

Zwemmers op zoek naar een vast punt

Archimedes' uitspraak "Geef mij een vast punt en ik zal de aarde bewegen" geldt ook voor zwemmers. In hun geval om, op meer bescheiden schaal, hun lichaam voort te stuwen. Tijdens mooi weer kan dat vermogen om zich tegen water af te zetten verminderen. Opwarming van oppervlaktewater leidt tot een grensvlak tussen watermassa's van verschillende dichtheid. Het drukverschil dat door de bewegende hand wordt opgewekt kan dan 'verspild' worden doordat het grensvlak uit evenwicht gebracht wordt. Het gevolg is dat de hand zijn vaste punt mist en het water minder 'zwembaar' wordt.

Leo Maas

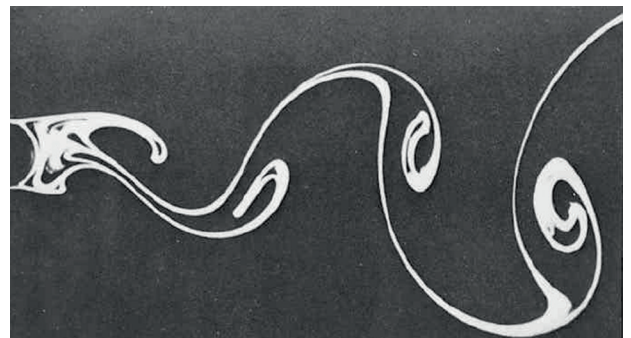
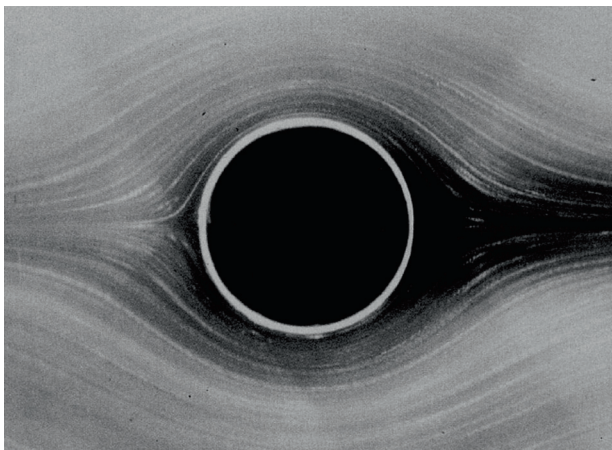
188

Stroming en oppervlaktegolven kunnen de voortstuwing van boten, zwemmers of roeiers hinderen. Eén uiting daarvan is dat ieder schip een schijnbaar onbreekbare snelheidsbarrière kent, de rompsnelheid. Op diep water is deze evenredig met de wortel van de lengte van het schip. Bij nadering van deze rompsnelheid zal een schip steeds meer energie stoppen in de opwekking van bijna even snel bewegende oppervlaktegolven. Slechts enkele sloopstypen, zoals catamarans en speedboten, zijn in staat deze barrière

te doorbreken, om vervolgens te plannen (te surfen) op de hekgolf achter het schip.

Het is minder bekend dat een vergelijkbare hindernis ook onder water kan optreden, namelijk door golfvorming op grensvlakken tussen waterlagen van verschillende dichtheid. Dichtheidsverschillen treden in meer of zee op door temperatuur- en/of zoutgehalteverschillen. Voor schepen staat de golfweerstand als gevolg van grensvlaktegolven bekend als 'dood water' (zie kader Dood water). Het treedt op wanneer (1) de scheepskiël in de

buurt van dat grensvlak zit en dus even diep steekt als de bovenlaag, en (2) sloopssnelheid $U \approx c'$, de snelheid waarmee golven op dit grensvlak bewegen. Deze snelheid wordt bepaald door de gereduceerde zwaartekracht $g' = g \Delta\rho/\rho$, het product van zwaartekrachtsversnelling g en de verhouding van de dichtheidsafname tussen onder- en bovenlaag $\Delta\rho \approx 25 \text{ kg m}^{-3}$ en gemiddelde dichtheid $\rho \approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$. Als bovenlaagdikte $h_1 \ll h_2$, de dikte van de onderlaag, is deze grensvlaktegolfsnelheid $c' \approx \sqrt{(g' h_1)} \approx 1 \text{ m s}^{-1}$ voor $h_1 = 4 \text{ m}$.



