

Oratie

Leo Maas

Mare Incognitum

Leo Maas (1956) werd geboren in Dordrecht. Na een studie natuurkunde aan de Universiteit Utrecht, toegespitst op de natuurkunde van de oceaan, is hij daar in 1987 gepromoveerd op een onderzoek naar 'getij-topografie interactie in ondiepe zeëen'. Hij is daarna gedurende twee jaar, als post-doctoraal onderzoeker aangesteld bij het NIOZ, alwaar hij vervolgens vaste onderzoeker werd. In 1992-1993 is hij een jaar in Canada bij de Universiteit van Victoria als gast-onderzoeker werkzaam geweest. Naast oppervlakte- en onderwatergolven, richt zijn belangstelling zich op de ontwikkeling van eenvoudige conceptuele modellen van oceanografische processen en de toetsing daarvan in laboratorium- en zeegeande experimenten.

Universiteit Utrecht



Mare incognitum

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt
van bijzonder hoogleraar Golfdynamica van de Oceaan
bij het departement Natuur- en Sterrenkunde
aan de Bètafaculteit van de Universiteit Utrecht
op maandag 11 mei 2009

door

Prof. dr. Leonardus Richardus Marie Maas

Mijnheer de Rector, leden van het bestuur van het NIOZ Koninklijk Nederlands Instituut voor Zeeonderzoek, collega's, familie, vrienden en gewaardeerde overige aanwezigen:

"Mare incognita, mare incognitum..": over de juiste schrijfwijze van de titel van deze oratie bestond enige verwarring, althans bij mij. Het illustreert wellicht de vraag die ik hier aan de orde wil stellen, namelijk: "kennen wij de zee?" 'Maar', zult u zich wellicht ongerust afvragen, 'als zelfs over de *schrijfwijze* van de titel verwarring bestaat, moet dan ook iedere volgende uitspraak in twijfel getrokken worden?' Hmm, ik denk dat dat inderdaad gepast zou zijn. Twijfel moge voor de leek synoniem zijn met dom- of onwetendheid, voor de wetenschapper is het daarentegen een nobele eigenschap waar niet lichtzinnig afstand van gedaan wordt. Alleen kennis die bestand is tegen steeds hernieuwde aanvallen van twijfel en tegenargumenten blijkt, aldus gelouterd, van blijvende waarde.

Maar, laat ik terugkeren naar de vraag die mij bezighoudt: "Kennen wij de zee?" En wat betekent dat 'kennen' eigenlijk? Hoe *kennen* wij überhaupt? Wel, in de eerste plaats kennen wij van buiten af, door zintuiglijke waarneming - en met behulp van 'gevoelige' instrumenten die daar een verlengstuk van vormen. Zicht en gehoor stellen ons in staat via licht- en geluidsgolven op afstand waar te nemen; reuk, smaak en tastzin voornamelijk via contact, door geleiding en uitwisseling van stoffen. Daarnaast, menen sommigen, kennen wij ook van binnen uit: wij zouden beschikken over een zesde zintuig, dat staat voor 'intuïtie', voor 'inzicht', of voor een niet-nader omschreven 'voorgevoel'.

In de wetenschap wordt deze tweedeling in feite ook gemaakt. 'Meten is weten' luidt een aloude spreuk. Beeldvorming door het vergaren van een object's uitwendige prikkels staat bekend als 'observatie', of 'waarneming'. Daartegenover staat kennis die van binnen uit verworven is, door speculatie over innerlijke samenhang van een object, en door modelvorming daarvan. Deze leidt tot voorspelling, de tegenhanger van het 'voorgevoel'. Deze vorm van kennis staat bekend als 'theorie'.

Ik zal het verschil toelichten met mijn eerste oceanografisch getinte ervaring. Deze bestond uit tochtjes naar het strand met mijn ouders, broers en zussen. Daar zagen wij de golven steeds op ons toerollen, golven die vlak voor het strand braken. Als je in de branding ging zwemmen kon je de klap van zo'n breker vermijden door er onderdoor te zwemmen. Hoe dieper je zwom, hoe meer de golf gedempt was. Naast zien, horen en voelen, speelde echter ook inzicht mee. Mijn vader wees erop dat golven ook water meebrengen naar de kust; water dat vervolgens terugstroomt. Hij waarschuwde dat als je in zo'n terugstroom, een mui, terecht kwam, je daar niet tegenin moest gaan, maar dat je eerst moest meezwemmen, zelfs als je naar beneden werd gezogen, om pas daarna, als je dan tenminste nog niet verdrongen was, zijwaarts weg te zwemmen.

Begrip over waarom golven onder water zwakker worden, of waarom iedere zevende golf een hoge golf is, kwam pas veel later. Ik kon toen niet weten dat die andere intrigerende golf-asymmetrie mij nog jaren zou bezighouden, namelijk dat golven altijd alleen maar naar de kust toe lijken te bewegen, en niet er vandaan. Het is alsof de kust golven aantrekt, een verschijnsel dat ik om die reden later een golf aantrekker ben gaan noemen. Ja, er zit natuurlijk geen magneet in de kust, maar golven die er onder zekere hoek op invallen bewegen boven het ondiepere deel, nabij

de kust, langzamer, waardoor ze naar de kust toe zwenken. Ze worden hoger en steiler, zodat ze uiteindelijk vaak breken. Deze branding vormt een onomkeerbaar proces, waardoor ook de golven niet meer kunnen omkeren. Golfaantrekkers lijken, op een manier waar ik later op terugkom, ook de diepzee te kunnen structureren. Zij kunnen daar voor *onderwater-branding* zorgen, een verschijnsel waar de bemanning van een onderzeëer eens op hardhandige wijze achter kwam toen hun onderzeëer, hoewel op grote diepte, de bodem werd ingedrukt.

Omgevingswaarneming tegenover experiment

Observatie zowel als theorie leiden dus tot een toename in kennis. Observatie kan zelf nog in twee vormen onderscheiden worden. Ten eerste, in de ongerichte omgevingswaarneming, simpelweg door het openstellen van onze zintuigen; en ten tweede in de doelgerichte waarneming, het onder gecontroleerde omstandigheden uitvoeren van een experiment. Omgevingswaarneming geeft ons weliswaar kennis van het geheel, een *holistisch* beeld, maar geeft geen begrip over oorzaak en gevolg, omdat allerlei processen door elkaar heen lopen. Het is niet duidelijk welk proces wat veroorzaakt. Vragen die politiek en samenleving aan de wetenschap stellen, zoals met betrekking tot zeespiegelstijging of klimaatverandering, hebben meestal betrekking op dat geheel. Maar de gewetensvolle wetenschapper kan holistische vragen vaak niet eenduidig beantwoorden omdat de problematiek te complex is. Als deze immers de onderliggende, simpele vragen al niet beantwoorden kan, hoe kan hij of zij dan iets betrouwbaars zeggen over zaken waarin diverse processen door elkaar heen lopen en op elkaar inhaken? De essentie zit in de details. De geschiedenis heeft uitgewezen dat begrip over oorzaak en gevolg met name verkregen wordt wanneer de complexiteit van de werkelijkheid zodanig gereduceerd wordt dat slechts één enkel proces bepalend is, een *reductivistische* benadering.

Dood-water

Laat mij een voorbeeld geven van de manier waarop observatie, theorievorming en experimentele toetsing gezamenlijk oceanografisch inzicht hebben opgeleverd.



