

## Golven op in zee

### Inleiding

Als we op het strand lopen, of op zee varen, zijn het de windgolven die het eerst in het oog springen. Dit zijn golven met een golflengte van drie centimeter tot tientallen, op zee soms wel honderden meters. Soms zijn ze onschuldig, vlak en regelmatig. Andere keren zijn ze intimiderend en grillig. Met een mengeling van bewondering en vrees zien we ze zich tijdens een storm met donderend geraas op de kust storten. Wat wij hier zien is het slotakkoord van een symfonie die al veel eerder, en heel ergens anders, begonnen is. Golven zijn het resultaat van 'remote control': actie op afstand, en dus vormen golven in zekere zin een vorm van teleconnectie: een verband tussen energiebron en '-put'. Tsunami's vormen hiervan het gevreesde prototype; een aardbeving ergens ver weg op zee (dus, liever, een zeebeving) kan verwoesting zaaien op duizenden kilometers afstand.

Dat de zee vol zit met golven behoeft verder geen betoog. Door de wind aangedreven windgolven en bovengenoemde tsunami's zijn slechts de eersten uit een veel grotere groep van golfbewegingen die zich op of *in* zee afspelen. Het getij, dat wij normaal slechts kennen als een verandering van hoog naar laag water en terug in ongeveer 12 uur en 25 minuten, is in feite ook een (heel lange) golf. Net als windgolven en tsunami's zijn getijden zwaartekrachtsgolven, alleen dan door aantrekkingskracht van maan en zon opgewekt. In dit soort golven is het steeds de zwaartekracht die het uit zijn evenwicht gebrachte oppervlak 'terugdrijft'. Andere type golven, zoals korte capillaire golven (< 3 cm), danken hun bestaan aan weer andere terugdrijvende krachten. Deze bestaan doordat naburige, aan het wateroppervlak gelegen waterdeeltjes elkaar aantrekken (oppervlaktespanning). In deze golven is dispersie goed waarneembaar: dit is het verschijnsel dat individuele golven een andere snelheid hebben dan de golfgroep die zij samenstellen. De golfgroep geeft de energieverdeling weer. Deze is gecentreerd rond plaatsen waar de verticale uitwijkingen maximaal zijn. Individuele golven kunnen daar met een andere snelheid doorheen lopen. Voor capillaire golven lopen de kortste

golven het hardst. Terwijl hun verticale uitwijking afneemt, verdwijnen ze zo aan de voorkant, schijnbaar in het niets!



fig. 1 Capillaire golven uit zich als rimpels die voor de grotere zwaartekrachtsgolven uit richting strand (onderkant foto) bewegen. (Foto door Fabrice Neyret).

Op zee bestaat hiernaast een scala aan golven die zich bijna *niet* aan het oppervlak laten zien, maar juist tientallen meters daaronder, en zelfs in de diepzee. Deze zogenaamde interne golven hebben een aantal verrassende eigenschappen. In dit stuk wordt aangegeven wat de omstandigheden zijn waaronder ze optreden, hoe dit soort golven zich gedragen en waarin zij afwijken van ons bekende golven. Voor het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee is kennis van dit soort golven van belang voor diep onder het oppervlak levende dieren en planten. Want ook dit soort golven kunnen breken, en daarmee voedingszouten (bodem materiaal) opwervelen en zuurstof naar de diepte transporteren. Merk aan het eind van deze inleiding op dat de gebrekkige oppervlaktemanifestatie van interne golven ons meteen met een probleem opzadelt: hoe krijgen we dit soort golven in beeld? Het visualisatieprobleem loopt dan ook als een rode draad door het vervolg. Interne zwaartekrachtsgolven

### Gelaagdheid in zee

'De zee is zout, de zee is koud...' Zoutgehalte en tempera-

tuur zijn twee bepalende factoren voor de dichtheid van zeewater (het soortelijk gewicht van een vaste hoeveelheid water). Als het water zouter wordt neemt de dichtheid toe, maar ook als het kouder wordt (en krimpt). Hieronder belichten we slechts de temperatuurinvloed. Als gevolg van terugverstrooiing en invanging zal zonlicht niet verder dan zo'n honderd meter diepte in zeewater doordringen. Vanaf het oppervlak nemen lichtintensiteit en opwarming dan ook heel snel af. Door de wind zal de oppervlaktelaag worden doorgemengd, maar op zekere diepte (in de oceaan reikend tot ca 50 m) heeft de wind niet voldoende energie meer om dit werk nog dieper voort te zetten. Als gevolg van de menging in de bovenlaag, zal het water in deze menglaag een uniforme, relatief hoge temperatuur krijgen. Maar daar waar de wind de menging niet verder kan voortzetten zal de temperatuur over korte afstand sterk afnemen. Deze dunne laag (enkele decimeters tot meters dik), waarin de temperatuur met enkele tot ca 10 graden kan verlopen, wordt de spronglaag, of thermocliene genoemd. In meren treden vergelijkbare verschijnselen op, maar met ondiepere menglagen, omdat het daar minder waait. Niet langer blootgesteld aan windmenging zal de temperatuur onder de thermocliene geleidelijk afnemen. De sprongsgewijze, c.q. geleidelijke verandering in temperatuur (en dichtheid) in de oceaan leidt tot twee geïdealiseerde modellen, waarin golven optreden met geheel verschillend gedrag. Deze zullen hieronder verder besproken worden.

