

METEOROLOGICA



Verticale ontladingen en sprites



Oceaanstroming en klimaat



Ijsvezels in de natuur



Metingen in zwembad aan
dood water

Worden mooi-weer verdrinkingen door dood-water veroorzaakt?

LEO MAAS EN HANS VAN HAREN (NEDERLANDS INSTITUUT VOOR ONDERZOEK DER ZEE)

Bijna iedere zomer verdrinken enkele personen bij het overzwemmen van een diep meer. Merkwaardig is dat het soms geoeffende zwemmers betreft en dat het vaak plaatsvindt tijdens mooi, kalm weer. Merkwaardig is ook dat medisch onderzoek van geredden uitwijst dat er, afgezien van totale uitputting, geen duidelijke oorzaak is, zoals bedwelming door giftige algen of onderkoeling. Zijn deze zwemmers het slachtoffer geworden van 'dood-water'? Dit verschijnsel, bekend uit de scheepvaart, duidt op een plotselinge afname van de snelheid bij gelijkblijvende voortstuwing, alsof het schip aan de grond loopt. Deze suggestie is zo sterk dat schepen na een ontmoeting met dood-water naar het dok gestuurd zijn om vermeende schade te laten repareren. Het blijkt dat dood-water optreedt wanneer het water 'gelaagd' is. In zee wordt dichtheidsgelaagdheid veroorzaakt door verschillen in temperatuur of zoutgehalte: warm (zoet) water is 'lichter' dan koud (zout) water. Kunnen ook zwemmers hier last van hebben? Drie hierboven geschetste omstandigheden ondersteunen dit vermoeden: (1) een diep meer, veel water en daarmee 'thermische traagheid' bevattend, (2) een warme periode, met veel instraling en opwarming, (3) kalm weer, weinig wind en daarmee weinig mechanische energie om het opgewarmde oppervlaktewater te mengen. Binnen enkele dagen kan zich een circa 1 meter dikke warme laag ontwikkelen, die voelbaar in temperatuur (en dus dichtheid) verschilt van de onderlaag. Wat is de invloed van zo'n gelaagdheid? Om dit te onderzoeken zullen we hier eerst stilstaan bij het verschijnsel dood-water, en vervolgens een zwemproef bespreken waarin aan een zwembad een warme laag water is toegevoegd.

Dood-water

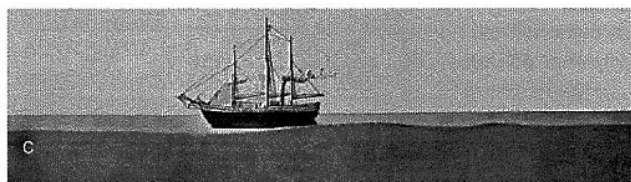
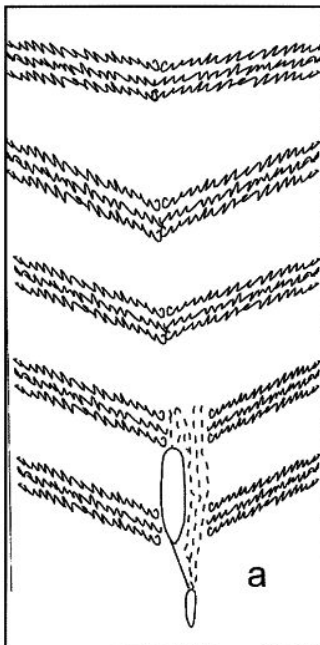
Het onderzoek naar dood-water is in gang gezet aan het eind van de 19^e eeuw toen het Noorse onderzoeksvaartuig Fram in de Barentssee enkele keren in dood-water kwam vast te zitten. De scheepssnelheid nam met een factor vijf af en die toestand kon wel een dag duren. Vilhelm Bjerknes opperde dat dit wellicht kwam doordat het schip in een gelaagde zee voer, en dat

het schip 'golven aan het trekken' was op het grensvlak tussen zoet oppervlakte- en zout dieper water. Hij liet dit uitzoeken door zijn student Vagn Walfrid Ekman, die er een uitvoerige studie van maakte. Deze interviewde ongeveer 70 ooggetuigen, deed 774 laboratoriumproeven, en schreef er in 1904 een dik rapport over (Ekman, 1904). Conclusie: Bjerknes had gelijk. Inderdaad kan een schip dat zich in een gelaagde zee voortbeweegt bij bepaalde snelheden veel meer weerstand ervaren, in het bijzonder wanneer het net zo diep steekt als de bovenlaag.