Figuur 1 Stroming rond een bewegende cilinder verandert bij toenemende snelheid van laminair symmetrisch (links) in een alternerende straat van Von Karman-wervels (rechts) [3].

Dood water

Onderwatergolfweerstand werd aan het eind van de negentiende eeuw ontdekt door de Noorse poolreiziger, wetenschapper en politicus Fridtjof Nansen. Toen hij door de Noorse fjorden richting de Barentszee voer, merkte hij dat zijn zeilschip, de Fram, regelmatig en plotsklaps tot stilstand kwam, alsof het schip aan de grond gelopen was. Dit was echter niet het geval. Zijn bemanningsleden vertelden hem dat dit vaker voorkwam. Zij noemden het verschijnsel 'dood water', vanwege de rimpelloze, glazige aanblik die het water achter het schip op zo'n moment bood. De meteoroloog Vilhelm Bjerknes vermoedde dat dit veroorzaakt werd door de typische omstandigheden in een fjord, waar 'zoet' smeltwater zich boven Atlantisch zout water nestelt. Hij realiseerde zich dat een schip

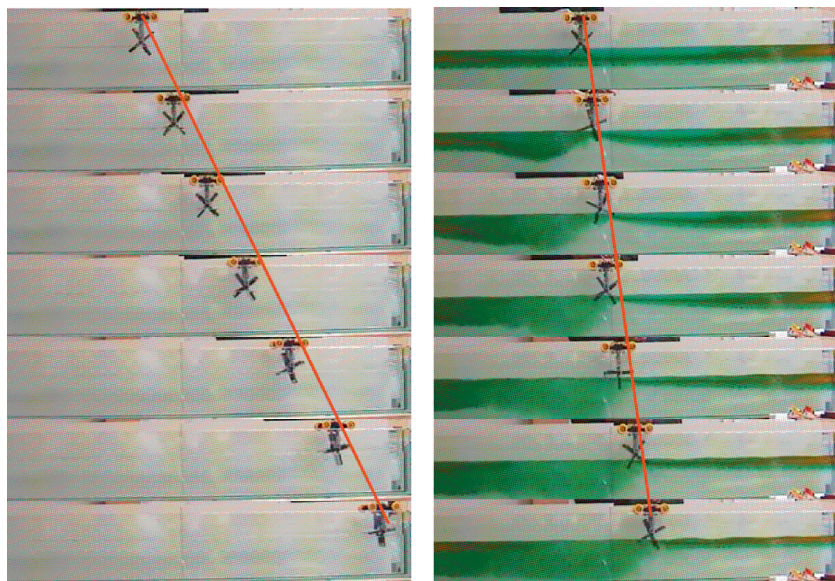
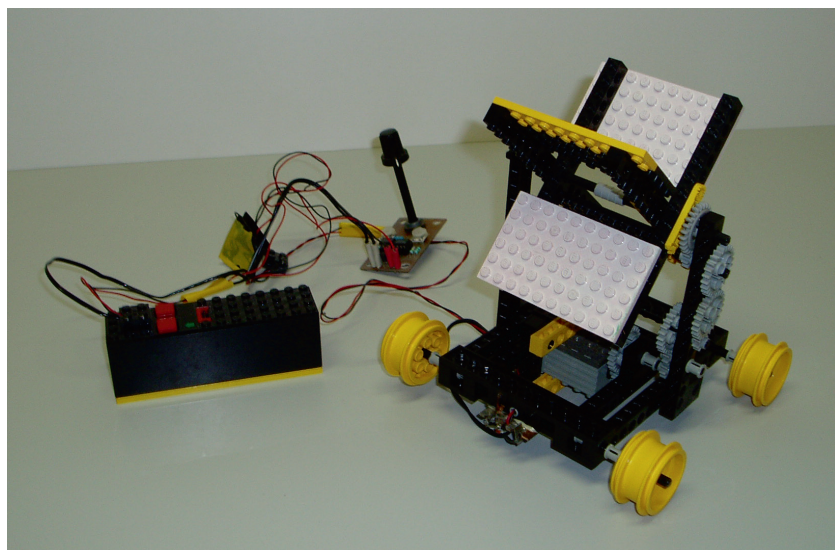
golven op het grensvlak tussen beide watermassa's kan veroorzaken, speciaal wanneer de snelheid van die grensvlakgolven ongeveer gelijk is aan de scheepssnelheid. Dit werd door diens student Vagn W. Ekman in een aantal laboratoriumproeven bevestigd [1]. Ekman (1904) ontdekte dat een verlies aan manoeuvreerbaarheid dat met dood water gepaard gaat, in de oudheid mogelijk een rol kan hebben gespeeld in de belangrijke zeeslag voor de kust van Actium (31 BC) waar, volgens Plinius de jongere, de vloot van Marcus Antonius en Cleopatra een gevoelige en onverwachte nederlaag leed tegen de uit veel kleinere schepen bestaande vloot van Octavianus (de latere keizer Augustus).