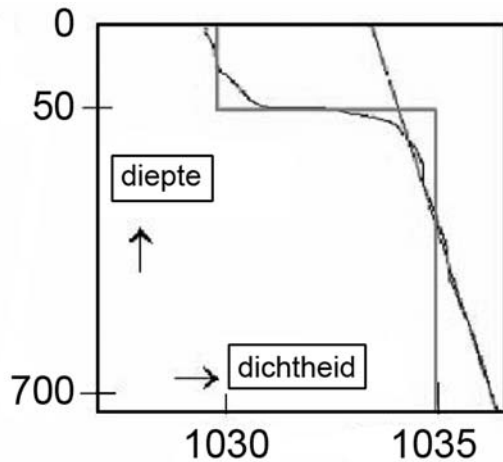


fig. 2 Schematische weergave van dichtheid ( $\text{kg/m}^3$ ) als functie van diepte (m). De zwarte lijn stelt een typisch gemeten profiel voor. De rode lijn is een twee-lagen idealisatie (met grensvlak op 50 m), en de blauwe lijn een model met constante gelaagdheid (constante dichtheidstoename met de diepte).

### Golven op grensvlakken

Aan het wateroppervlak valt de verandering in dichtheid (van ca  $1000 \text{ kg/m}^3$  voor water tot ca  $1 \text{ kg/m}^3$  voor lucht) samen met een verandering tussen vloeibare en gasvormige fase (lucht). Hoewel de thermocliene, voorgesteld als 'grensvlak' tussen twee watermassa's met verschillende dichtheid, geen vergelijkbare faseverandering kent zal dit toch ook zwaartekrachtsgolven kunnen 'dragen', ver-

gelijkbaar met die aan het wateroppervlak. Ter onderscheid worden deze grensvlakgolven genoemd. Want, hoewel het dichtheidsverschil klein mag zijn (typisch enkele  $\text{kg/m}^3$ ), zal het grensvlak, als het verstoord wordt, door de zwaartekracht worden teruggedreven. De zwaartekrachtsversnelling is echter *gereduceerd* in sterkte, met een factor gelijk aan de verhouding tussen dichtheidsverschil tussen beide lagen en gemiddelde dichtheid. (Deze verhouding is typisch in de orde van 1 promille). Deze reductie treedt op omdat het grootste deel van de zwaartekracht al gecompenseerd wordt door de druktoename in het water naar beneden toe. Dit is zelf het gevolg van een dieptetoename van het gewicht van de bovenliggende kolom water (die maakt dat ook in water van constante dichtheid niet alle waterdeeltjes op de bodem liggen, maar op elkaar 'steunen'). Gevolg van de reductie van de zwaartekrachtsversnelling is dat deze golven vergeleken met windgolven van vergelijkbare golflengte veel langzamer bewegen, langere periodes kennen en veel grotere verticale verplaatsingen hebben. Hun verticale uitwijkingen worden kleiner hoe verder men van het grensvlak komt. Aan het oppervlak zijn ze nog maar een fractie (1 promille) van die aan het grensvlak.

### Dood water

Dat deze golven niet onbelangrijk zijn wordt treffend geïllustreerd door de manier waarop ze in zee werden ontdekt. In 1893 voer het Noorse onderzoekvaartuig Fram door de Noorse fjorden naar buiten. In tegenstelling tot de gebruikelijke 6 a 7 knopen, maakte het schip nog geen 1 1/2 knoop. Dit moeizame voortbewegen verbijsterde bemanning en onderzoeksleider, de latere vredes-Nobelprijswinnaar Fridtjof Nansen. Deze riep de hulp in van de vermaarde meteoroloog V. Bjerknes, die het verschijnsel van 'dood-water', zoals Nansen het typeerde, verklaarde. Hij deed dit door te wijzen op de typische omstandigheden in een fjord: een dunne, enkele meters dikke zoete oppervlaktelaag (bestaand uit smeltwater), boven een diepe en zoute laag Atlantisch water. Doordat het schip net iets boven het grensvlak tussen deze twee watermassa's voer, was het aannemelijk dat de energie die de boot in de voortstuwing probeerde te stoppen voor een groot deel werd aangewend voor de opwekking van golven. Met andere woorden, de elasticiteit van het gelaagde water maakte dat het schip zich niet goed kon afzetten, enigszins vergelijkbaar met de moeite die wij zouden hebben om op een heel grote, slappe trampoline te lopen.

