: *Jaarboek voor de Geschiedenis van Bedrijf en Techniek*, **6**, 1989, 191–209.
- 14 H.A. Ferguson, 'Delta-Visie; Een terugblik op 40 jaar natte waterbouw in Zuidwest-Nederland'. Ministerie van Verkeer en Waterstaat *Rijkswaterstaatsserie* **49**, 1988.
- 15 B.F. Goeller (ed.), *Policy Analysis and Water Management in The Netherlands Vol I–XX*. RAND Corporation, Santa Monica, 1983–1986.
- 16 W. Hansen, 'Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen', *Tellus* **8**, 1956, 287–300.
- 17 P. Huisman, 'De meeste salicheit hangt aan de hoogte van eenen dijk; maatschappelijke implicaties van hydraulische randvoorwaarden (Presentatie Randvoorwaardenboek)', Wijk bij Duurstede, September 1996.
- 18 A.J. Kox, 'Hendrik A. Lorentz', in: *Van Stevin tot Lorentz*, A.J. Kox (red.). Bert Bakker, Amsterdam, 1990, 226–242.
- 19 H.A. Lauwerier, B.R. Damsté, 'The North Sea problem VIII; A numerical treatment', *Proc. KNAW* **A66**, 2, 1963.
- 20 A. Paape, J. Stuij and W.A. Venis, *Hydraulic aspects of coastal structures*. Delft University Press, Delft, 1980.
- 21 *Rapporten en mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken No 2. De uitvoering der Zuiderzeewerken in het tienjarig tijdvak 1919–1929*. Ministerie van Waterstaat, 's-Gravenhage, 1929.
- 22 *Rapporten en mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken 4. Modelproeven in het waterbouwkundig laboratorium te Delft betreffende sluisen in andere kunstwerken*. Ministerie van Waterstaat, 's-Gravenhage, 1932.
- 23 Th. Rehbock, *Rapporten en mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken No 3. Wasserbauliche Modellversuche zur Klärung der Abflussscheinungen beim Abschluss der Zuiderzee ausgeführt im Flussbaulaboratorium der Technische Hochschule zu Karlsruhe*. Ministerie van Waterstaat, 's-Gravenhage, 1931.
- 24 L.F. Richardson, *Weather prediction by numerical process*. Cambridge Univ. Pr., London, 1922. (reprint edition: E. Crone e.a. *The Principle Works of Simon Stevin*, 5 Vols., Swets & Zeitlinger, Amsterdam, 1955–1966, Vol. 5, Wijsentijt.
- 25 H. Rouse, S. Ince, *History of Hydraulics*. Dover Publications, New York, 1957.
- 26 J.C. Schönfeld, 'Analogue of hydraulic, mechanical, acoustic and electric systems', *Appl. Scient. Res. B* **417**, 1954.
- 27 S. Stevin, 'Vant menghen der spiegheling en daet', in: *Wisconstighe Ghedachtenissen*, 1608. Reprint edition: E. Crone e.a. *The Principle Works of Simon Stevin*, 5 Vols., Swets & Zeitlinger, Amsterdam, 1955–1966, Vol. 5, Wijsentijt.
- 28 J.Th. Thijsse, 'De verwachtingen omtrent de waterbeweging bij de afsluiting van de Zuiderzee op grond van de verslag der Staatscommissie-Lorentz en van de verrichte modelmetingen', in: *De Ingenieur* **42-33** 1927, 723.
- 29 A. Thom, 'The flow past circular cylinders at low speeds', *Proc. Roy. Acad. London* **141**, 1933, 651–669.
- 30 J. van Veen, 'Getijstroomberekening met behulp van wetten analoog aan die van Ohm en Kirchhoff', *De Ingenieur* **52**, 1937, B73-82.
- 31 J. van Veen, 'Electrische nabootsing van getijden', *De Ingenieur* **58**, 1946, B70-73.
- 32 J. van Veen, *Dredge, drain, reclaim; the art of a nation*. Martinus Nijhoff, Den Haag, 1948/1, 1962/5.
- 33 *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*. Landsdrukkerij, 's-Gravenhage, 1926.
- 34 A. Vierlingh, *Tractaet van dyckagie*, 1570; uitgegeven door J. de Hullu, A.G. Verhoeven. Nijhoff (*Rijks geschiedkundige publicatien, kleine serie no. 20*), 's-Gravenhage, 1920.
- 35 C.B. Vreugdenhil, 'Richardson, mathematical modeller', in: *Dynamics of Atmosphere and Oceans* **20**, 1994, 211–225.
- 36 C.B. Vreugdenhil, P.A. Kolkman, G. Abraham, 'Simulation of hydraulic phenomena in the 20th century', in: G. Garbrecht (ed.) *Hydraulics and Hydraulic Research — A Historical Review*, IAHR, Delft, 1985, 329–344.
- 37 J.K. Vrijling, 'Development in probabilistic design of flood defences in the Netherlands', in: Ben Chie Yen, Yeou-Koung Tung (eds.) *Reliability and uncertainty analysis in hydraulic design*, 1987, 133–178.
- 38 P.J. Wemelsfelder, 'Wetmatigheden in het optreden van stormvloed', *De Ingenieur* **54** (3 maart 1939), 468.
- 39 P. de Wolff, 'Het Delta-plan en de wiskunde', in: G. Alberts, H.J.M. Bos, J. Nuis (eds.) *Om de wiskunde. Stimulansen voor toepassingsgerichte wiskunde rond 1946*, CWI, Amsterdam, 1989, 35–50.
- 40 D. Zanobetti, H. Lorgéré, 'Le modèle mathématique du delta du Mékong', in: *La Houille Blanche* **23**, 1968, 17–30, 255–269, 363–378.