Zwemmen in gelaagd water

Maar hebben zwemmers ook last van dood water? Die stuwten tenslotte ook een 'object' door het water voort. Enerzijds lijkt dat niet het geval. Zwemmers steken niet zo diep, misschien 40 cm. En in ondiep water, als de bovenlaag ook ongeveer 40 cm is, zullen onderwatergolven minder snel lopen dan wanneer de bovenlaag meters dik is en het dichtheidscontrast groter. Onderwatergolven kunnen een factor tien langzamer gaan dan zwemmers, die 1 of 1,5 m/s bereiken, zodat in dit geval koppeling van lichaam en onderwatergolf uitgesloten lijkt. Anderzijds worden met enige regelmaat problemen gerapporteerd die recreatieve zwemmers bij mooi weer ondervinden, zoals oververmoeidheid, in sommige gevallen zelfs leidend tot verdrinking.

Nu vormt 'mooi weer' – een zonnige, windstille dag – de ideale omstandigheid voor het ontstaan van gelaagdheid in open water. En hoewel onderzoek nooit valt uit te sluiten lijken meldingen van oververmoeidheid erop te wijzen dat het water zelf toch mogelijk 'minder zwembaar' is.

Eén reden hiervoor kan zijn dat bij zwemmen de hand tegen de zwemrichting in beweegt met een snelheid iets boven de zwemsnelheid. Hierdoor zal de hand ten opzichte van het ruststelsel veel langzamer bewegen dan het lichaam en mogelijk wél kunnen koppelen aan de grensvlaktgolven. Experimenten in een tank van $9,5 \times 2,3 \times 1,3 \text{ m}^3$ bevestigden dit. De tank is gevuld met een zoute onderen en een 'zoete' bovenlaag (van onge-



Homogeen

Gelaagd

Figuur 2 Peddelkarretje (boven) in omgekeerde positie zich voorttrekkend over de rand van een bak gevuld met homogeen (linksonder) of gelaagd water (rechtsonder). Zeven snapshots met vast tijdsverschil laten de positie van het karretje zien. De snelheid van het karretje is omgekeerd evenredig met de helling van de rechte, rode lijn die de opeenvolgende posities bij benadering verbindt [4].