De ietwat morbide benaming dood-water is wellicht niet geheel misplaatst in het licht van sommige (bijna) ongelukken die geofefende lange-afstandszwemmers soms meemaken bij het oversteken van een meer. Hoewel zij hetzelfde meer reeds vele malen hebben overgestoken, blijkt dat zij op sommige dagen in de 'problemen' komen. Deze worden doorgaans aan 'vermoeide spieren' geweten. Als het hier echter een warme zomerdag betreft, en een diep meer, dan leert onze ervaring dat zich een dunne,

circa 1 meter diepe, warme bovenlaag vormt, die daaronder snel overgaat in het koude diepe water. Het zou dan ook heel goed kunnen dat deze zwemmers voor een groot deel bezig zijn met het maken van grensvlakgolven, in plaats van met zich voort te stuwten: doodeng. Een dergelijk verschijnsel kan mogelijk ook een verklaring vormen voor de ervaring van de uit Iran gevluchte schrijver Kader Abdolah. In zijn roman 'Spijkerschrift' zegt hij zijn meest angstige moment meegemaakt te hebben in een stil Nederlands meer! Hoewel hij nog maar net had leren zwemmen kan het ook een ontmoeting met dood-water zijn geweest die hem bijna noodlottig werd.

In het geval van dood-water wordt indirect geconcludeerd dat er grensvlakgolven in het spel moesten zijn. Directe waarneming blijft moeizaam, met één uitzondering die voor iedereen vanaf straat te zien valt: in de lucht! Vloeistoffen en gassen zijn natuurlijk heel verschillend, maar niet qua bewegingen. Veel verschijnselen in zee worden dan ook teruggevonden in de lucht. Vaak is er, vanwege een schaalverschil, wel een satellietopname nodig om dat te herkennen, maar in het geval van interne golven niet. Op sommige overgangen tussen luchtlagen

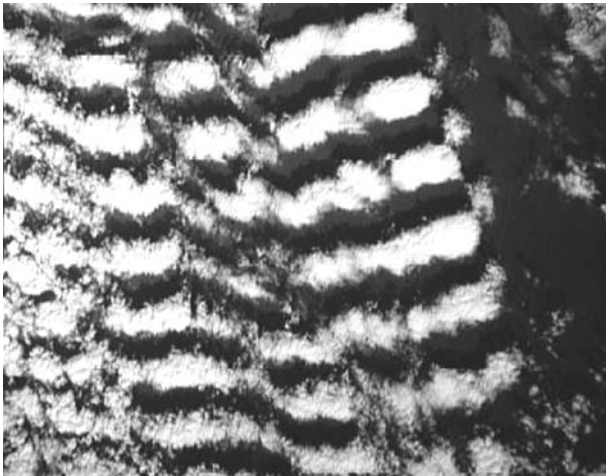


fig. 3 Interne golven op 30.0Z, 134.0O (bij Australië) gemeten op shuttle missie STS048 op een hoogte van 307 zeemijl. (Foto vanuit NASA – space shuttle).

treedt namelijk condensatie op in de kammen of troggen van daarop aanwezige grensvlakgolven. Golven uiten zich dan als parallelle wolkenstraten.

Dat wil niet zeggen dat er geen golven zijn als de lucht niet condenseert. Het betekent "slechts" dat we, net als in zee, een visualisatieprobleem hebben. Meteorologen denken niet dat dit soort kleinschalige zwaartekrachtsgolven erg belangrijk zijn voor ons weer: ze zijn moeilijk waarneembaar en te klein om in computermodellen mee te nemen. Of de interne golven daarmee echt verwaarloosbaar zijn valt nog te bezien, hoewel gezegd moet worden dat de sterkste interne golven die we in zee kennen, interne getijden (interne golven met een getijperiode), in de atmosfeer inderdaad niet zo dominant aanwezig zijn.

### Solitonen

Het visualisatieprobleem kan verholpen worden met zogenaamde punt- of contactmetingen; bijvoorbeeld met een onder het oppervlak opgehangen, zelfregistrerende thermometer. Veel grootschalige stromingen zijn vooral horizontaal, en veroorzaken zo geen temperatuurveranderingen. Interne golven, daarentegen, kennen ook verticale verplaatsingen. Periodieke veranderingen van de temperatuur verraden daarom hun aanwezigheid. Als we ook hebben gemeten hoe de temperatuur gemiddeld met de diepte varieert (temperatuurprofiel), kunnen we zo uit iedere op vaste hoogte gemeten temperatuur een interne golfhoogte schatten.