Figuur 1: Poolonderzoeker Fridtjof Nansen en zijn schip, de Fram.

Eind negentiende eeuw probeerde de Noor Fridtjof Nansen met zijn schip, de *Fram*, als eerste de Noordpool te bereiken. Hoewel er genoeg wind stond merkte Nansen dat de *Fram* in de Noorse fjorden soms ineens tot stilstand kwam, alsof het schip aan de grond liep. De peilstok gaf echter aan dat er nog voldoende water onder de kiel stond. Navraag bij de bemanning leerde dat dit een bekend verschijnsel was. De suggestie dat het schip de bodem raakte was soms zo sterk dat er schepen voor reparatie naar het dok waren gestuurd, om daar tot de conclusie te komen dat er met het schip helemaal niets mis was. De toestand van bewegingsloosheid waarin het schip soms gevangen werd kon uren duren. Het verschijnsel werd door zeelieden 'dood-water' genoemd, naar de levenloze aanblik die het water bood, veroorzaakt doordat schip en

water precies even snel bewogen. Dit gebrek aan snelheidsverschil had als nare bijkomstigheid dat er ook geen druk meer op het roer stond, waardoor het schip stuurloos raakte. Nansen hoorde hoe kapiteins daarom van alles geprobeerd hadden om hun schip los te wrikken.

Sommigen hadden hun bemanning over het dek heen en weer laten lopen. Anderen hadden olie op het water laten gooien. Weer anderen hadden, in die typische reactie waarmee de mensheid het onbekende tegemoet pleegt te treden, op het water laten schieten! En toen was het water echt dood... Maar niets hielp. Bij terugkeer van zijn poging om de Noordpool te bereiken, die hij op 86° Noord moest staken, beschreef Nansen zijn dood-water ervaringen aan Vilhelm Bjerknes, een prominent meteoroloog uit die dagen. Deze kwam prompt met de volgende hypothetische verklaring:

De fjorden bevatten een dunne laag smeltwater van enkele meters dikte. Dit water heeft een lagere dichtheid dan het zoute oceaanwater waar het overheen stroomt. Het is 'lichter'. Het fjord is dus gevuld met twee op elkaar gelegen waterlagen die onderling nauwelijks mengen. Bjerknes vermoedde dat de enorme weerstand die het schip bijna tot stilstand bracht veroorzaakt werd doordat het schip onder water interne golven opwekte, op het grensvlak tussen beide watermassa's; golven die kennelijk nauwelijks merkbaar waren aan het oppervlak. Bjerknes liet het uitzoeken door zijn student, Vagn Walfrid Ekman, die later een zeer beroemd oceanograaf zou worden. Ekman begon met een gedegen literatuurstudie. Hij vond bij de Romeinse geschiedschrijvers Plinius en Tacitus beschrijvingen die hem ook aan dood-water deden denken. Ekman vermoedde dat de historische zeeslag in 31 voor Christus bij Actium, voor de kust van Griekenland, beslecht werd door ditzelfde verschijnsel. Daar verloor namelijk de vloot van Marcus Antonius en Cleopatra de slag van Octavianus, de latere Romeinse keizer Augustus, die over kleinere, maar wel veel wendbaardere schepen beschikte. Dit

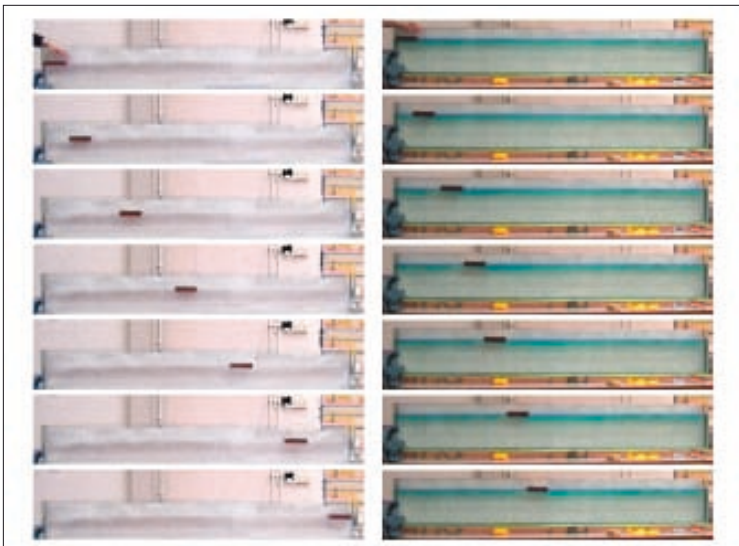
verlies werd in de Romeinse tijd geweten aan zuigvissen, *Remora*, die zich aan de romp van de grotere schepen zouden hebben vastgehecht en die hun kennelijk het manoeuvreren bemoeilijkten...



Figuur 2:
Zeeslag bij Actium, 31 voor Christus, waar dood-water een beslissende rol gespeeld kan hebben. Schilderij van Lorenzo A. Castro (1672).

Hoewel deze verklaring voor het mysterieuze dood-water verschijnsel in de oudheid afdoende was, was Ekman er niet tevreden over. Hij besloot daarom de hypothese van zijn leermeester in een laboratorium-experiment te toetsen, een experiment dat ik met enkele middelbare scholieren voor u heb nagedaan. Een 'scheepje' (een blokje hout) wordt met behulp van een dun draadje en een gewichtje van nog geen gram door een twee meter lange bak getrokken. Om het effect van de gelaagdheid te bestu-

deren is het experiment twee keer uitgevoerd. Eén keer in een bak met kraanwater en een tweede keer in een bak met een zoute en daardoor 'zwaardere' onderlaag, met daarbovenop een laag ongezouten water. Om onderwatergolven zichtbaar te maken is die bovenlaag blauw gekleurd. Net als Ekman vinden we dat in gelaagde omstandigheden een scheepje inderdaad vertraagd wordt als gevolg van opwekking van grensvlakgolven. Dit blijkt met name het geval wanneer de scheepssnelheid ongeveer gelijk is aan die van interne golven met een golflengte gelijk aan de lengte van het schip. Opvallend is dat het wateroppervlak zelf kennelijk niet verstoord wordt, precies wat het dood-water verschijnsel zo mysterieus maakte.



Figuur 3:
Momentopnames van twee identieke experimenten waarin een blokje hout door een bak water zonder (links) en met zout-gelaagdheid (rechts) wordt getrokken.

Natuurwetten

Om terug te komen op het vraagstuk “hoe kennen wij?” zien we dat in gezonde wetenschap waarneming en theorievorming voortdurend ‘in gesprek’ zijn. Een nieuwe waarneming kan ons beeld over de werking van een voorheen succesvolle theorie volledig veranderen. Aan de andere kant kan nieuw theoretisch inzicht dat weliswaar overeenstemt met alle bekende waarnemingen van een bepaald verschijnsel, toch een onverwachte voorspelling doen. Waarneming en theorie scherpen elkaar.

Maar nieuwe theorie wordt niet zomaar uit de mouw geschud. In de natuurkunde moet deze aan strenge wetten voldoen, gebaseerd op het principe dat er niet iets uit niets verschijnt, min of meer zoals in uw portemonnaie. Deze natuurwetten worden daarom ‘behoudswetten’ genoemd. De ontdekking van de natuurwetten vond hoogtepunten in de formulering van wetten voor de beweging van vaste stoffen en vloeistoffen, voor electromagnetische straling, en voor de allerkleinste en allergrootste structuren in het heelal. Theoretisch natuurkundigen stellen zich ten doel deze wetten te vinden. De vereniging van alle ons bekende krachten in één overkoepelende theorie wordt als de heilige graal van de natuurkunde gezien. Het bereiken van dat doel wordt echter bemoeilijkt doordat steeds extravagantere theoriën vaak niet tot voorspellingen weten te komen die door middel van experimenten te bevestigen of te ontkrachten zijn.