Drukverdeling rond hand

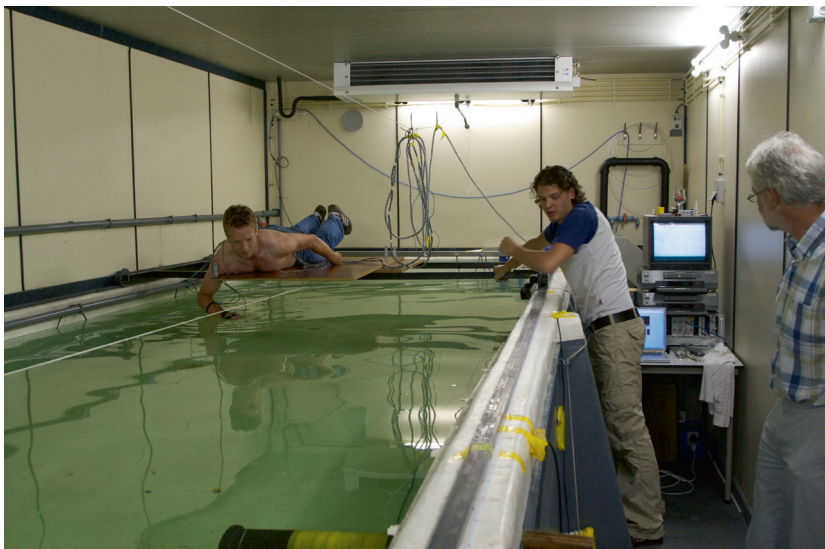
Het plaats- ($x=(x,y,z)$) en tijds- (t) afhankelijke snelheidsveld ($u(x,t)$), veroorzaakt door verstoringen van een ongelaagde, homogene vloeistof, wordt verondersteld geen rotatie te bevatten, $\nabla \times u = 0$. Hieruit volgt dat het vectorsnelheidsveld $u = \nabla \phi$ te beschrijven is met behulp van een scalaire potentiaal ϕ , gerelateerd aan de druk in de vloeistof. Aangezien vloeistoffen nagenoeg onsamendrukbaar, oftewel divergentievrij zijn, $\nabla \cdot u = 0$, wordt deze potentiaal beheerst door de Laplacevergelijking:

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0 \quad (1)$$

Dit is een elliptische vergelijking waarvan bekend is dat deze zijn extreme waarden aanneemt op de rand van het vloeistofdomein. De ver onder het wateroppervlak be-

wegende hand kent dan ook als 'rand van het vloeistofdomein' alleen die hand. Het gevolg is dat zowel de maximale als minimale druk aan dit bewegend object 'vastzit'. Dit drukverschil leidt in de vloeistof tot een quasi vast punt waartegen men zich kan afzetten. 'Quasi' omdat op langere tijdschaal het drukverschil vereffend wordt door viskeuze stroming.

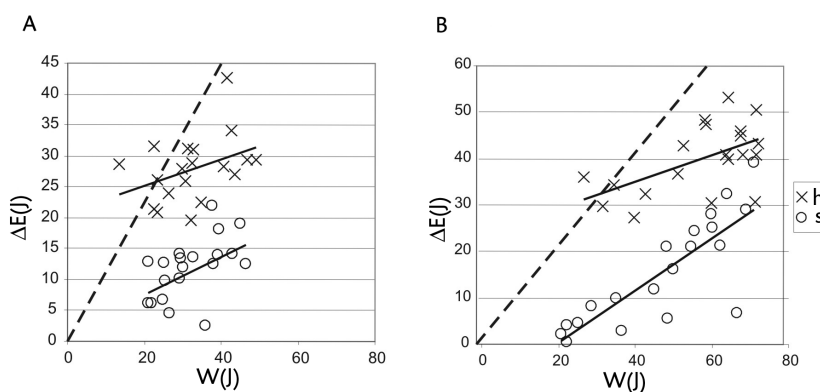
In de buurt van het wateroppervlak of van een grensvlak tussen waterlagen van verschillende dichtheid kan dit drukverschil tussen voor- en achterzijde van het bewegend object echter snel weglekken door het oppervlak of grensvlak weg te duwen of omhoog te zuigen. Dit leidt tot golfvorming op oppervlak of grensvlak en daarmee tot golfweerstand of stralingsdemping. Deze vorm van weerstand treedt vooral op wanneer de snelheid van het bewegend object vergelijkbaar is met de golfnsnelheid.