Energie bedoeld voor voorstuwing komt ten goede aan het opwekken van grensvlaktgolven. Het bijzondere is dat van die 'onderwatergolven' weinig te merken is aan het wateroppervlak. Pas bij nadere inspectie blijken enkele merkwaardige eigenschappen. Het water achter het schip is stil en ziet er glazig uit en het lijkt of de hele zee door het schip wordt meegesleept (figuur 1). Deze bewegingsloze aanblik leidde tot de term död-vand, dood-water (Ekman, 1904; Walker, 1991; Parker, 1999). Omdat het water ten opzichte van het schip bijna niet beweegt

valt de druk op het roer weg en wordt het schip stuurloos. Dit vormt ook nu nog een potentiële nachtmerrie voor kapiteins van miljoenen euro's kostende supertankers die de Nieuwe Waterweg op worden gesleept. In dat geval wordt een dunne laag 'zwaar' water nabij de bodem door opgewoeld slib gevormd.

Buitenissige observaties getuigen van een sissend geluid, kennelijk het gevolg van turbulente zones die het schip volgen (figuur 1). Viel er te ontkomen aan dood-water? Deze vraag



Figuur 1. Tekening, naar Ekman (1904) van een van de zeevarenden (a) die 100 jaar later bevestigd werd door een foto (b) van turbulente zones in het zog van het schip (Gill, 1982). In (c) een zijaanzicht van grensvlaktgolven uit een experiment met bewegingsloos oppervlak (Ekman, 1904).

hield de zeevarenden langdurig bezig en niets bleef onbeproofd. Met man en macht liep men van voorplecht naar achtersteven; er werd olie op de golven gegooid, en in een typisch menselijke reactie op het onbekende werd er zelfs op de zee geschoten (toen was het water zeker dood!), maar niets hielp. Het irritante was dat op enkele honderden meters afstand, een volstrekt vergelijkbaar schip ongehinderd kon passeren, zonder ook maar een greintje last te hebben van dood-water.

Ekman speculeerde dat dit verschijnsel mogelijk in de Romeinse tijd al een beslissende rol had gespeeld in een historische zeeslag tussen de vloten van Marcus Antonius en Cleopatra, bestaande uit grote logge boten, en die van Octavianus, bestaande uit kleinere en vooral snellere boten. Dit debacle werd geacht veroorzaakt te zijn door zuigvissen (Remora) die zich vasthechten aan de romp en de boot naar achteren trokken... De belangstelling om het mysterieuze verschijnsel op te lossen was dan ook groot.

Proeven met bootjes

Ekman (1904) bouwde de omstandigheden in een fjord in het laboratorium na. Hij vulde een tank met gekleurd zout water met daarboven kraanwater. Volgens werd een bootje voortgetrokken en werden foto's gemaakt van het grensvlak. Ook mat Ekman de weerstand die het bootje ondervond met een krachtmeter. Voor verschillende gewichten vond Ekman de resultaten als in figuur 2. Van boven naar beneden neemt het gewicht en daarmee de bootsnelheid (U) toe.

Bij toenemend gewicht neemt golfvorming toe (figuur 2), overigens zonder het oppervlak te verplaatsen. Met nog zwaardere gewichten komt het bootje los van deze golfreën, behoudens een enkele golf onder het schip, en snelt het

voort (figuur 2d). Merk op dat in geval van grensvlaktgolven (figuur 2a - c), het laagje zoet water onder de romp heel dun is vergeleken met de situatie dat de boot planeert op de grensvlaktgolf. In ons lab hebben we deze proef herhaald door zout aan de onderlaag en voedingskleurstoffen aan de bovenlaag toe te voegen. Met behulp van naaigaren en paperclips wordt een speelgoedbootje voortgetrokken.

Figuur 3 laat een echte dood-water situatie zien. De golven vormen een trein van eenlinggolven (solitonen). Een eenlinggolf bestaat uit een enkel dal, dat sneller beweegt naarmate het dieper steekt. De grootste golf bevindt zich direct achter het bootje, en de golven worden kleiner en langzamer naarmate ze verder weg zijn. Het bootje steekt in circa 42 seconden over, terwijl het er in ongelaagde omstandigheden, bij gelijke trekkracht, 22 seconden over doet. Enkele drijvende bolletjes blijken in het zog meegesleurd te worden (vergelijkbaar met het 'meeslepen van de zee'). Zoals het argwanende wetenschappers betaamt, hebben we het proefje onder identieke omstandigheden 6 keer herhaald; tot onze verbijstering met steeds verschillende uitkomsten. De ene keer deed het bootje er 42 seconden over, de andere keer 21 (zelfs sneller dan in ongelaagd water!), zie figuur 4. De verschillen in oversteektijd impliceren dat U soms groter en soms kleiner is dan de kritische snelheid c' . Merk op dat het verschil in oversteektijd (factor twee) nog schraal afsteekt bij de factor 5 op zee... Opmerkelijk was ook dat het bootje soms eerst versnelde, maar later leek te worden tegengehouden, zodat de snelheid afnam (figuur 4c) totdat de grensvlaktgolven het inhaalden, braken en weer een zet gaven.