Rijk gedrag

Een andere invalshoek wordt dan ook gekozen door toegepast-natuurkundigen, die deze natuurwetten als gegeven beschouwen en die naar de consequenties zoeken. De oceanografie, de natuurkunde die de oceaan beschrijft, is zo’n toegepast natuurkundig vakgebied. Deze maakt gebruik van de door Newton voor puntdeeltjes ontwikkelde klassieke

mechanica, maar dan uitgebreid naar een veel-deeltjes systeem waarmee de beweging van vloeistoffen en gassen beschreven wordt. Voor de oceanografie en daarmee verwante meteorologie wordt dat de geofysische stromingsleer genoemd.

De wetten van de stromingsleer mogen dan bekend zijn, maar hun consequenties kunnen evengoed heel verrassend zijn. De vele interacties die deeltjes met elkaar kunnen hebben leiden tot terugkoppelingen die verantwoordelijk zijn voor 'rijk gedrag'. 'Rijk' in de zin van 'veelzijdig', of 'verfijnd'; min of meer de sensatie die men ondergaat bij een bezoek aan Venetië of Florence. Door het gebruik van bepaalde aannames kunnen namelijk uit de exacte, maar complexe wetten sterk vereenvoudigde modellen als goede benadering worden afgeleid. Onder verschillende omstandigheden geven deze een precieze beschrijving voor oceanografische verschijnselen zo divers als wervels, golven, stromingen, geluid en turbulentie. De rijkdom aan verschijnselen in de oceanografie en meteorologie moge blijken uit het feit dat deze vakgebieden ook de vindplaats vormden voor 'solitonen' en 'vreemde aantrekkers': concepten die relevant bleken in vele andere takken van de natuurkunde en daarbuiten. Heel in het kort is een soliton een soort golf, die niet heen-en-weer slingert, maar die, zoals de stam *solo* suggereert, uit één enkele golfkam bestaat. En als beeld van een vreemde aantrekker kunt u misschien denken aan een stad die in het weekend weliswaar een onweerstaanbare aantrekkingskracht uitoefent op jongeren van het omringende platteland, maar waarbij niet valt te voorspellen waar ze in de stad nu precies heengaan: naar kerk, koopgoot of kroeg.

Meervoudige evenwichten

De geofysische stromingsleer blijkt niet alleen veel verschillende verschijnselen te beschrijven, maar bovendien kan een en hetzelfde verschijnsel

zich onder gelijke omstandigheden op meerdere wijzen uiten. Ik zal dit toelichten met een anekdote.

Aan het begin van de negentiende eeuw vond in heel Europa het goedere transport plaats met behulp van trekschuiten. Deze werden getrokken door paarden die stapvoets over het jaagpad naast een kanaal sjokten. Op een dag schrok zo'n paard en sloeg op hol, de trekschuit achter zich aan sleurend. De koopman had veel moeite zijn paard onder appèl te krijgen. Na verloop van tijd lukte het hem weliswaar het paard tot in draf terug te nemen, maar niet tot in stap, evenwel zonder dat dit het paard ogenschijnlijk extra moeite kostte. Daarom arriveerde deze trekschuit veel eerder dan gewoonlijk op de plaats van bestemming. De koopman zag daar meteen de commerciële waarde van in en smeedde het tot recept. Voortaan werd bij het begin van een tocht een galop ingezet, om vervolgens de reis in draf voort te zetten. De Engelse scheepvaartautoriteiten, die hij op dit opmerkelijke verschijnsel wees, kwamen tot de conclusie dat het galopperende paard de trekschuit in planee bracht. Met andere woorden, terwijl de boot, als het paard stapvoets liep, tégen de boeg golf aan de voorkant van de boot in ploegde, surfte deze, als het paard in draf ging, op zijn eigen hekgolf, de golf achter de boot. De aanwezigheid van twee toestanden, gekenmerkt door hetzij een langzame, hetzij een snelle overtocht, kennelijk bij eenzelfde geleverde inspanning, vormt een illustratie van het verschijnsel dat 'meervoudige evenwichten' wordt genoemd. De snelheid die een boot moet zien te overbruggen om te gaan surfen op zijn eigen hekgolf, en om zo van een langzame een snelle overtocht te maken, heet 'rompsnelheid'. De weerstandshobbel die hierbij geslecht moet worden is analoog aan die welke Nansen en zijn mannen tegenkwamen bij hun pogingen om aan dood-water te ontsnappen. Deze is ook analoog aan de geluidsbarrière. Tijden veranderen, want ik voel mij genoodzaakt dat laatste begrip voor

de jongere toehoorders toe te lichten. Vroeger hoorde men op straat regelmatig een luide knal. Dat was een teken dat een laagvliegend vliegtuig de geluidsbarrière doorbrak. Tegenwoordig passeren vliegtuigen die barrière zo ver boven de grond dat zo'n knal nog maar zelden gehoord wordt, maar het moge duidelijk zijn dat bij zo'n passage veel geluidsgolven worden opgewekt. Dat dat ten koste gaat van veel extra energieverlies klinkt nog door in de termen 'barrière' en 'doorbreken'.

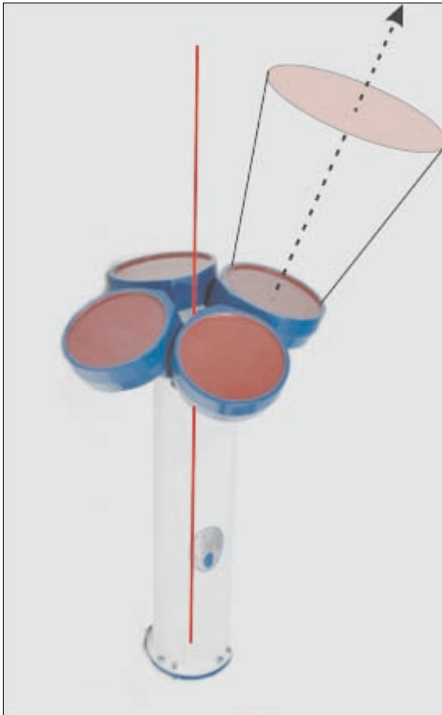


*Figuur 4:
Oceanografische wervel van zo'n 100 km doorsnede in de Zee van Ochotsk,
ten westen van het Siberisch schiereiland Kamtsjatka. De wervel wordt gevisuali-
seerd door ijschotsen en is gefotografeerd vanuit een vliegtuig (Wakatsuchi
en Ohshima).*

Kennis over de zee?

