

## Golven in de diepzee

■ PROFESSOR LEO MAAS

Op het strand zie je windgolven met een lengte van enkele centimeters, tot tientallen meters als het stormt. Op volle zee loopt dat soms op tot golflengtes van honderden meters. Soms zijn ze vlak en regelmatig, andere keren intimiderend hoog en grillig. Met een mengeling van bewondering en vrees zien we ze tijdens een storm met donderend geraas op de kust breken. Het is het slotakkoord van een symfonie die veel eerder en heel ergens anders begon. Golven zijn feitelijk het resultaat van 'afstandsbesturing'. Tsunami's zijn de meest gevreesde voorbeelden van zo'n teleconnectie: een beving ergens ver weg op zee

kan op duizenden kilometers afstand verwoesting zaaien.

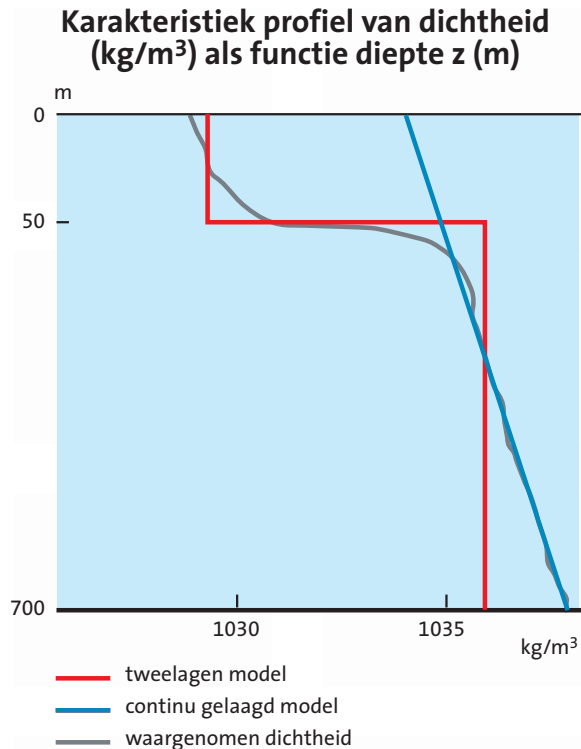
Het getij – de periodieke verandering van hoog naar laag water onder invloed van de zon en de maan – is in feite ook een heel lange golf. Net als windgolven en tsunami's zijn de getijden zwaartekrachtgolven. In dit soort golven drijft de zwaartekracht het door de zon en de maan uit zijn evenwicht gebrachte oppervlak terug. Er bestaan ook andere typen golven, zoals golfjes met een golflengte van millimeters tot hooguit een paar centimeter, capillaire golven. Ze ontstaan doordat naburige, aan het wateroppervlak gelegen waterdeeltjes elkaar aantrekken: de oppervlaktespanning.

Op zee bestaat ook een scala aan golven die zich bijna niet aan het oppervlak manifesteren, maar juist tientallen meters daaronder, tot zelfs in

De tsunami van Tweede Kerstdag 2004: een extreem voorbeeld van golven die 'op afstand worden bediend'.



Twee modellen van temperatuurverloop bij toenemende diepte.



de diepzee. Deze onderwatergolven hebben een aantal verrassende eigenschappen die ze wezenlijk anders maken dan de ons bekende, goed zichtbare golven. Tegelijk zijn die mysterieuze onderwatergolven wel van groot belang voor dieren en planten in de diepzee. Ze brengen voedingszouten uit de bodem omhoog en plankton naar beneden. Doordat zij ook warmte en impuls naar de diepzee transporteren zijn ze ook belangrijk voor de algehele oceaancirculatie. Maar hun gebrekkige zichtbaarheid en meetbaarheid aan de oppervlakte vormt een probleem: hoe krijgen we dit soort belangrijke onderwatergolven in beeld?

#### Lagen van verschillende dichtheid

Zoutgehalte en temperatuur bepalen voor een belangrijk deel het soortelijk gewicht, ofwel de dichtheid van zeewater. Als het water zouter of

kouder wordt neemt de dichtheid toe. Zonlicht zal door verstrooiing en absorptie niet dieper dan zo'n honderd meter in zee doordringen. Vanaf het wateroppervlak naar beneden nemen lichtintensiteit en opwarming dan ook snel af. De wind mengt de oppervlaktelaag in de oceaan tot zo'n vijftig meter. In die bovenste vijftig meter krijgt het water een uniforme, relatief hoge temperatuur die daaronder snel afneemt. De dunne overgangslaag, van decimeters tot enkele tientallen meters dikte, wordt spronglaag of thermocliene genoemd. Zonder de windmenging zou de temperatuur onder die thermocliene gradueel afnemen. De spronggewijze, dan wel de geleidelijke verandering in temperatuur en dichtheid bij toenemende diepte leidt tot twee (geïdealiseerde) modellen (de rode en de blauwe lijn in de figuur hiernaast), waarin onderwatergolven optreden met heel verschillend gedrag.