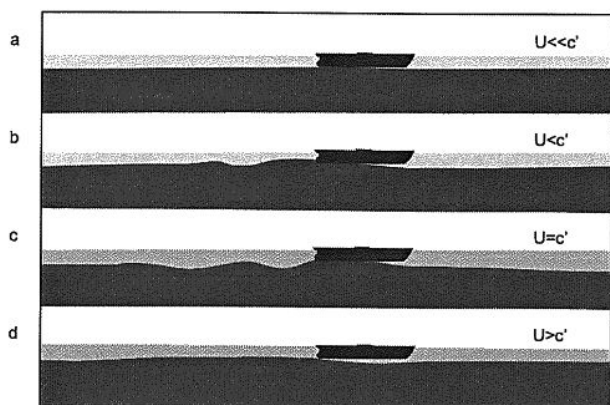
Veranderde de (schijnbaar geringe) menging in de ene proef de gelaagdheid in de volgende? Waarschijnlijk is dat proeven te snel achter elkaar werden uitgevoerd en dat golven nog heen en weer klotsten (zoals soms te zien was). Het waren dus niet echt "identieke" omstandigheden.

Ekman (1904) interpreteerde het opwekken van golven als volgt. Hij beschouwde, zoals in het lab, een schip dat nagenoeg de

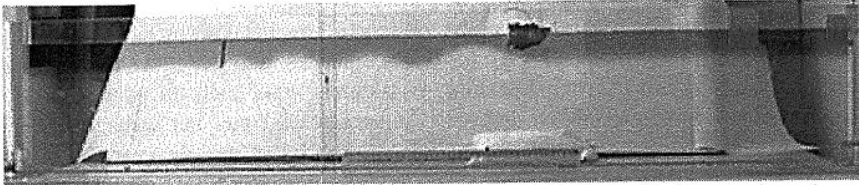
breedte van het kanaal had (figuur 5). Dit schip zal dan het water in de oppervlaktelaag voor zich uit opstuwen. Het hoogteverschil met het water achter de boot impliceert een drukverschil waartegen het bootje moet opboksen. Maar de verhoogde druk vóór het schip zorgt ook voor een neerwaartse beweging van het grensvlak tussen zoet en zout water. Als de bovenlaag onder het schip kan doorstromen, en door dit nauwe laagje versnelt, dan worden golven gecreëerd op het grensvlak. Deze grensvlaktgolven zijn vergelijkbaar met oppervlaktgolven, behalve dat de teruggedrijvende zwaartekrachtsversnelling g over het grensvlak gereduceerd wordt met het relatieve dichtheidscontrast: $g' = g(\rho_1 - \rho_2)/\rho_1$, met ρ_1 en ρ_2 de dichtheid van onder- en bovenlaag. De snelheid van lange oppervlaktgolven is \sqrt{gh} , waarin h de waterdiepte. Van grensvlaktgolven is deze $c' = \sqrt{g'h'}$, met $h' = h_1 \cdot h_2 / (h_1 + h_2)$, waarin $h_{1,2}$ de laagdiktes van onder- en bovenlaag. Wanneer bootsnelheid $U \ll c'$ worden geen grensvlaktgolven opgewekt; als $U < c'$ (subkritische snelheden) of $U = c'$ (figuur 2b,c en 3) wel. Voor $U > c'$ (superkritische snelheden) kunnen de golven de boot niet meer volgen (figuur 2d) en kan de boot juist snel oversteken, soms zelfs sneller dan in homogeen water doordat het grensvlak fungeert als smeermiddel waarover in beweging gebracht oppervlaktewater makkelijker glijdt dan over de bodem.

Ekman vond het verband tussen weerstand (in grammen: gemeten kracht gedeeld door zwaartekrachtsversnelling g) en U (figuur 6). De verticale pijl geeft c' aan. De meeste weerstand wordt iets onder c' gevonden. Deze hobbel staat voor het dood-water. Merk op dat voor homogeen water de weerstand kwadratisch toeneemt met U (monotoon stijgende curves). Voor hoge $U \gg c'$ en op diep water tendert de weerstand naar die welke ondervonden wordt in homogeen water. Als de golflengte die door de boot wordt veroorzaakt (circa twee maal de romplengte) groter is dan h kan deze weerstand zelfs minder zijn dan in homogeen water (gestippelde lijn).