Maar, gegeven dat verschijnselen in zee zich 'rijk' en dus veelzijdig kunnen gedragen: wat weten wij dan eigenlijk over zee en oceaan? Qua geografische ligging en stromingspatronen is veel kennis van oudsher verkregen vanuit de scheepvaart. Later zijn daar waarnemingen op afstand, met behulp van satellieten bijgekomen, van bijvoorbeeld waterhoogte en temperatuur. Beiden laten echter vooral iets van het zeeoppervlak zien. De diepzee is veel minder toegankelijk. Ons zicht is daar beperkt; zelfs in helder water dringt licht hooguit een paar honderd meter door. Vandaar dat oceanografen andere manieren zoeken om zich een beeld te vormen van wat er onder water gebeurt. Bijvoorbeeld door geluid te gebruiken, dat verder doordringt. Zo maakt een moderne stroommeter gebruik van de reflectie van geluid aan bewegend materiaal om daarmee de snelheid van dat materiaal te bepalen. Uit de looptijd van het geluid wordt de afstand tot deze reflector bepaald, terwijl de snelheid van de reflector volgt uit de verschuiving van toonhoogte van uitgezonden en terugontvangen geluid. Deze meetmethode gebruikt het Dopplereffect, bekend van de toonhoogteverandering die een passerende ambulance teweegbrengt. Aannemend dat het meeste reflecterende materiaal niet zelf actief zwemt, maar passief met het water meestroomt, kunnen we zo de snelheid van het water meten, althans de snelheid in de kijkrichting. Door nu met drie of vier 'ogen' in verschillende richtingen te kijken, vinden we, door combinatie van de stroomsnelheden in deze richtingen, de driedimensionale watersnelheid langs hun middellijn. Hoe ingenieus ook, ik ben bang dat het ons nog niet echt een ruimtelijk beeld oplevert.

Met geluid kunnen we daarnaast, net als in een medische echo, een beeld van de 'patiënt', de zee, vormen door vanuit verschillende posities te luisteren. Maar ook deze waarneming kent zijn problemen omdat het geluid, net als licht in een luchtspiegeling, wordt afgebogen als gevolg



Figuur 5:

Stroommeter die gebruik maakt van het Doppler-principe. Het gebied dat een van de vier 'ogen' (oranje cirkels) bestrijkt is als kegel weergegeven; de kijkrichting is aangegeven door de pijl. Door combinatie van de stromingen in de vier kijkrichtingen wordt de watersnelheid langs de (rode) middellijn bepaald.

van dichtheidsverschillen: een akoestisch *fata morgana*.... Hierdoor is een deel van de zee wat ik maar 'ondoorhoorbaar' zal noemen. Kortom, in zee is op afstand waarnemen problematisch. Wat rest zijn contact-

metingen, vanaf een schip, of vanaf vrij drijvende of verankerde boeien. Op deze manier worden tegenwoordig onderwater temperatuur, zoutgehalte en stroming elektronisch gemeten en opgeslagen. Hoewel dit meetprincipe een hoge vlucht heeft genomen zeggen deze contactmetingen relatief weinig over hoe deze grootheden op enige afstand van het meetinstrument variëren. Hier wreekt zich dat de oceaan zo ontzettend groot is. Door zijn ondoorbaarheid, ondoorzichtigheid en volume horen, zien en voelen we van de zee minder dan van het heelal!

Maar kan theoretisch inzicht in de werking van zee en oceaan ons dan helpen om de ontbrekende kennis aan te vullen? Deze komt tenslotte regelrecht voort uit de veelvuldig geverifieerde wetten voor de stromingsleer. Daarin worden niet alleen de op grote afstand werkende krachten als zwaartekracht, of de door de draaiing van de aarde veroorzaakte Corioliskracht meegenomen, maar ook de op korte afstand werkende electromagnetische wisselwerking, die zich voordoet in de vorm van wrijving, leidend tot menging van naburige watermassa's. Zoals gezegd is de veelheid aan verschijnselen die met deze wetten op benaderende wijze te verklaren is, zelfs wanneer ze afzonderlijk beschouwd worden, verpletterend. Wanneer ze gezamenlijk voorkomen en wisselwerken, zoals op zee, is het doorgaans onbegonnen werk ze uiteen te rafelen. Dus als we op zee waarnemen, wat nemen we dan waar? En, als we de zee modelleren, wat zit er dan precies in onze theorie?

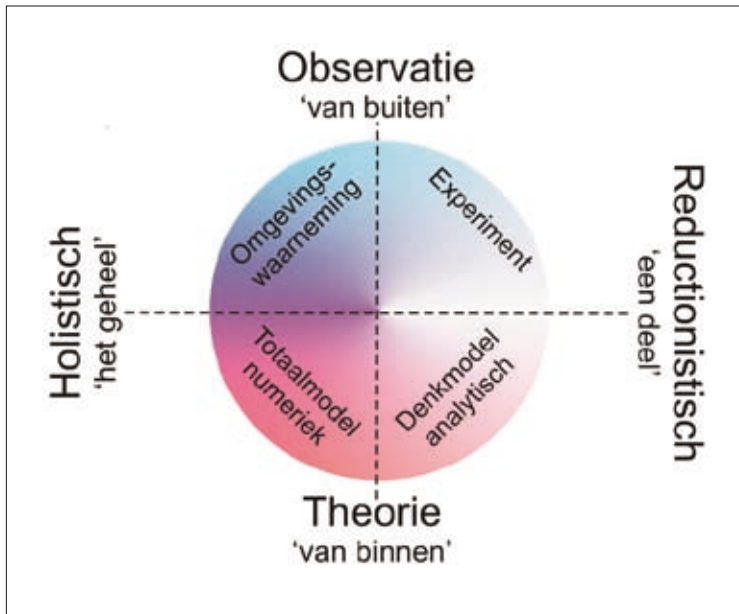
Theorie in numerieke modellen

Computermodellen lijken het best in staat al deze door elkaar heen spelende processen mee te nemen. Ik zal zo'n model daarom een 'totaalmodel' noemen. Maar ook computers kennen hun beperkingen. Als we in een computermodel processen oplossen die op oceaanschaal spelen, betalen we daar voor doordat we verschijnselen met schalen kleiner dan

zeg 10 km niet meer kunnen zien. Zo 'totaal' is zo'n model dus ook weer niet. Het meenemen van de invloed van die niet opgeloste processen wordt parametrisatie genoemd. Tekenend is dat alle wèl opgeloste, grootschalige verschijnselen behoorlijk kunnen veranderen wanneer we die parametrisatie anders kiezen. We nemen bijvoorbeeld aan dat grootschalige stroming energie verliest door meandering en afsnoering van wervels, en door opwekking van golven. Begrijpelijkerwijs zullen we, zelfs als deze wervels en golven te klein zijn om in ons totaalmodel mee te nemen, het effect daarvan op die stroming wèl willen modelleren, namelijk als een afremmend mengproces. Er zijn echter omstandigheden waarin wervels en golven deze stroming helemaal niet afremmen, maar juist aandrijven. Alsof je in een auto denkt op de rem te trappen, maar tot je schrik merkt dat je daarmee juist gas geeft. Begrip over wanneer en waar deze menging remt of juist aandrijft wordt alleen verkregen door dit proces te isoleren en vervolgens als module in te bouwen in een complexer model.

Theorie in analytische modellen

De kracht van computers, hun vermogen om heel veel wisselwerkingen te kunnen beschrijven, zelfs in een ingewikkelde omgeving, kan dus misleidend werken. De oceaanstroming die ze voorspellen kan net zo complex ogen als de oceaanstroming die we waarnemen. Maar is dat wel dezelfde complexiteit? En begrijpen we waarom deze optreedt? Onze hersenen zijn niet echt toegerust om het ene complexe veld van het andere te onderscheiden. Echt begrip over ingewikkelde terugkoppelingen in de oceaan ontstaat in denkmodellen waarin uit alle mogelijke wisselwerkingen de essentiële worden geïsoleerd. Ik prijs mij gelukkig de oceanografie voor een groot deel geleerd te mogen hebben van Sjef Zimmerman, die heel bedreven is in het verzinnen van dit soort denkmodellen. Zijn vermogen om eenvoud in modellen te combineren met fysisch inzicht is ongeëvenaard en dat heb ik als zeer stimulerend ervaren.