Een nog beter beeld krijgen we als we op een bepaalde plaats, gedurende lange tijd herhaald verticale temperatuurprofielen meten (zogenoemde yo-yo metingen). Dan is uit het tijdsverloop van isothermen vast te stellen of interne golven passeren. Bijgaande metingen voor de westkust van de Verenigde Staten, zijn op nog geavanceerdere wijze verkregen, namelijk met behulp van het vertikaal hangende (!) onderzoeksschip FLIP. Deze metingen laten zien dat zelfs ondiepe lagen, van slechts 5 m diepte, golven met een uitwijking van wel 30 m dragen. In de open

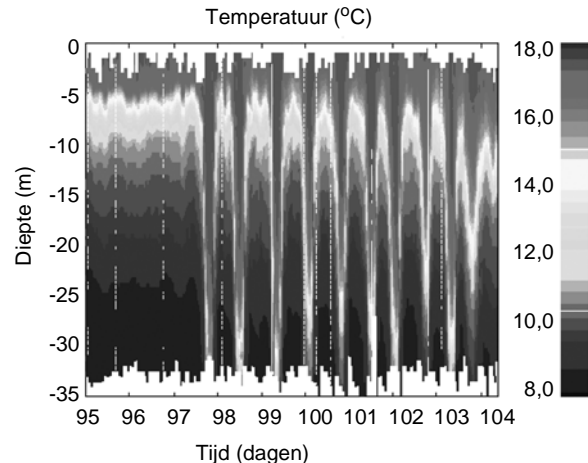


fig. 4 Temperatuurmetingen (in graden Celcius, zie legenda) voor de kust van Oregon gemeten door T. Stanton vanaf vertikaal hangend schip FLIP.

ocean lopen verticale uitwijkingen nog verder op tot wel 200 m. Dit soort grote golven zijn niet langer sinusoidaal. In de waarnemingen hieronder wijkt het grensvlak alleen naar beneden uit. Deze golven worden eenling golven, of solitaire golven genoemd. De eerste van dit soort niet-lineaire golven werd in 1834 door J. Scott Russell als oppervlaktegolf ontdekt toen een langs het jaagpad van een kanaal gesleepte boot plotseling tot stilstand werd gebracht. Diens hekgolf kwam los en ging er alleen vandoor. Scott Russell aarzde niet, gaf zijn paard de sporen en volgde dit merkwaardige verschijnsel kilometers lang. Onze landgenoten D.J. Korteweg en G. de Vries gaven in 1895 voor het eerst een wiskundige beschrijving van deze eenlinggolf. Voor dit soort golven geldt: hoe groter de uitwijking, hoe harder ze lopen. De grote golven halen de

kleintjes dan ook in. Dit gebeurt echter zonder veel wisselwerking. De niet-lineariteit komt tot uitdrukking in het feit dat bij passage de totale uitwijking minder is dan de som van de uitwijkingen van de individuele golven. Het enige effect van twee van dit soort solitaire golven op elkaar is dat de kleinste vertraagd, en de grootste juist versneld wordt tijdens passage. Vanwege het deeltjesachtige karakter van dit soort golven worden ze ook wel solitonen genoemd. Hoewel de oppervlakteuitwijkingen zeer gering zijn (minder dan een decimeter) zijn solitonen toch vaak vanuit satellieten zichtbaar (hier als twee grote golfgroepen). Dit komt omdat er sterke horizontale stromingen gepaard gaan met deze golven (met name in de ondiepste laag). Dit heeft een drietal effecten. Ten eerste zal daarmee samenhangende verticale beweging water doen opwellen aan de achterzijde van het soliton.

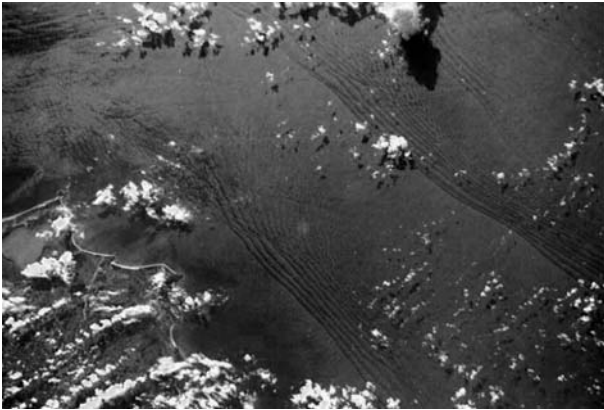


fig. 5 Foto uit de space shuttle met interne golven voor de kust van Namibië. Golf lengte tussen twee kammen is ca 3 tot 8 km (NASA JSC digitale opnames).

Net als achter een schip is het water daar rimpelloos: nog vrij van korte zwaartekrachts- en capillaire golven. Ten tweede wordt aan de voorkant water naar beneden gezogen. Licht oppervlaktemateriaal (schuim, algen, etc) blijft echter boven deze plaats drijven. Ten derde leidt de scherpe overgang in horizontale stroming aan het oppervlak plotseling tot steilere windgolven. Dit alles draagt ertoe bij dat ondanks hun geringe oppervlakteuitwijking deze golven zichtbaar worden vanuit de ruimte, of met behulp van scheepsradar, of zelfs met het blote oog.