#### Onderwatergolven op grensvlakken

Het wateroppervlak kun je omschrijven als een enorme dichtheidssprong: van ongeveer duizend  $\text{kg/m}^3$  van water naar één  $\text{kg/m}^3$  voor de lucht daarboven. Die sprong gaat ook samen met een verandering van vloeibare in gasvormige fase. De thermocliene is weliswaar ook een 'grensvlak' tussen twee (water)massa's met verschillende dichtheid, maar kent geen vergelijkbare faseverandering. Toch kan dit grensvlak, net als het wateroppervlak, zwaartekrachtsgolven vertonen. Om het verschil met golven aan het oppervlak duidelijk aan te geven worden dit grensvlakgolven genoemd. Hoewel het dichtheidsverschil relatief gering is, zal het grensvlak bij verstoring wel degelijk worden teruggedreven door de zwaartekracht. De effectieve kracht is echter verzwakt met ongeveer een factor duizend. Dit is de verhouding tussen het dichtheidsverschil tussen beide lagen en de gemiddelde dichtheid. Dit heeft tot gevolg dat de onderwatergolven, vergeleken

Het vertikaal hangende onderzoeksschip 'FLIP' kan temperatuurprofielen maken van de bovenste tientallen meters van de oceaan.



met windgolven van vergelijkbare golfenlengte, veel langzamer bewegen, langere 'golfperiodes' kennen en veel grotere verticale verplaatsingen hebben.

### **Doodwater**

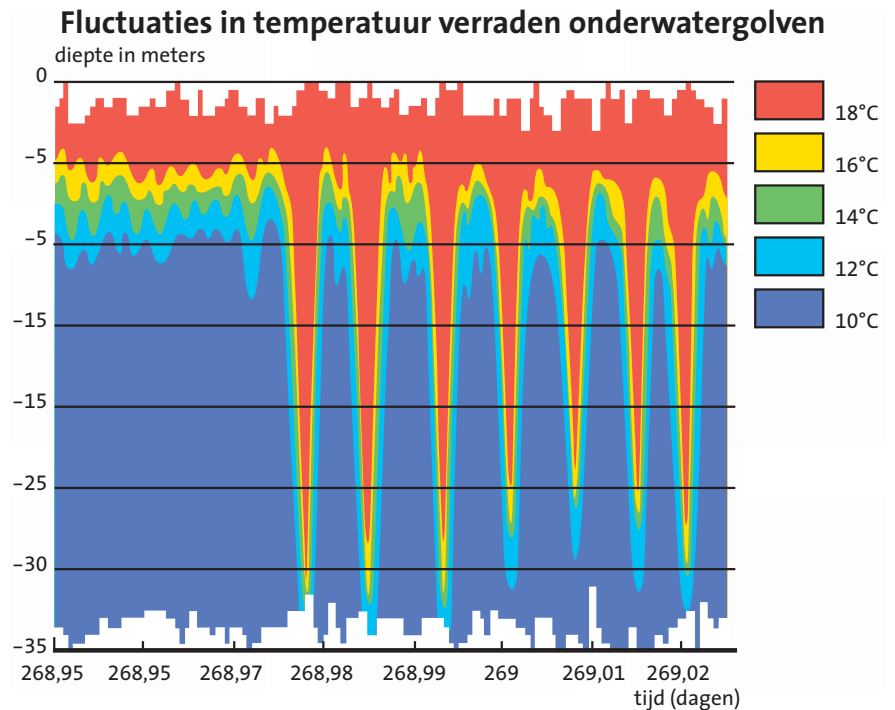
De onderwatergolven werden voor het eerst verklaard door de Noorse meteoroloog Bjerknes, naar aanleiding van de ervaringen van ontdekkingsreiziger Nansen op zijn schip de Fram, dat in Noorse fjorden leek vast te lopen op de onderwatergolven. Doordat de Fram net iets boven het grensvlak tussen beide watermassa's voer, werd de energie die bedoeld was voor voortstuwing voor een groot deel onbedoeld gebruikt voor opwekking van grensvlaktgolven. Hierdoor kon het schip zich niet goed 'afzetten' in het elastische water, vergelijkbaar met de moeite die het kost om op een slappe trampoline te lopen.