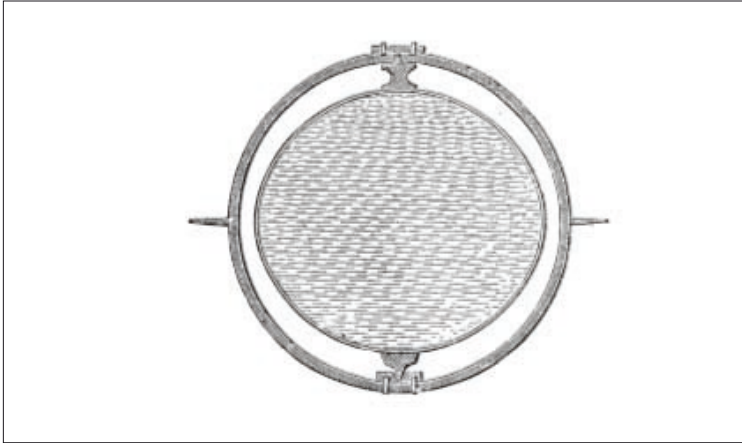
Figuur 6: Vier manieren om kennis te verwerven.

Kenniskwadranten

In antwoord op de vraag “hoe kennen we?” kunnen we stellen dat kennis zowel van buiten af verkregen kan worden, door observatie, als wel van binnen uit, door theorievorming. Beiden kunnen een holistisch of een reductionistisch karakter hebben, wanneer ze op het geheel of juist op een deel betrekking hebben. Door combinatie krijgen we vier elkaar aanvullende manieren om kennis te verwerven. Het antwoord op de vraag of wij de zee kennen hangt er dus vanaf vanuit welk kenniskwadrant we kijken; welke bril we opzetten.

De zee: een verstoorde rusttoestand

Ik zie bewegingen van zee en oceaan graag op een reductionistische manier, namelijk als storingen van een stabiele rusttoestand. In dit beeld wordt de zee gezien als een dunne schil gelaagd water die weliswaar met de aarde meedraait, maar die verder, in eerste instantie, in rust is: stil staat. Toegegeven, een ietwat abstract gezichtspunt, dat niet helemaal strookt met het gevoel dat ons soms bekruipt als we ons op de woelige baren begeven... Maar onthoud dat zelfs in deze denkbeeldige rusttoestand het zeewater nog steeds door de ruimte beweegt; op de evenaar zelfs met een vaartje van zo'n 440 m/s! Doordat zowel land als zee samen ronddraaien merken we daar niets van. De term 'stabiele rusttoestand' duidt er op dat deze toestand instelbaar is zonder spontaan beweging te veroorzaken. Iedere verstoring van deze evenwichtstoestand zal een terugdrijvende kracht teweegbrengen, welke tracht de rusttoestand te herstellen. Door traagheid schiet zo'n verstoring, als de klepel van een klok, door zijn evenwicht heen, keert van richting om, en dit geslinger herhaalt zich. Met andere woorden, verstoringen van de rusttoestand uiten zich in de vorm van golven. In de oceaan vinden we deze verstoringen terug in de vorm van geluidsgolven, van oppervlaktegolven (zoals windgolven, getijden en tsunami's) en van interne golven, als de grensvlaktgolf die we eerder tegenkwamen. Anders dan in het dood-water verhaal neemt in de diepzee de dichtheid echter vaak niet plotsklaps maar *gradueel* met de diepte toe, en kunnen interne golven daardoor op alle dieptes voorkomen. Het belang van al deze golven is dat ze energie transporteren en elders arbeid kunnen verrichten. Van oppervlaktegolven weten we dat ze deze arbeid vaak nabij de kust verrichten, in de branding, wanneer ze breken. Maar voor interne golven hebben we maar een vaag idee waar dat 'elders' gelegen is. Het blijkt echter dat interne golven op een zelfde manier geconcentreerd kunnen worden en kunnen 'branden' en dan voor menging in de diepzee kunnen zorgen.



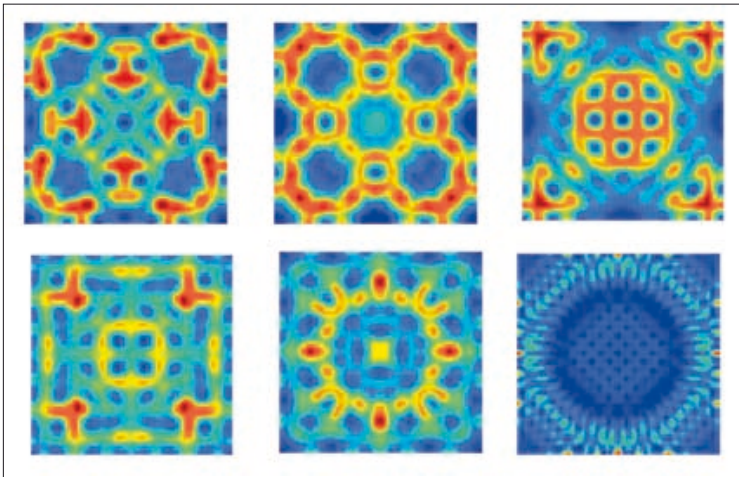
Figuur 7:

Kelvin's draaiende, met water gevulde koperen 'rugbybal' met handvaten.

Traagheidsgolven

Een prachtig voorbeeld van het vermogen van relatief zwakke interne golven om elders op geconcentreerde wijze arbeid te verrichten is eind negentiende eeuw experimenteel gevonden door Lord Kelvin, bekend van de Kelvin temperatuurschaal. Kelvin had een met kraanwater gevulde koperen bol in draaiing gebracht. Deze ging als een soort gyroscoop werken. Want toen Kelvin een klap tegen de zijkant van de draaiende bol gaf reageerde deze daar niet op, maar toen hij de bol in rugbyvorm timmerde en er vervolgens een klap tegenaan gaf gebeurde er iets vreemds. De bol kwam 'spontaan' los uit zijn ophanging en tolde rakelings langs het hoofd van de ammenuensis. Dat terwijl er niets gebeurde als er geen water in de draaiende rugbybal zat of als de bol in discussvorm getimmerd werd. Kennelijk werden door de Corioliskracht teruggedreven interne golven opgewekt, zogenaamde traagheidsgolven, die zich zo

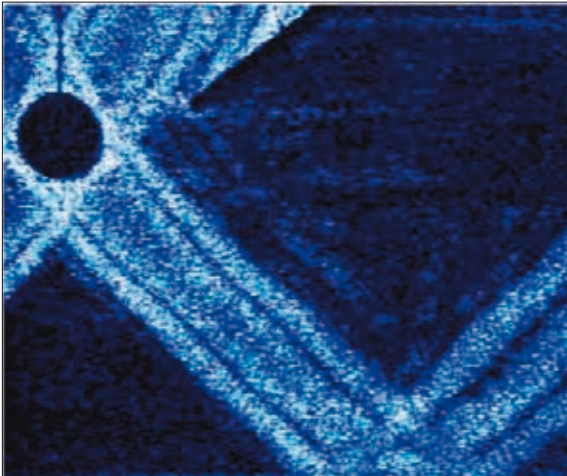
organiseerden dat er een ontwrichtend koppel op de rugbybal werd uitgeoefend. Dit verschijnsel staat als curiosum te boek. Waarom de draaiende rugbybal wèl gekatapulteerd werd, maar de discus- en bolvormen niet, behoeft bij mijn weten nog steeds verklaring!