Dit soort golven ontstaat vaak wanneer lange interne getijden (interne golven met getijperiode en golf lengte van zo'n 10 km) uiteenvallen. Dit uiteenvallen gebeurt als de golven te steil worden, en eigenlijk willen gaan breken. Bij het steiler worden, wordt de golf lengte kleiner en splitst het front van de golf zich in een aantal van dit soort solitonen.

### **Massatransport in golven**

Golven transporteren in eerste instantie geen water. Gezien vanuit een op een stilstaand frame gemonteerde ca-

mera zal een kurk op het oppervlak wel heen-en-weer bewegen (in feite, een cirkelvormige beweging), maar, zo gauw de golf gepasseerd is, weer op zijn uitgangspositie tot rust komen. Wat zich voortplant is de golfenergie (de uitwijking). Als je nog iets precieser kijkt, blijkt de kurk zich toch wel een heel klein beetje in de richting waarin de golf beweegt te verplaatsen. Dit komt omdat de watersnelheid in de top van de golf iets groter is dan de tegengesteld gerichte snelheid in het dal. Het is om deze reden dat de golven die op het strand invallen, ook steeds een beetje water meenemen. De ophoping die dit veroorzaakt leidt tot een geconcentreerde zeevaartse terugstroom (mui). In niet-lineaire golven treedt dit zwakke massa-transport ook op, maar discussies zijn gaande of er soms zelfs geen sprake is van een volledige invangings van water in de solitaire golf. Dit zou dan een soort pakketdienst voor voedingszouten, en andere opgeloste stoffen worden, vergelijkbaar met een dergelijk transport in (100 km) grote horizontale wervels, waarvan bekend is dat deze bijvoorbeeld tropische algensoorten ver van de evenaar kunnen brengen. Ook zonder dit "massale" transport zijn interne golven en solitonen van belang omdat ze zullen bijdragen aan het mengen van voedingsstofrijk bodemwater met zuurstofrijk oppervlaktewater, en omdat zij, net als de oppervlaktegolven, stromingen kunnen aandrijven.

### **Interne golven in continue gelaagde vloeistof**

De tweede veelgebruikte idealisatie van dichtheidsprofielen is er een waarin de dichtheid geleidelijk, maar steeds even snel toeneemt met de diepte. Wanneer we dit even zien als een situatie die bereikt wordt door aan te nemen dat het dichtheidsprofiel nu niet uit twee maar uit een heleboel lagen bestaat (weliswaar dan met heel kleine dichtheidsveranderingen per stap), dan is het *a priori* duidelijk dat ieder van de dan aanwezige horizontale grensvlakjes in staat is om golven te dragen. Hoe golven op het ene grensvlak die op het volgende en daaropvolgende beïnvloeden is dan echter een vraag. Het lijkt mogelijk dat een golf op het ene grensvlak een golf op een naburig grensvlak opwekt. Op dit moment wordt dat meer een vraag van vloeistofdynamische dan oceanografische aard, welke zich het gemakkelijkst in een laboratoriumopstelling laat bestuderen. Daar blijkt dat er inderdaad zo'n koppeling is. Sterker, het blijkt dat interne golven in het verticale vlak schuin (naar boven, alswel beneden) lopen. Dit gebeurt onder een vaste hoek die bepaald wordt door de verhouding van de frequentie van de golf, en de stabiliteitsfrequentie (die de mate van gelaagdheid weerspiegelt). De golven gedragen zich echter 'vreemd', heel anders dan oppervlaktegolven. Energie plant zich niet langer voort in de richting van de kammen en troggen – de lichte en donkere diagonale lijnen in de figuur hieronder, maar juist parallel daaraan (dus van de cylinder

weg).

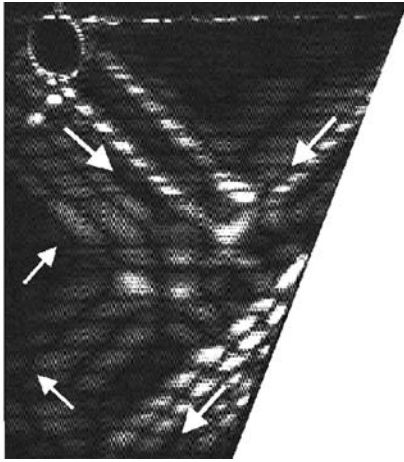


fig. 6 Experiment in een continue gelaagde vloeistof (dichtheid neemt continue toe in de richting van de zwaartekracht). Golven worden opgewekt door de cylinder in de linkerbovenhoek met vaste frequentie te oscilleren. De twee naar beneden lopende bundels worden, na weerkaatsing aan de verticale linkerwand, een brede, naar rechts lopende bundel, die geconcentreerd wordt bij weerkaatsing aan de schuine, rechterkant. Metingen verricht door F.-P.A. Lam (TNO-FEL). Visualisatie maakt gebruik van het feit dat de mate waarin licht afbuigt afhangt van de dichtheid van de vloeistof. Door een horizontaal lijnenpatroon te belichten, en te kijken hoe de lijnen vervormd raken wanneer interne golven de dichtheid lokaal veranderen, kunnen, door het verschil tussen beide beelden te nemen, de golven zichtbaar worden gemaakt (Methode ontwikkeld door S. Dalziel te Cambridge, UK).