De ietwat morbide benaming doodwater is misschien niet eens misplaatst in het licht van de vele (bijna) ongelukken die het heeft veroorzaakt. Zo worden de problemen van geofefende langeafstandszwimmers nog wel eens aan vermoeide of onderkoelde spieren geweten. Maar als die problemen op een warme zomerdag plaatsvonden in een diep meer, zou zich daarin wel eens gelaagdheid hebben kunnen ontwikkelen: een circa één meter dikke, warme bovenlaag boven koud dieper water. Wellicht waren deze zwimmers in feite bezig met het maken van grensvlaktgolven in plaats van met zich voort te stuwten. Dit vormt misschien ook de verklaring 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. Terwijl hij net had leren zwemmen werd vermoedelijk een ontmoeting met doodwater hem bijna noodlottig.

## Solitonen

Onderwatergolven kun je visualiseren met thermometers op verschillende dieptes onder het oppervlak. Periodieke veranderingen van de temperatuur verraden dan de aanwezigheid van onderwatergolven. Als je weet hoe de temperatuur gemiddeld met de diepte varieert, kun je op een bepaalde diepte uit temperatuurafwijkingen ten opzichte van dat gemiddelde ook de golfhoogte schatten. Een nog beter beeld krijg je als je op een bepaalde plaats, gedurende lange tijd continue verticale temperatuurprofielen meet. Dat gebeurt onder andere met het verticaal hangende onderzoeksschip FLIP. De passage van onderwatergolven is dan uit het tijdsverloop van isothermen vast te stellen. De figuur hiernaast laat zien dat zelfs onder menglagen op slechts vijf meter diepte, grensvlakgolven uitwijkingen kunnen veroorzaken van dertig meter. In de diepzee kunnen die uitwijkingen oplopen tot zelfs tweehonderd meter, en dat binnen enkele minuten. Het laat zich raden dat een onderzeeboot, die als een kurk op zo'n grensvlak kan drijven, hierdoor verrast kan worden en de diepte in gesleurd kan worden.

Als je nog nauwkeuriger naar de figuur hiernaast kijkt zie je dat de golven geen mooie sinusvorm hebben. Dit soort niet-lineaire golven worden eenlinggolven, of solitaire golven genoemd. Zij werden als oppervlaktegolf al in 1834 ontdekt toen een langs het jaagpad van een kanaal gesleepte boot plotseling tot stilstand kwam. De hekgolf kwam los en ging er over een afstand van kilometers alleen vandoor. 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 in tegenstelling tot 'gewone golven': hoe groter de uitwijking, hoe harder ze lopen. Grote golven halen de kleintjes in. Dit gebeurt echter zonder veel wisselwerking. De niet-lineariteit komt ook tot uitdrukking in het feit dat bij passage de totale uitwijking minder is dan de som van de



#### Het verloop van de temperatuur in de bovenste meters van het water verradt extreme onderwatergolven.

(Bron: Stanton en Ostrovsky, 1998 J. Geophys. Res. Lett., 25, 2695-2698)

uitwijkingen van de individuele golven. Het enige effect dat die twee solitaire golven op elkaar hebben is dat de kleinste vertraagd, en de grootste juist versneld wordt. Vanwege dit schijnbare deeltjeskarakter worden dit soort golven solitonen genoemd. Hoewel hun oppervlakteuitwijking vaak gering is – minder dan een decimeter – zijn solitonen zelfs vanuit satellieten te zien, doordat scherpe veranderingen in stroming leiden tot steilere windgolven, en doordat aan de achterzijde van het soliton rimpelloos water opwelt, waarin zich nog geen zwaartekrachts- of capillaire golven hebben gevormd, en aan de voorkant water naar beneden wordt gezogen waarboven licht oppervlakt materiaal (schuim en algen) blijft drijven.