*Figuur 8:
Traagheidsgolfpatronen in een met homogene vloeistof gevulde draaiende kubus.*

Dit gebrek aan belangstelling voor traagheidsgolven in draaiende vloeistoffen is, gelet op het feit dat het universum van de kleinste tot de grootste schaal draait, enigszins onthutsend. Om een tipje van de sluier op te lichten heb ik daarom zelf eens enkele golfpatronen berekend die optreden in een kubus die vlak op een draaitafel gezet wordt. Het zijn tamelijk complexe golfpatronen, puur als gevolg van draaiing. Mijn NIOZ-collega, Hans van Haren, heeft echter recentelijk vastgesteld dat dit soort

traagheidsgolven wel degelijk in zee voorkomen en daar voor energie-transport zorgen door dikke pakketten doorgemengd water.



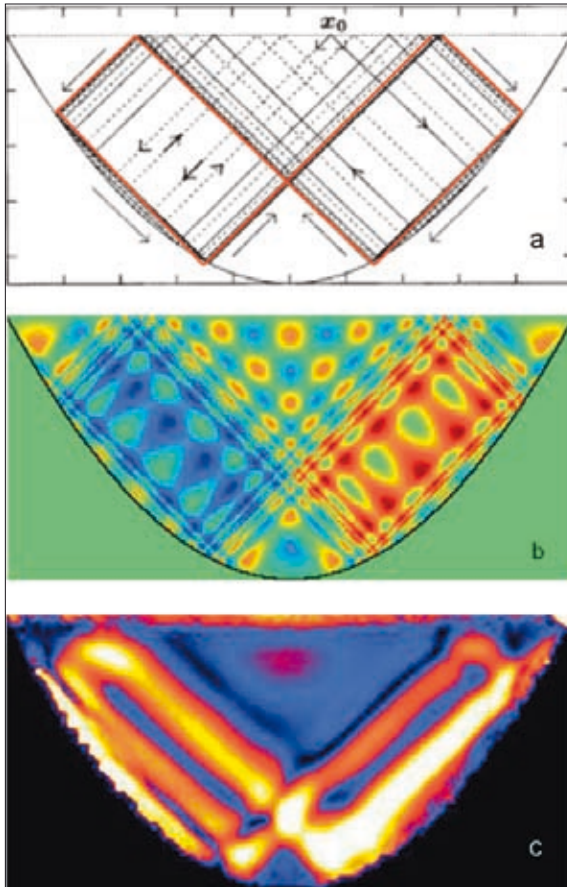
*Figuur 9:
Interne golfbundels bewegen schuin naar beneden en boven.
Experiment verricht door Stuart Dalziel.*

Golven onder water

Het is verbluffend dat precies die twee aspecten die de geofysische stromingsleer karakteriseren, namelijk hun continue gelaagdheid en hun draaiing als gevolg van de draaiing van de aarde, beiden leiden tot golven die heel anders zijn dan de ons bekende geluids-, licht- of oppervlakte-watergolven. Ze bewegen zich namelijk scheef door de vloeistof, onder een vaste hoek met de vertikaal; een hoek die bepaald is door hun frequentie. Net zo verbijsterend is dat de consequenties hiervan zich het gemakkelijkst laten analyseren met behulp van meetkundige methodes;

zeg maar met potlood en geodriehoek. Dit zijn methodes die verouderd zijn sinds Newton en Leibniz in de zeventiende eeuw problemen analytisch formuleerden, in termen van wiskundige vergelijkingen. Dit ondanks het feit dat Newton in zijn klassieke meesterwerk, de *Principia*, nog voor een meetkundige uitleg koos. Maar dat deed hij alleen omdat zijn tijdgenoten nog niet met de analytische methode vertrouwd waren.

Bij modelering van interne golven in een uniform gelaagde oceaan gebeurt echter het omgekeerde. De oplossing van de bewuste wiskundige vergelijking, de zogenaamde golfvergelijking, is in een willekeurig gevormd oceaanbekken met de analytische methode heel ingewikkeld, zo niet ondoenlijk, maar met de meetkundige methode kinderspel... Ik heb dat laatste eens letterlijk genomen, en heb mijn oudste twee kinderen, destijds zeven en vijf, gevraagd mee te helpen met het vinden van interne golfpatronen in een bekken dat een gelaagde vloeistof bevatte. Het enige principe dat ze moesten gebruiken was dat ze vanuit een willekeurig startpunt aan het oppervlak een lijnstuk moesten tekenen dat onder een hoek van 45 graden wegliep. Zodra de bodem bereikt was moesten ze oversteken op een lijnstuk daar loodrecht op, een lijnstuk dat wèl in het ingesloten domein, de 'zee', gelegen was, enzovoort. Met kinderhandjes bleek dat nog niet zo eenvoudig, maar een computerberekening die ik samen met oud-promovendus Frans-Peter Lam ontwikkelde maakte duidelijk dat de lijnstukken waarlangs deze golven lopen bijna altijd naar een gesloten baan worden getrokken, een *interne golfaantrekker*. Deze lijnen fungeren een beetje als de zenuwbanen van de zee. Het zijn lijnen waarlangs de druk wordt doorgegeven. Ze illustreren het gezegde: "als ik hier druk, voel ik daar pijn...". De golfaantrekker is precies de plaats waar in experimenten de golfenergie zich concentreert. Zoals het strand oppervlaktegolven aantrekt, blijkt deze gesloten baan, van overal uit zee, interne golven aan te trekken, golven die daar vervolgens mengen.



Figuur 10:
 Interne golfaantrekker in een parabolisch oceanbekken. (a) Golfpaden en aantrekker (rood); (b) theoretisch golfveldpatroon; (c) waargenomen stromingsveld met intensivering rond aantrekker - meting: Jeroen Hazewinkel.

Vanuit theoretisch en experimenteel oogpunt lijkt ophoping van energie rond golfaantrekkers onvermijdelijk, maar de grote vraag is natuurlijk “komen deze golfaantrekkers ook in zee voor”? En zo ja, “waar dan”? Dit is nu nog volstrekt onduidelijk. In analogie met het *Terra incognita*, het onbekende land dat zo tot de verbeelding sprak van ontdekkingsreizigers als Fridtjof Nansen, ligt er nu, Dames en Heren studenten, een *Mare incognitum* op jullie verkenning te wachten! Het lijkt er alleen op dat bij deze ontdekkingsreis één schip, of moet ik zeggen ‘een schip’, niet meer volstaat, maar dat jullie alle beschikbare observationele en theoretische middelen zullen moeten aanwenden om de diepzee te verkennen, zowel van buiten als van binnen!