Ook vreemd is dat bij weerkaatsing aan de schuine rechterzijwand, golven de 'wet van Snellius' niet volgen. Deze wet (die bijvoorbeeld door geluidsgolven en aan een verticale wand weerkaatsende oppervlakte watergolven wordt gevolgd) zegt dat golven zo weerkaatsen dat de hoek van uitval gelijk is aan de hoek van inval (ten opzichte van een lijn door het punt van reflectie loodrecht op de wand). Dezelfde wet bepaalt ook de manier waarop een biljartbal weerkaatst. De uiteindelijke paden die energie in dit soort golven volgen komt dan ook overeen met de banen die worden afgelegd op een wrijvingsloos biljart (met een vorm als het zeegebied waarin men geïnteresseerd is). Voor de meeste biljartvormen geldt dat bijna alle banen bijna overal in het biljart komen: hun energie wordt gelijkmatig verdeeld. Er bestaan slechts enkele banen die puur periodiek zijn, maar deze zijn onstabiel in de zin dat dichtbij gelegen banen heel snel verwijderd raken. Interne golven weerkaatsen in het verticale vlak zo dat de hoek met de zwaartekrachtrichting (vertikaal) bewaard blijft. Dit leidt er toe dat de aan de schuine kant weerkaatste bundel vernauwd is, en dus intenser moet worden om dezelfde hoeveelheid energie te kunnen transporteren. Dit verklaart het 'oplichten' van de weerkaatste bundel. Maar dit werpt weer de vraag op naar het uiteindelijke lot van dit soort golven. Welnu, wederom simpelweg volgen van energiepaden, maar dan met deze weerkaatsingswet,

definieert het 'interne golf biljart'. Op dit biljart vinden we dat alle interne golfenergie zich uiteindelijk verzamelt op de enige resterende gesloten baan: een golfaantrekker. De bevestiging dat deze golfaantrekker echt bestaat is experimenteel verkregen.

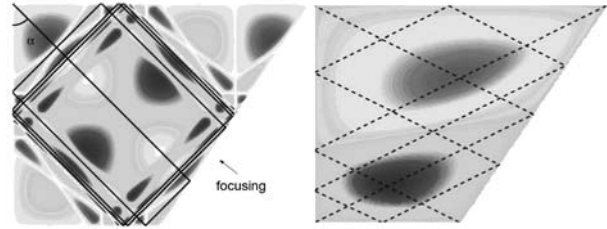


fig. 7 Interne golven lopen schuin, langs de rechte lijnen, zonder dat de hoek  $\alpha$  met de vertikaal verandert. Als gevolg daarvan verzamelt de energie zich op een golfaantrekker, in het plaatje linksboven, een vierkant. Lijnen met gelijke kleur zijn stroomlijnen, waarlangs de stroming gaat. De sterkte van de stroming is omgekeerd evenredig met de afstand tussen twee stroomlijnen. De hoek wordt bepaald door de frequentie van de golf en de mate van gelaagdheid van de vloeistof (hier een uniforme gelaagdheid). Rechtsboven is de golffrequentie zo dat iedere (gestippelde) lijn waarlangs de energie loopt periodiek is. Het stroomlijnenveld is altijd glad en heel anders dan die voor het algemenere geval met golfaantrekker. (Uit proefschrift A. Manders, 2003, Internal wave patterns in enclosed density-stratified and rotating fluids).