Doorsnijding van de hobbelcurve met een horizontale lijn leert dat schepen gelijke weerstand kunnen ondervinden bij verschillende snelheden. Als de aandrijving (motorvermogen, windsterkte) gelijk is aan de weerstand blijken verschillende evenwichtstoestanden te bestaan: wel of geen dood-water. In ons lab vonden we soms een dynamische evenwichtstoe-



Figuur 2. Ekman's (1904) proeven met naar rechts bewegende boot in gelaagd water. De grensvlaktgolf wordt gekarakteriseerd door snelheid c' .



Figuur 3. Naar rechts bewegende bootje met trein van solitonen achter zich in 2 m lang kanaal met gelaagd water.

stand met hysteresis. De aandrijving (het gewicht) versnelt de boot, trekt deze over de weerstandshobbel heen (bovenste pijl) wat leidt tot een hoge snelheid. Echter, dan wordt de boot gehinderd, kennelijk door toename van meegesleepte massa, zodanig dat de snelheid eerst geleidelijk maar dan plotsklaps afneemt (onderste pijl). Dit resulteert, door turbulente processen, in verbreking van de binding van water en boot (ontbrekend in kwantitatieve beschrijvingen als van Miloh en Tulin 1988; Miloh et al 1993), en de boot is weer vrij om te versnellen.

Het dood-water verschijnsel, waar ook windgedreven ijsbergen last van ondervinden (Pite et al 1995), blijkt zijn tegenhanger te bezitten voor zowel oppervlakte-, als geluidsgolven. Dit suggereert dat, analoog aan wat bekend staat als respectievelijk de rompsnelheid en de geluidsbarrière, dood-water getuigt van het bestaan van een interne-golfbarrière. Kunnen, in deze terminologie, zwemmers problemen krijgen met het doorbreken van de interne-golfbarrière? Om dat na te gaan is het volgende zwembadexperiment uitgevoerd.

Zwembadexperiment

Zwemmen in homogeen versus gelaagd water

Wat gebeurt precies bij zwemmen? Beschouw een zwemmer die naar links

gaat. Het verticale streepje in Figuur 7 stelt een hand voor die onder water achterwaarts (naar rechts) bewogen wordt, waardoor, achter de hand, de druk toeneemt, aangegeven met een plus-teken. Het drukverschil stelt de zwemmer in staat zich daartegen af te zetten. Het biedt een 'vast punt', vergelijkbaar met wanneer men zich aan een drijflijn voorttrekt. Dit punt is min of meer vast omdat drukverstoringen in homogeen water niet kunnen wegllopen. In alle richtingen verkleint de drukverstoring. Natuurlijk zal het drukverschil wel een stroming rond de hand opwekken, maar dat vergt tijd.

Wanneer de hand in gelaagd water, vlak boven het grensvlak (gestreepte lijn), wordt bewogen kan de drukverstoring wél instantaan wegllopen, namelijk als grensvlaktgolf. Aan de achterkant wordt het grensvlak omlaag geduwd; aan de voorkant omhoog-gezogen. Daarmee vervalt de mogelijkheid om zich tegen water af te zetten.

Zwemexperiment

Op 17 september 2004 werden enkele experimenten in gelaagd water verricht in het uit twee bassins bestaande openluchtbad Molenkoog te Texel. Het water-niveau in het diepe bad (25x16m) was daartoe verlaagd tot 140 cm. Dit bad was vervolgens in een week aan de lucht afgekoeld (van 23°C tot 17°C). Het ondiepe

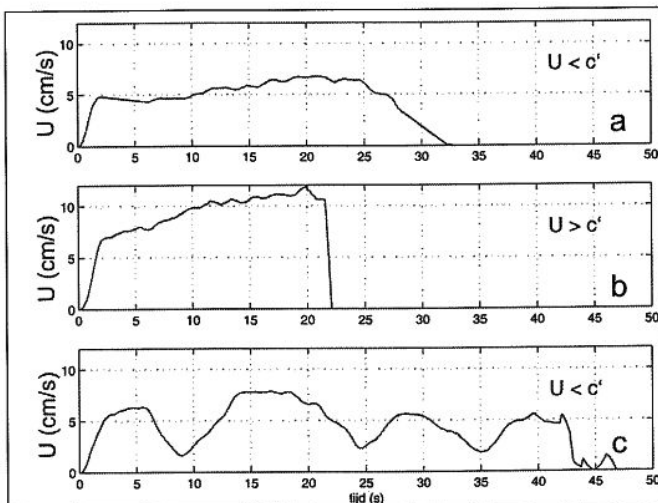
bassin was in die periode afgedekt en verwarmd tot 28°C. Op de ochtend van het experiment werd in 2 uur 140.000 liter