#### Golven als vervoermiddel

Golven transporteren in eerste instantie geen water. Gezien vanuit een vast punt zal een kurk



op het oppervlak wel heen-en-weer bewegen, maar zo gauw de golf is gepasseerd in principe weer op zijn uitgangspositie tot rust komen. Het enige dat zich voortplant is de golfenergie. Als je wat nauwkeuriger kijkt blijkt de kurk toch een beetje in de golfrichting te worden verplaatst. Dit komt omdat de voorwaartse watersnelheid in de golftop iets groter is dan de terugwaartse snelheid in het golfdal. Om deze reden nemen golven die op het strand invallen ook steeds een beetje water mee. De ophoping van dat water leidt tot muien: de beruchte geconcentreerde zeewaartse terugstroming waardoor zwemmers in de problemen kunnen komen.

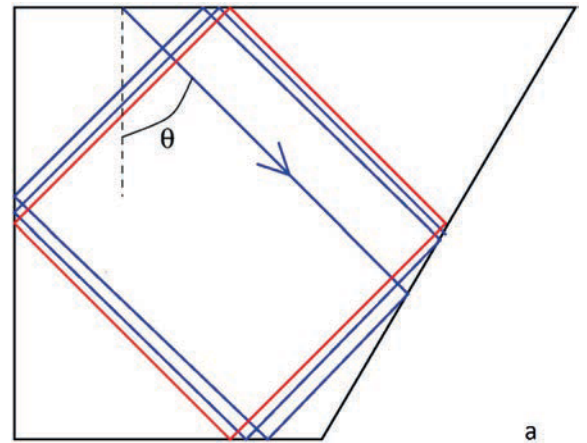
Ook in niet-lineaire golven treedt een beetje massatransport op. Daarnaast is soms sprake van volledige invangings van een pakket water in het soliton. Daarmee worden solitonen dus een soort pakketdienst voor voedingszouten en andere opgeloste stoffen, vergelijkbaar met het transport door honderd kilometer grote horizontale wervels die algensoorten over de evenaar brengen.

### Onderwatergolven in continu model

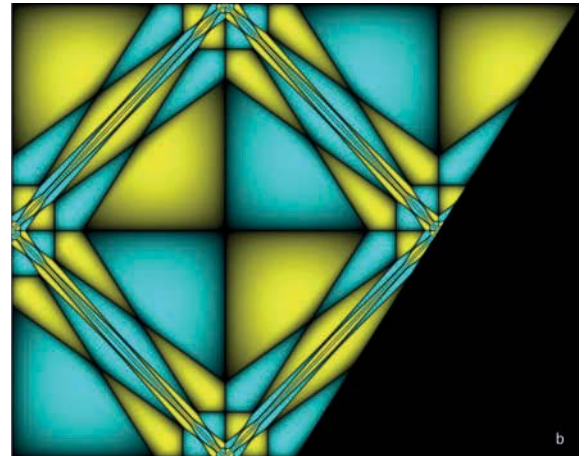
De tweede veelgebruikte idealisatie van dichtheidsprofielen is er een waarin de dichtheid geleidelijk toeneemt met toenemende diepte (de blauwe lijn uit de figuur op p. 29). Deze situatie kun je je voorstellen als een dichtheidsprofiel dat nu niet uit twee maar uit een heleboel laagjes bestaat, met gelijke maar kleine dichtheidssprongen. Dan zal ieder grensvlak golven kunnen dragen.

Hoe golven op het ene grensvlak die op het volgende en daaropvolgende grensvlak beïnvloeden laat zich het gemakkelijkst in het laboratorium bestuderen. Daar blijkt dat onderwatergolven in het verticale vlak schuin naar boven en beneden lopen. Energie plant zich in dit vlak niet loodrecht op de richting van kammen en troggen voort maar juist parallel daaraan. Dit gebeurt steeds onder een vaste hoek met de zwaartekrachtsrichting (ver-

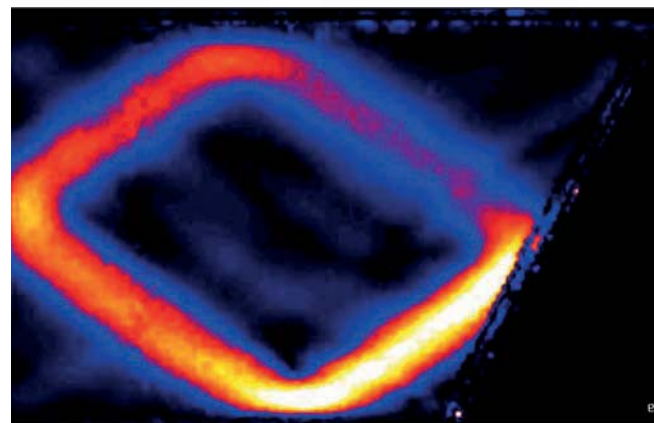
Een verticaal profiel van een 'onderwatergolfbiljart' met een schuine helling. Onderwatergolven volgen energiepaden (blauw) naar een golfaantrekker (rood). In het caleidoscopische 'stroomfunctieveld' (midden) is de stroomrichting parallel aan lijnen van gelijke kleur. De uiteindelijke stroomsterkte in dit onderwatergolfexperiment is te zien in de onderste figuur.