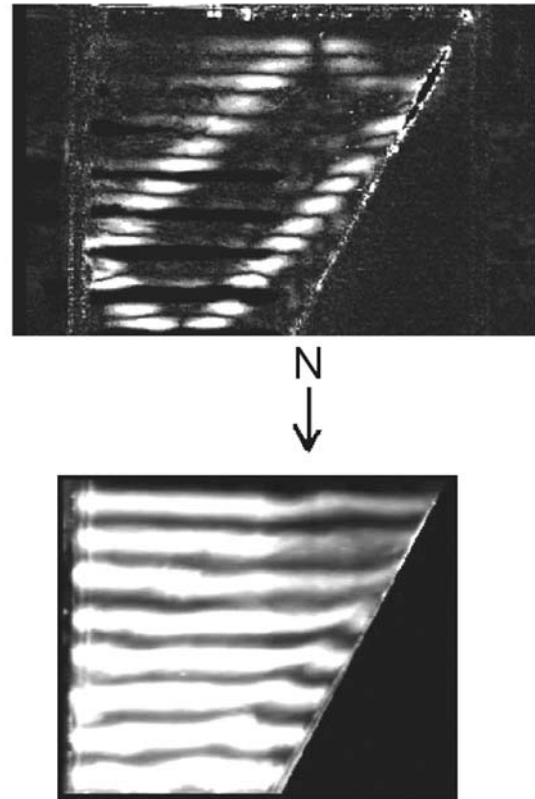


fig. 8 Meting (voor weer een andere golffrequentie) van (recht-hoekige) interne golfaantrekker. Deze meting is verricht in water met een uniform gelaagdheid. Aan vloeistoflaagjes is om en om kleurstof toegevoegd (onderste plaatje). De verplaatsing door interne golven is direct zichtbaar, in het bijzonder aan het oppervlak (pijl, label N). Aftrekken van het eerste beeld, waar

*nog geen golven waren en de laagjes horizontaal zijn, geeft het bovenste plaatje. Lichte kleuren geven aan waar interne golven geconcentreerd zijn. Een zichtbaar restant van de oorspronkelijke, horizontale laagjes gelieve men te negeren. (Uit Maas LRM, D. Benielli, J. Sommeria en F.-P.A. Lam, 1997, Nature 388, 557-561).*

Dit staat natuurlijk nog erg ver af van de eventuele aanwezigheid van een of meer golfaantrekkers in zee. Niet alleen is het zeegebied een heel stuk grilliger, en drie-dimensionaal, ook lopen golven met tal van verschillende frequenties door elkaar. Andere processen die in zee de energiepaden van interne golven beïnvloeden zijn: veranderingen in de mate van gelaagdheid, de aanwezigheid van stromingen, en het gegeven dat de aarde draait. De metingen in het lab laten zien dat deze golven, omdat ze geconcentreerd raken, kleinschalig zullen worden. Instrumenten om in zee een vergelijkbaar ruimtelijk samenhangend

beeld van dit soort golven te krijgen zijn helaas nog niet voorradig. Een verbeterd waarnemingsnetwerk is dan ook dringend gewenst. Zodra dat ontwikkeld wordt zal het misschien mogelijk zijn vast te stellen waar de brandpunten van interne golven (voorkeursplaatsen voor menging) gelegen zijn, of liever gezegd hun generalisaties: 'brandlijnen' en '-vlakken'.

Amusante speculaties dat ze wellicht toch al zijn waargenomen komen uit een verrassende hoek: de gelokaliseerde aanwezigheid van dit soort golven aan het oppervlak zou een verklaring kunnen vormen voor de observaties die geleid hebben tot mythische monsters als die van Loch Ness. 'Nessie', zoals deze door zijn aanhangers liefkozend wordt genoemd, wordt volgens geruchten immers ook gevormd door een gelokaliseerde rimpeling, vergelijkbaar met de enkele slingering aan het oppervlak in het laboratoriumexperiment (zie pijl gelabeld N).



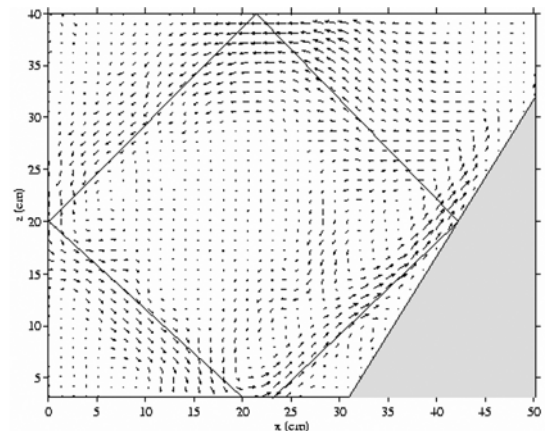
*fig. 9 Nessie: mythisch monster, of (interne) golf? Foto uit film van Malcolm Irvine 'The Loch Ness monster – proof at last' uit 1936 die de miljoenenindustrie rond Nessie in het zadel hielp.*

### **Traagheidsgolven**

In afwezigheid van dichtheidsgelaagdheid is nog een ander type interne golf mogelijk. Deze dankt zijn bestaan aan de draaiing van het systeem waarin de golf optreedt

en leidt tot een type golf dat sterk vergelijkbaar is met de hiervoor besproken interne zwaartekrachtsgolven. Omdat draaiing van de aarde een onderdeel vormt waar we op zee mee te maken hebben willen we hier kort bij stil staan.