Beweging bij een grensvlak

Het verschil lijkt te ontstaan doordat de hand minder 'grip' vindt in het water. Dit wordt gesuggereerd doordat de hand in gelaagd water anders reageert op een zwemslag dan in homogeen water: in gelaagd water trillen de vingers van de hand zijwaarts, terwijl dat niet gebeurt in homogeen water. Het water 'ziet' de hand kennelijk niet als een plaat of roeispaan, maar als een viertal evenwijdig georiënteerde, bewegende cilinders. Als de handsnelheid ten opzichte van het water laag is, zal het water laminair, symmetrisch om de vingers heen stromen. Maar boven een bepaalde kritische snelheid treedt turbulentie op en zal zich achter iedere vinger een wervelstraat met alternerende wervels ontwikkelen – een Von Karman-wervelstraat (zie figuur 1). Die alternerende wervels gaan gepaard met van links naar rechts wisselende drukverdelingen en brengen de vingers in laterale trilling. Wat dit leert is dat een hand die zich in een gelaagde vloeistof in de buurt van een grensvlak achterwaarts beweegt, bij dezelfde inspanning kennelijk een grotere snelheid bereikt ten opzichte van het ruststelsel (het stilstaande water) dan in homogeen water. Waarom is dat zo? En wat heeft dit te maken met verminderde zwembaarheid?

Het drukverschil dat over de hand wordt opgebouwd, tussen palm en achterkant van de achterwaarts bewegende hand, wordt gebruikt om zich tegen het water af te zetten. In een ho-



Figuur 3 Kinetische energiewinst (ΔE) tegen door de hand geleverde arbeid (W) van 'zwemmer' op gesleepte kar in een aantal experimenten in homogeen (x) en gelaagd water (o) voor twee zwemmers, A en B. Arbeid W is bepaald door het over de hand gemeten drukverschil te vermenigvuldigen met handoppervlak en door de hand in een slag afgelegde afstand; kinetische energiewinst (ΔE) is berekend uit de snelheidstoename van kar met zwemmer tussen begin en eind van een slag [2].

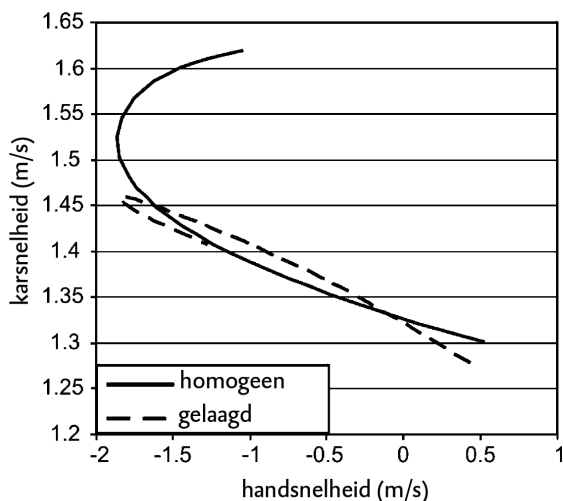
veer 70 cm). Zelfs over de geringe afstand van 5 meter, beschikbaar in het laboratorium, gaat zwemmen in gelaagd water zo'n 15% langzamer en

heeft de zwemmer ook meer slagen nodig dan in water met een uniforme dichtheid [2].

Leo Maas (1956) is in 1987 in Utrecht gepromoveerd op gelijkshakeling van getijden. Hij werkt als oceanograaf bij het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) te Texel en is sinds 2007 verbonden aan de Universiteit Utrecht als bijzonder hoogleraar bij het Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek Utrecht (IMAU).



Leo.Maas@nioz.nl



Figuur 4 Karsnelheid tegen handsnelheid in homogeen en gelaagd water wanneer de hand nog onder water is [4] (met dank aan Sander Ganzevles).

mogene vloeistof zit dit drukverschil vast aan de hand (zie kader *Drukverdeling rond hand*). Maar in een gelaagde vloeistof lekt over- en onderdruk weg doordat het naburige grensvlak instantaan uit evenwicht kan worden gebracht. Dit verklaart waarom in gelaagd water de bewegende hand minder weerstand (tegendruk) ervaart en de handsnelheid navenant hoger ligt. De keerzijde van een hogere snelheid van de hand door het water, of beter, van een lager instantaan drukverschil over de hand, is dat het voortstuwend koppel dat op het lichaam werkt (kracht maal 'arm' – letterlijk deze keer!) in gelaagd water geringer is en dat het zwemvermogen hierdoor afneemt.