Toekomstplannen

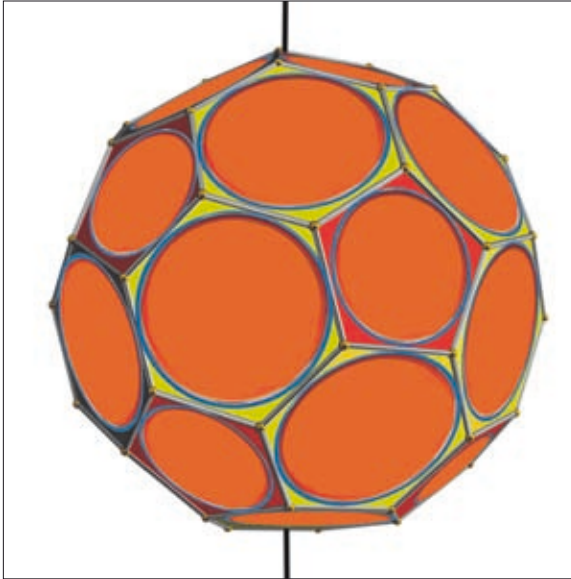
Laat ik daarom een paar onderwerpen noemen waar ik in de nabije toekomst graag met jullie aan zou willen werken. Ten eerste, aan het verhelderen van de invloed van de gelaagdheid van de zee op deeltjes- en warmtetransport. De oceanografische gemeenschap herhaalt als een mantra het belang van interne golven voor vertikaal transport van warmte, van voedingsstoffen en van opgeloste gassen, zonder echter in te gaan op het feit dat er een principiële probleem bestaat met vertikaal transport in een gelaagde vloeistof.

Laat mij dit illustreren aan de hand van communicatie tussen bergdorpen, gelegen op de flanken van een diep dal. Daarin valt op dat bewoners meer contact hebben met dorpjes die op een paar kilometer afstand op *dezelfde* hoogtelijn gelegen zijn, dan met dorpjes vlakbij, maar die enkele honderden meters hoger of lager liggen. Niemand heeft kennelijk veel zin om bij het stijgen en dalen steeds arbeid tegen de zwaartekracht in te moeten verrichten. Hetzelfde vinden we bij de verticale uitwisseling in de oceaan: deeltjes blijven het liefst gewoon hangen op een diepte waar

hun dichtheid gelijk is aan die van het water. Recente experimenten door promovendus Jeroen Hazewinkel laten dan ook zien dat vertikaal transport inderdaad meestal onderdrukt wordt, behalve in intense interne golfbundels, zoals in een golfaantrekker. De golfaantrekker blijkt niet alleen golven maar ook deeltjes aan te trekken. Deze bewegen eerst horizontaal, naar de bundels toe, maar worden daarna ook langs de bundel, scheef door de vloeistof gestuwd. Mogelijk dat dit het langgezochte mechanisme is waar onze collega's die koudwaterkoralen bestuderen naar op zoek zijn. Koudwaterkoralen zijn een soort anemonen, poliepen die op grote diepte in koud, donker water op de bodem leven. Deze pikken voedsel uit hun omgeving op en zetten dat uiteindelijk om in kalk. Hun afhankelijkheid van vers, nabij het oppervlak geproduceerd plankton suggereert de aanwezigheid van een soort 'voedselsnelweg' tussen oppervlak en bodem, een snelweg waar de interne golfbundel zich kandidaat voor stelt.

Dat brengt mij bij het tweede punt: om deze golfbundels en dit transport in zee te detecteren is ons instrumentarium niet toereikend. We hebben nieuwe meetmethodes nodig die verschijnselen met relatief kleine schalen, van 1 - 1000 m, niet slechts langs een lijn weten op te lossen. Vandaar dat we een bolvormige versie van de eerder genoemde Doppler stroommeter willen ontwikkelen; één met 'ogen' die in *alle* richtingen kijken, zodat het drie-dimensionale snelheidsveld in een *volume*, in plaats van langs een lijnstuk bepaald kan worden. Voordeel van een dergelijk bolvormige stroommeter is dat de nauwkeurigheid van de stroommetingen vergroot kan worden doordat deze aan een aantal beperkende voorwaarden moeten voldoen. Bijvoorbeeld doordat er netto geen water door een bepaalde bolschil naar binnen of naar buiten kan stromen.

Een ander punt van onderzoek, dichter bij huis, is de vraag of interne golven een rol spelen in de uitwisseling van water en sediment tussen



Figuur 11: Schets van mogelijk te ontwikkelen bolvormige Doppler stroommeter in een 'buckybal configuratie' met 32 'ogen' (oranje cirkels). Deze stroommeter zou met geluid de watersnelheid niet zoals gebruikelijk langs 1, maar langs 60 lijnen, en daarmee in een volume moeten kunnen meten

Noordzee en Waddenzee? Bijgaande foto, door mijn vrouw Cathy vanaf de TESO-veerboot tussen Den Helder en Texel genomen, laat een strepenpatroon in het Marsdiep zien dat verrassend veel lijkt op datgene dat karakteristiek is voor een bepaald soort interne golven, solitonen, de eenlinggolven die we eerder tegenkwamen. Deze foto is genomen bij nagenoeg windstil weer, tijdens kentering. Of dit strepenpatroon werkelijk door interne golven veroorzaakt wordt probeert een student nu met behulp van gerichte metingen in het Marsdiep vast te stellen.



Figuur 12: Oppervlaktestrepen visualiseren onderwatergolven.

Zoals gezegd is de diepzee onbekend omdat het moeilijk is om daar met licht of geluid een beeld van te vormen. Eigenlijk ligt het meer voor de hand om voor die beeldvorming die golven te gebruiken die door de gelaagde oceaan wèl worden toegelaten: de interne golven zelf. Met andere woorden, kunnen we wellicht die vreemde, scheeflopende golven gebruiken om oceaانvorm en gelaagdheid in beeld te brengen? Kunnen we 'kijken' met interne golven? Dit is een fascinerend, maar moeilijk probleem. Voor lichtgolven corresponderen bijvoorbeeld verschillende frequenties met verschillende kleuren. Maar interne golven van verschillende frequenties lopen onder een andere hoek met de vertikaal. Dus wat voor beeld krijg je hiermee? Dit is een van de vele openliggende theoretische vragen. Beantwoording van deze vragen kan de oceaan misschien in een ander licht stellen!

Dankwoord

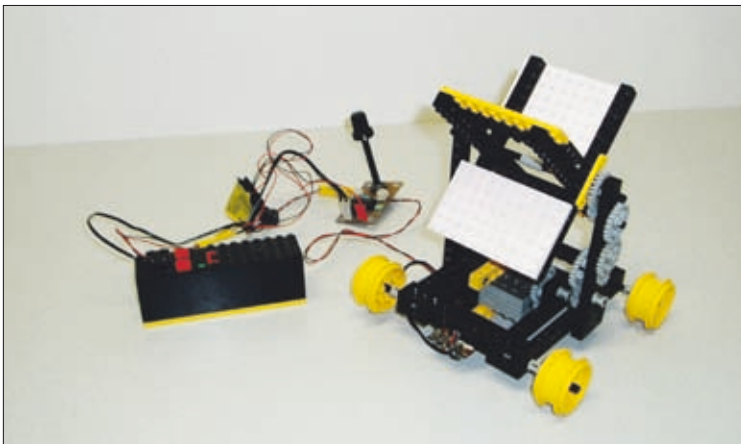
Ik wil nu graag een woord van dank uitspreken aan een aantal instanties en personen. Ten eerste dank ik het bestuur van het NIOZ Koninklijk Nederlands Instituut voor Zeeonderzoek, voor het instellen van deze bijzondere leerstoel. Ook dank ik het bestuur van het departement Natuur- en Sterrenkunde van de Bètafaculteit van de Universiteit Utrecht voor hun steun aan het voorstel daartoe. Ik dank het IMAU, het Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek Utrecht, waar de leerstoel gastvrij ontvangen is; in het bijzonder mijn oceanografie collega's aldaar, Will de Ruijter, Henk Dijkstra en Huib de Swart.