a



b



tikaal), zelfs bij weerkaatsing tegen een hellende bodem. Deze hoek wordt bepaald door de verhouding van golffrequentie en stabiliteitsfrequentie (een maat voor de gelaagdheid). Vergeleken met oppervlaktegolven leidt deze reflectiewijze tot heel andere gevolgen.

Oppervlaktegolven volgen paden die net als kaatsende biljartballen, weerkaatsen aan de kust onder een hoek die gelijk is aan de hoek van inval (Wet van Snellius). In een grillig gevormde zee komen die golfpaden van rondkaatsende oppervlaktegolven daarom bijna overal: de energie wordt gelijkmatig verdeeld. Er bestaan slechts

enkele golfpaden die puur periodiek zijn, maar deze zijn onstabiel in die zin dat dichtbij gelegen golfpaden zich snel van elkaar verwijderen. Maar onderwatergolven die aan een schuine helling

weerkaatsen bewaren hun hoek ten opzichte van het verticale vlak, waardoor een invallende bundel vernauwt en, om dezelfde hoeveelheid energie te kunnen transporteren, intensiveert. Deze reflectiewet definieert een 'onderwatergolfbiljart' waarop elk golfpad (en dus golfenergie) zich uiteindelijk verzamelt op één gesloten baan: een golfaantrekker. Deze golfaantrekker vind je in laboratoriumexperimenten en blijkt langs dichtheidsvlakken, dus horizontaal, ook opgelost en zwevend materiaal aan te trekken. Of golfaantrekkers uitwisseling *tussen* die lagen, in verticale richting teweegbrengen, is onderwerp van onderzoek. Vertikaal transport van voedingsstoffen dat daar mogelijk mee gemoeid is zou kunnen verklaren waarom koralen en sponzen in staat zijn te overleven op plekken die je in de koude, donkere diepzee als 'onderwater-oases' zou kunnen zien.

---

## Het monster van Loch Ness is mogelijk een onderwatergolf

Intense beweging rond golfaantrekkers kan verder gevolgen hebben voor diepzeemijnbouw, doordat pijpleidingen getordeerd kunnen worden, of omdat verontreinigingen versneld verspreid kunnen worden. Breking van geïntensiveerde onderwatergolven kan uiteindelijk leiden tot menging van watermassa's die vervolgens horizontaal wegstromen. Dit zou een van de oorzaken kunnen zijn van groei en breking van kleinschalige onderwatergolven op het grensvlak tussen dit wegstromende water en bovengelegen, stilstaand water, zoals dat met precisie-thermometers in de diepzee wordt waargenomen.

Of op het onderwatergolfbiljart van de oceanen ook echt golfaantrekkers bestaan is nog niet bewezen. Niet alleen zijn oceanen grillig en driedimensionaal, er lopen ook tal van golven met verschillende frequenties en hoeken door elkaar. Daarnaast worden de ideale golfpaden uit het laboratorium in zee beïnvloed door de mate van gelaagdheid, de aanwezigheid van stromingen, en de draaiing van de aarde. Maar, zoals het laboratoriumexperiment uit de figuur op p. 32 laat zien, kan het ook zijn dat ze tot nu toe misschien aan de aandacht ontsnapt zijn omdat ze geconcentreerd en kleinschalig worden. Instrumenten om in open zee een ruimtelijk samenhangend beeld van dit soort golven te krijgen, vergelijkbaar met die in het laboratorium, zijn er helaas nog niet. Hoewel ... , de geconcentreerde aanwezigheid van golven door een golfaantrekker zou wel eens een verklaring kunnen geven voor het mythische monster van Loch Ness. Wellicht wordt 'Nessie' gevormd door een aan het oppervlak reflecterende onderwatergolf, vergelijkbaar met de rimpeling aan het oppervlak in het laboratoriumexperiment. Wie het monster denkt te zien, ziet misschien wel iets dat natuurkundigen en oceanografen veel spannender vinden: een golfaantrekker in het wild!