Voortstuwing in homogeen en in gelaagd water

Om de invloed van de aanwezigheid van een grensvlak in de buurt van een bewegende hand verder te bestuderen zijn twee proeven uitgevoerd. In de eerste proef is een karretje van Lego gemaakt dat over de rand van een glazen bak kan rijden (figuur 2). Het karretje sleept zich als een Mississippi-boot voort met behulp van een bewegend schoepenrad (de 'handen'). Een motortje drijft het schoepenrad aan dat in het water steekt. Onder verder gelijke omstandigheden blijkt het karretje in homogeen water meteen in beweging te komen, maar in gelaagd water nauwelijks. Daar maalt het schoepenrad eerst een tijdje rond, terwijl het grensvlakkolven maakt en beide watermassa's verplaatst en mengt. Pas wanneer het rad tot in de onderste laag water weet te steken komt het vehikel eindelijk in beweging (figuur 2). In een tweede proef is dit op grotere schaal nagebouwd. Een kar rijdt over

de rand van een basin gevuld met homogeen of met gelaagd water en de kar krijgt een beginsnelheid door middel van een valgewicht en enkele katrollen. In plaats van een schoepenrad ligt een 'zwemmer' op zijn buik op de kar. De zwemmer voert één borstcrawlslag uit. Op voor- en achterzijde van diens hand zijn druksensoren bevestigd. Met behulp van een onderwatercamera wordt de handsnelheid gemeten, met een bovenwatercamera de snelheid van de kar met de zwemmer. De snelheidstoename van de kar met de zwemmer tussen begin en eind van zo'n slag laat zien dat dit in homogeen water tot een substantieel grotere toename in kinetische energie leidt dan in gelaagd water (figuur 3). Eén zo'n proef laat zien dat wanneer de snelheid van de kar met de zwemmer wordt uitgezet tegen de (vanuit een vast frame) gelijktijdig gemeten handsnelheid er een belangrijk verschil optreedt tussen homogeen en gelaagd water (figuur 4). Tijdens insteek en achterwaartse beweging van de hand neemt de karsnelheid in beide gevallen toe (van rechtsonder naar links-midden in figuur 4). Bij het onder water terughalen van de hand blijkt de kar in homogeen water nog verder te versnellen, terwijl deze in gelaagd water juist vertraagt. Kennelijk wekt de nu met de kar voorwaarts bewegende hand een tegenwerkend koppel op, terwijl dat in homogeen water ontbreekt.

Conclusie

Het gevaar dat kan optreden bij zwemmen in gelaagd water lijkt misschien wat op het vroegere gevaar van lood-

vergiftiging. Verborgener door dagelijks gebruik van loden drinkbekers duurde het lang voordat die bepaalde bedreiging (h)erkend werd. De potentiële dreiging besloten in een alledaagse activiteit als openluchtzwemmen kan een blinde vlek zijn die wellicht even moeilijk te detecteren is. Het helpt als we als zwemmer beseffen dat we een vast punt nodig hebben.

Referenties

- 1 V.W. Ekman, *On dead-water Norwegian Polar Exped. 1893-1896*:5 (1904).
- 2 S.P.M. Ganzevles, F.S.W. van Nuland, L.R.M. Maas en H.M. Toussaint, *Swimming obstructed by deadwater. Naturwissenschaften* 96:449–456 (2009).
- 3 M. Van Dyke, *An album of fluid motion*. Parabolic Press, Stanford (1982).
- 4 L.R.M. Maas, *Effects of fluid stratification on swimming, rowing and paddling*. In: *Sport Physics*, 217-227, Ed. Ch. Clanet, Ecole Polytechnique (2012).