warm water overgeheveld. Om menging te voorkomen werd een isolatiedeken op het koude water in het diepe bad aangebracht. Na verwijdering van de deken was bij eerste vulling het waterniveau verhoogd met 35 cm water van (zo bleek) 25.5°C. In een tweede experiment werd nog een extra laagje van 10 cm toegevoegd. Aan twee drijflijnen werd op vijf plaatsen een ketting verbonden, met aan iedere ketting, om de 10 cm, 16 snelreagerende thermometers (responstijd <0.25s). Drie thermistorkettingen zijn zichtbaar in figuur 8 (zie voorzijde).

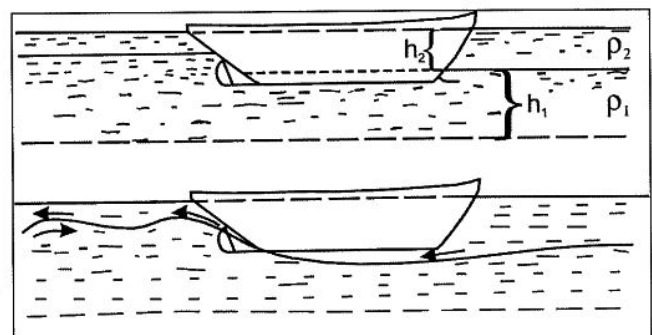
De diepte van het zwembad neemt gewoonlijk af van 2.10 m tot 1.40 m. Vanwege de verlaagde waterstand werd daarom 9 m voor de ondiepe kant gekeerd. De zwemproef bestond daarmee uit het per zwemslag tien keer afleggen van een baan van 16m. Drie personen zwommen na elkaar ieder steeds drie slagen (borstcrawl, rugslag en schoolslag). Er werd uitdrukkelijk gevraagd zich niet af te zetten tegen kant of bodem. De registratie van de temperatuur (iedere seconde) op de 5x16 sensoren wordt in figuur 9 om de halve graad weergegeven door middel van isothermen.

De temperatuurregistraties laten zien dat de gelaagdheid 17-25.5°C behoorlijk scherp is. Tijdens het zwemmen worden er flink wat golven opgewekt (afhankelijk van de afstand van de zwemtrajecten tot de instrumenten), maar verrassenderwijze met een vrij lange periode van zo'n 50 seconden. Hoewel zwemmen een cyclische beweging is met een periode van 1-3 seconden, is daar niets van terug te zien!

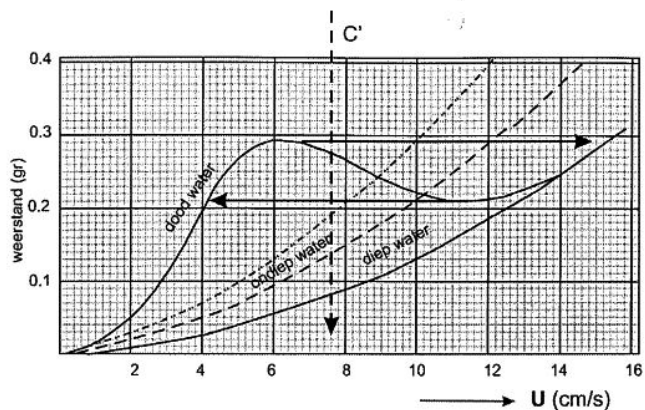
Zien we zwemmers ietwat oneerbiedwaardig als 'obstakels', dan kunnen we denken dat, net als voor een boot, golven worden opgewekt die twee keer zo lang zijn als het obstakel; voor de zwemmers circa 3.5m. Delen we dit door de waargenomen 50 seconden dan vinden we een



Figuur 4. Bootsnelheid (in cm/s) als functie van de tijd (in s) van een bootje dat in een twee-lagen vloeistof door een kanaal wordt getrokken. Analyse van 3 videobeelden van 6 op elkaar volgende experimenten die onder identieke omstandigheden gedaan zijn.



Figuur 5. Schets van naar rechts bewegende boot in gelaagd water (naar Ekman, 1904).