Als in een geheel met water gevulde afgesloten bak een deeltje (denkbeeldig) wordt verwisseld met een ander deeltje dan zal er geen reden zijn waarom de deeltjes weer 'terugwillen' naar hun uitgangspositie. Dat ligt anders wanneer deze bak op een draaitafel geplaatst wordt. Wanneer een deeltje dan verplaatst wordt zal er een 'herinnering' bestaan aan diens oorspronkelijke afstand tot de draaiingsas. Dat komt doordat er, gezien vanuit het draaiende systeem, tijdens gelijkmatige draaiing een balans bestaat tussen een naar binnen gerichte kracht, als gevolg van naar buiten toenemende druk, en de naar buiten gerichte centrifugaalkracht (het deeltje is 'traag': het 'wil' rechtdoor, en niet in een cirkelbaan). Verstoring van deze krachtenbalans leidt tot overheersing van een van deze beiden, en wel zo dat het deeltje wordt teruggedreven naar zijn uitgangspositie. Met andere woorden, draaiing verleent het water elasticiteit.



*fig. 10 Momentopname van watersnelheid in traagheidsgolven in een draaiende bak water, gezien vanaf de zijkant. Merk op dat de bewegingen intenser zijn in de buurt van de (bijna) vierkante aantrekker. De onderste 3 cm liggen buiten beeld.*

Omdat deeltjes ook (druk)krachten op elkaar uitoefenen zal de verstoring zich als een golf door de vloeistof heen planten: een traagheids- of inertiaalgolf, naar het Latijnse woord voor traagheid: inertia. Het blijkt dat deze golven net zo 'vreemd' zijn als interne zwaartekrachtsgolven: ze hebben ook geen vrij oppervlak nodig om te bestaan, en hebben hun maximale uitwijking dus ook in het inwendige van de watermassa. Ze bewegen ook onder een vaste hoek, maar nu ten opzichte van de draaiingsas, en ze zullen derhalve ook focuseren bij weerkaatsing aan een schuine zijkant en in het bijzonder bij herhaald weerkaatsen golfaantrekkers benaderen.

De zee bevindt zich op een draaiende aarde, en is gelaagd in dichtheid. Beide teruggedrijvende mechanismes zullen in zee dan ook samenspannen met in tact lating van het verschijnsel 'golfaantrekker'. De precieze vorm en ligging

daarvan blijft vooralsnog onderwerp van studie, terwijl diens waarneming in zee nog in de kinderschoenen staat. Wat voorlopig blijft staan is de suggestie dat menging op zee, en daarmee voor flora en fauna gunstige omstandigheden, mogelijk geconcentreerd is op specifieke plaatsen rond golfaantrekkers. De speurtocht naar deze 'hot spots' gaat door...

## Slot

Naast de golven die we vanaf schip of strand *op* zee tegenkomen laten gelaagdheid en draaiing van de aarde ook golven *in* zee toe, die zich bijna niet aan het oppervlak laat zien. Onder water daarentegen kunnen deze interne golven uitwijkingen van honderden meters bereiken. Er zijn berichten van onderzeërs die op honderden meters diepte gelegen, iedere getijperiode door elkaar werden geschud. Geruchten willen zelfs dat een onderzeër tegen de bodem is gezwiept in een dergelijke 'onderwaterstorm'. Ook verwrongen pijpleidingen die soms na passage van een grote interne golf uit het water komen doen vermoeden dat het in de diepten der oceaan niet bepaald een rusthuis is...

Samenvattend rijst het beeld op dat interne golven zich gedragen zoals licht uit een schijnwerper: felle geconcentreerde bundels die in de duisternis van de diepzee schij-

nen. Hun oorsprong vinden ze op plaatsen waar de voornamelijk horizontale beweging, veroorzaakt door lange oppervlaktegolven, boven hellende bodems een verticale component krijgt (zoals aan de randen van het continentaal plat, of boven de mid-Atlantische rug). Deze verticale beweging tilt de vlakken van gelijke dichtheid op uit hun horizontale rustpositie, waarnaar deze dichtheidsvlakken, onder wegzending van golven, weer proberen terug te keren. De interne-golf bundels volgen paden die binnen enkele dagen veranderen van positie. Dit is het gevolg van de onder invloed van instraling, wind, etc langzaam veranderende gelaagdheid en achtergrondstroming op het tussenliggende traject. Voor zover ze hun energie niet tussentijds kwijtraken, zullen de bundels herhaald weerkaatsen aan bodem en oppervlak, en daarbij hun energie concentreren (feller worden). Of de golven hun energie tussentijds verliezen, door wrijving tussen langs elkaar bewegende deeltjes, of dat ze 'hun' golfaantrekker bereiken, hangt in hoge mate af van de aard van deze aantrekkers. Zijn ze simpel, zoals in de voorbeelden in de experimenten, met slechts enkele reflecties aan de zijkanten, dan maken ze goede kans zichtbaar gemaakt te worden. Zijn ze daarentegen ingewikkeld (letterlijk), dan kost het te veel tijd om ze te bereiken en te volgen, en zullen de golven reeds onderweg uitgedempt worden.