Voor mijn wetenschappelijke vorming ben ik mijn vroegere promotor en huidige collega, Sjef Zimmerman zeer erkentelijk. Hij leerde mij om probleemstellingen tot hun essentie terug te brengen, zonder evenwel het kind met het badwater weg te gooien. GertJan van Heijst, van de Technische Universiteit Eindhoven, met wie ik tijdens mijn promotieperiode op het IMAU korte tijd een kamer deelde, inspireerde mij om niet alleen in een theorie-wereld te leven, een wereld die ik voor mij zelf soms *Fantasia* noem, maar om modelresultaten te toetsen aan de werkelijkheid, hoe simpel die in een experiment ook moge lijken. Arjen Doelman, van het Centrum voor Wiskunde en Informatica en van de Universiteit van Amsterdam, wil ik danken voor de plezierige samenwerking bij de begeleiding van twee promovendi. Zijn directheid, zowel in aanpak van wiskundige vraagstukken als wel die op maatschappelijk vlak, werken aanstekelijk. Mijn NIOZ oceanografie-collega's, Hans van Haren, Theo Gerkema en Hendrik van Aken en vele studenten, promovendi en post-docs ben ik dankbaar voor hun tomeloze inzet bij het gezamenlijk verhelderen van het belang van interne golven. Ik ben mijn overige collega's op het NIOZ dankbaar voor hun enthousiasme om te zoeken naar dwarsverbanden tussen onze disciplines. Tevens ben ik alle assis-

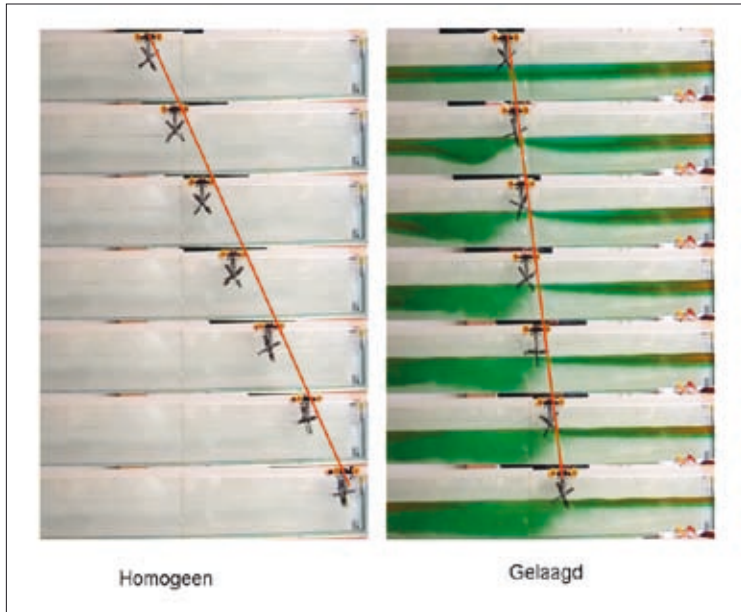
tenten en hulpafdelingen op het NIOZ dankbaar voor hun voortreffelijke ondersteuning aan experimenteel en observationeel onderzoek. De samenwerking met jullie is altijd heel stimulerend.

U heeft al begrepen dat Oceanografie soms een beetje een familiebedrijfje is, althans in mijn geval. Het doet mij daarom bijzonder deugd mijn dank uit te spreken:

- aan mijn ouders, voor hun liefdevolle zorg. Het is jammer dat mijn vader hier niet meer bij kan zijn. Ik weet zeker dat hij, als oud-zeeman, met plezier had kennisgenomen van onderwatergolven;
- aan Cathy, met wie ik het leven vier, en die mij met haar vrolijkheid en nuchterheid behoedt voor afdwaling in *Fantasia*;
- en aan onze kinderen, Suzanne, Ruben en David, die mij altijd geduldig hielpen met het bouwen van weer een LEGO modelletje, ook als dat qua leeftijd misschien niet meer helemaal gepast was. Ja, .. hun leeftijd!



Figuur 13: LEGO karretje met schoepenrad.



Figuur 14:
Zes momentopnames van twee identieke experimenten waarin een karretje zich door water heentrekt zonder (links) en met zoutgelaagdheid (rechts). De schoepen draaien met eenzelfde hoeksnelheid.

Tenslotte

Kan ik u ter afsluiting nog een praktisch advies geven over het onderwerp van mijn leerstoel: 'golfdynamica van de oceaan'? Wel, ik heb u verteld dat de zee gelaagd kan zijn. Verschillenden onder u zullen gezwommen hebben in open water en uit eigen ondervinding kunnen beamen dat oppervlakte- en dieper water soms sterk in temperatuur verschillen. Gelet op het vertragend effect dat deze gelaagdheid op schepen kan hebben, ligt het voor de hand de vraag te stellen of ook zwemmers last kunnen hebben van dood-water? Experimenten, uitgevoerd met Huub Toussaint, van de Vrije Universiteit van Amsterdam, en twee van zijn studenten, heeft uitgewezen dat daar inderdaad aanwijzingen voor bestaan. Nu is zwemmen met 'tentakels', als handen en voeten, natuurlijk wel iets anders als voortstuwing door zeil of motor. Daarom heb ik met enkele studenten een karretje gemaakt dat over de rand van een bak water rijdt en dat de beweging van handen nabootst door zich door middel van schoepen door het water voort te trekken. Het experiment laat een frappant verschil zien tussen peddelen in homogeen en in gelaagd water. Als u daarom de volgende keer bij het zwemmen in zee zo'n temperatuurverschil voelt en merkt dat u langzamer vooruit komt, misschien dat in ieder geval dit aspect van de zee u wat minder onbekend zal voorkomen...

Ik dank u voor uw aanwezigheid en belangstelling.

Ik heb gezegd.

Literatuurverwijzingen

Ekman, V.W., 'On dead water' *Scientific Results Norwegian North Polar Expedition 1893 – 6*, **5** (1904).

Haren, H.v., C. Millot, 'Rectilinear, circular inertial motions in the Western Mediterranean Sea' *Deep-Sea Research I* **51** 1441 – 1455 (2004).

Hazewinkel, J., S. Dalziel, A. Doelman, L.R.M. Maas, 'Tracer transport by internal wave beams' *Geophysical Research Letters*, *ingediend ter publicatie* (2009).

Kelvin, Lord, 'On an experimental illustration of minimum energy' *Nature* **23**, 69-70 (1880).

Wakatsuchi, M., K.I. Ohshima, 'Observations of Ice-Ocean Eddy Streets in the Sea of Okhotsk off the Hokkaido Coast Using Radar Images', *Journal of Physical Oceanography* **20** 585-594 (1989).

Ik dank Jeroen Smits en Jan Boon voor hun commentaar op een eerdere versie van deze inaugurele rede en Margriet Hiehle, Martin Laan en Jan Nieuwenhuis voor hulp met de illustraties.

Colofon

Foto omslag

Maggy Nugues,
Center for Tropical Marine Ecology, Bremen

Opmaak en druk

ZuidamUithof Drukkerijen, Utrecht