Figuur 6. Weerstand gemeten als functie van snelheid (naar Ekman, 1904). Voor uitleg zie tekst.

snelheid van 7cm/s. Dit komt dicht bij de schatting van de grensvlaktgolfnelheid c' als we het dichtheidsverschil over het grensvlak $\Delta\rho$ berekenen uit het gemeten temperatuurverschil ΔT , dus $\Delta\rho = \alpha \Delta T$ (met thermische uitzettingscoëfficiënt $\alpha = 0.2 \text{ kg m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Met $\Delta T = 8.5 \text{ }^\circ\text{C}$ vinden we met laagdiktes $h_1 = 1.4\text{m}$, $h_2 = 0.35\text{m}$, en gemiddelde dichtheid $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ een waarde van $c' = 7 \text{ cm/s}$. Een dergelijke golfnelheid wordt ondersteund door het faseverschil in de waargenomen golftoppen, aangegeven door de lijn in de temperatuurregistraties op de 2 meter uit elkaar gelegen kettingen (ch 6 en 7, linksonder in figuur 9). In open water kan dit door grotere dikte van de bovenlaag een factor 2-3 groter zijn. Vergelijken we deze snelheid c' echter met een typische zwemsnelheid van $U = 50\text{--}100 \text{ cm/s}$ dan komen we tot de verrassende conclusie, dat zwemmen in principe altijd superkritisch gaat ten opzichte van de grensvlaktgolfnelheid. 'Supersoon' zouden we voor geluidsgolven zeggen! Tabel 1 toont de details voor de diverse zwemslagen en laat zien dat je in gelaagd water juist

laagt, of dat er minder wrijvingsverlies is).

Hiermee lijkt de hypothese, dat doodwater het zwemmen in gelaagd water bemoeilijkt, verworpen te moeten worden. Echter..., hier staat de subjectieve

Tijd (s)	Ongelaagd	1ste gelaagdheid	2de gelaagdheid
Crawl	221	196	200
Rugslag	294	276	284
Schoolslag	243	249	233

Tabel 1: Gemiddelde zwemduur (s) over 10 banen van 16 m.

ervaring van in ieder geval de eerste zwemster tegenover. Zij ervoer zwemmen in gelaagd water als 'wel tien keer zwaarder dan in ongelaagd water'. Kan het zijn dat zwemmers een bepaalde snelheid willen halen, en meer arbeid leveren om dit te verwezenlijken? Daarnaast mag zwemmen dan weliswaar kennelijk superkritisch gaan, maar wanneer men een groot meer overzweemt zal men af en toe even uitrusten. Dat zijn de momenten waarop men subkritisch gaat, en bij hernieuwd opstarten te maken kan krij-

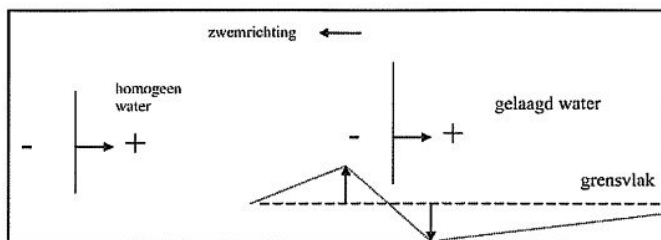
gen met verhoogde golfweerstand: doodwater. Keerpunten in het zwemparcours tonen dat daar inderdaad een 'valse slag' (zwebeweging zonder voortstuwing) gemaakt wordt alvorens men goed op gang komt.

Bootexperiment

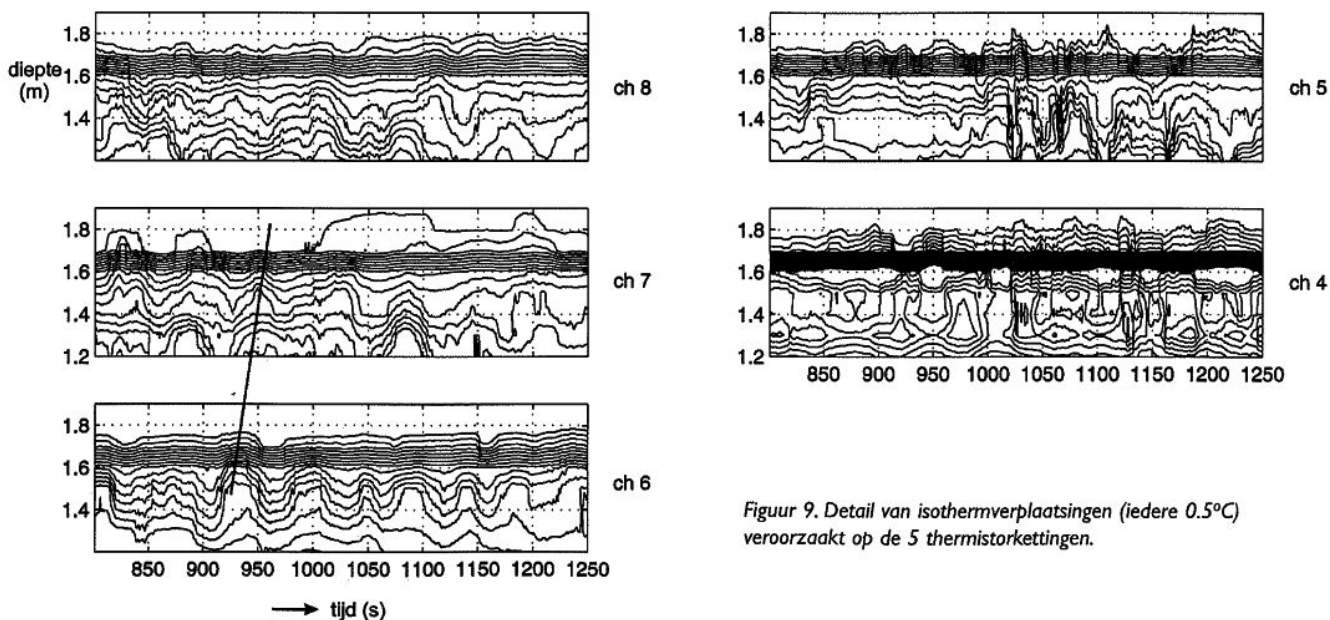
De aanwezigheid van gelaagd water in het zwembad bood de gelegenheid om de laboratoriumproef met de boot op grotere schaal te herhalen. Daarvoor werd een 30 cm diep stekend zeilbootje ('Optimist') gebruikt welke door een winch

(draaitrommel) met constante snelheid werd voortgetrokken. Helaas was de minimale treksnelheid (23 cm/s) wederom superkritisch, maar toch zou bij het starten vanuit rust iets van doodwater te merken moeten zijn. Om de kracht op de kabel te meten werd deze aan de overkant aan een krachtmeter gebonden en teruggevoerd naar de winch.

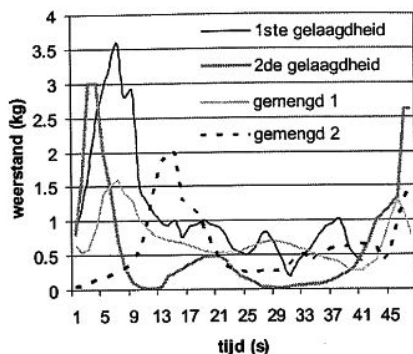
Figuur 10 laat zien dat tijdens proeven met gelaagd water (de eerste met een bovenlaagdikte van 35 cm; de tweede



Figuur 7. Schematische weergave van drukveranderingen achter een hand.



Figuur 9. Detail van isothermverplaatsingen (iedere 0.5°C) veroorzaakt op de 5 thermistorkettingen.



Figuur 10. Weerstand van door een winch getrokken bootje tijdens oversteek van een 25 meter bad in gelaagd en gemengd water.

met 45 cm) in het begin inderdaad meer weerstand wordt gemeten dan later, en ook meer dan in proeven waar het water actief "gemengd" was.

Conclusie

Het verschijnsel dood-water kan geassocieerd worden met de aanwezigheid van een interne-golfbarrière, vergelijkbaar met de geluidsbarrière. Bij snelheden vlak onder de interne-golfsnelheid gaat veel energie verloren door golfopwekking, ten koste van voortstuwing. Schepen kunnen 'vast komen te zitten': een grote hoeveelheid water meeslepen, welke gevangen zit in een golfreën die

door de boot wordt meegetrokken.

Typische zwemsnelheden lijken superkritisch in gelaagd water. Toch blijkt in het zwemexperiment dat zwemmen in gelaagd water als zwaar wordt ervaren, mogelijk veroorzaakt door vele passages (bij ieder keerpunt) van de interne-golfbarrière. In de toekomst dient dit 'zwaar' geobjectiveerd te worden door fysiologische metingen (van hartslag, bloeddruk, ...). Ook moet worden nagegaan of 'zwemmen met subkritische snelheden' (watertrappelen) bemoeilijkt wordt. Immers, aangezien de dichtheid van het menselijk lichaam iets groter is dan die van water moet men ook altijd een beetje opwaarts zwemmen. Als het vermogen om zich tegen water af te zetten ook in verticale zin gefrustreerd wordt zou het wel heel moeilijk worden om gevolg te geven aan de Zeeuwse wapenspreuk *luctor et emergo* (ik worstel en kom boven)...

Dankwoord

Wij zijn dankbaar voor de voortreffelijke samenwerking en hulp van medewerkers van zwembad Molenkoog, Gert Pansier & Piet Keijser, zweminstructrices Anita van Egmond, Ria Keyser en Connie Joling, NIOZ-bedrijfsbrandweer. Ronald

van Bommel, Judith Bredewold en Theo Kuip, collega's Frans Eijgenraam, Lucas Merckelbach, Ruud Groenewegen, Sander Asjes, Yvo Witte, Jack Schilling, Edwin Keijzer, Bert Aggenbach, Gerard Manshanden, Guido Terra, Maarten Buijsman, Herman Ridderinkhof en Uwe Harlander, en studenten Joost de Bruijn en Frans Buschman. Wij bedanken TU Delft voor het uitlenen van de bak waarin de bootproeven gedaan zijn en Margriet Hiehle voor grafische bewerkingen.

Literatuur

- Ekman, V.W., 1904: On dead-water. The North-Polar expedition 1883-1886, Vol V., Ch. XV, Christiania, Noorwegen.
- Gill, A.E. 1982 Atmosphere-Ocean dynamics. Acad. Press.
- Miloh T. and M.P. Tulin, 1988: A theory of dead water phenomena. Proc. 17th Symposium on Naval hydrodynamics 127-150, Nat. Ac. Press.
- Miloh T., M.P. Tulin and G. Zilman, 1993: Dead-water effects of a ship moving in stratified seas. J. Offshore Mech. & Arctic Eng. 115, 105-110.
- Parker, B. 1999 Waves beneath the sea. Mariners Weather Log - Physical Oceanography column.
- Pite, H.D., D.R. Topham and B.J. van Hardenberg, 1995: Laboratory measurements of the drag force on a family of two-dimensional ice keel models in a two-layer flow. J. Phys. Oceanography 25, 3008-3031.
- Walker, J.M., 1991: Farthest North, dead water and the Ekman spiral, Part 2. Weather 46, 158-164.

De oceaan als bron van klimaat-schommelingen

LIANKE TE RAA (IMAU)

In de circulatie van de oceanen bestaan natuurlijke variaties en daarmee samenhangende klimaat-schommelingen. Een voorbeeld is de Atlantische Multidecadale Oscillatie, een verschijnsel dat gekenmerkt wordt door langzame veranderingen in zeewatertemperatuur en oceaanstromingen in de Noord-Atlantische Oceaan. Bij het Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU) zijn we op zoek gegaan naar de oorzaak van deze oscillatie.

Het gemiddelde beeld van de oceaanstromingen is vrij goed bekend (zie Kader en figuur 1). De werkelijke stromingen kunnen echter sterk variëren, met als gevolg dat ook het warmtetransport verandert, evenals de afgifte van warmte aan en opname van warmte vanuit de atmosfeer. Ook de plaatsen waar opname of afgifte van warmte optreedt zijn aan dit soort veranderingen onderhevig. Een van deze variaties in de oceaancirculatie is de zogenaamde Atlantische Multidecadale Oscillatie (ook wel AMO genoemd). Deze oscillatie kenmerkt zich door periodes van ongeveer twintig tot

dertig jaar waarin het oppervlaktewater in de Noord-Atlantische Oceaan relatief warm is, en soortgelijke periodes waarin het zeewater relatief koud is (figuur 2). De periode van deze oscillatie lijkt zo'n 60 jaar te bedragen. Om dit verschijnsel te beschrijven heeft men een index ingevoerd, de zogenaamde AMO-index. Deze is gedefinieerd als de afwijking van de jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur van het zeewater over de periode 1871-2003, gemiddeld over de hele Noord-Atlantische Oceaan. De opwarming tijdens warme periodes (positieve AMO-index) treedt op in het overgrote

deel van de Noord-Atlantische Oceaan, met maximale opwarming van ongeveer een halve graad. Alleen een gebied ten oosten van Noord-Amerika is dan juist wat kouder dan normaal. Tijdens periodes van negatieve AMO-index is dat omgekeerd.

In steeds meer recent onderzoek worden aanwijzingen gevonden dat deze Atlantische Multidecadale Oscillatie allerlei effecten op het klimaat heeft in diverse gebieden die grenzen aan de Noord-Atlantische Oceaan. Zo is een verband gevonden tussen de AMO-index en de oppervlaktetemperatuur gemiddeld over de maanden juni, juli en augustus in de VS en Oost-Europa: tijdens periodes van positieve AMO-index kan het tot wel een graad warmer zijn dan tijdens periodes van negatieve AMO-index (figuur 3, zie achterzijde) zie ook Sutton and Hodson (2005). Ook tussen de AMO en de regenval in de Verenigde staten werd een duidelijke (negatieve) correlatie gevonden: minder regen tijdens periodes van positieve AMO-index (Enfield et al, 2001). Dit effect komt ook tot uitdrukking in de correlatie van de AMO met de uitstroom van de Mississippi. Deze uitstroom neemt met ongeveer 5% af tij-