

Golfnavigatie rond de Marshalleilanden

De traditionele zeevaarders van de Marshalleilanden konden met alleen natuurlijke hulpmiddelen verbazingwekkend nauwkeurig navigeren tussen afgelegen eilanden. Naast het gebruik van sterren, maan en wind, konden zij ook oceaangolven lezen voor navigatiedoeleinden. Door de opkomst van moderne navigatietechnieken is deze kunst van het golven lezen bijna verloren gegaan. In 2015 vond een wetenschappelijke expeditie plaats om deze manier van navigeren te bestuderen. Gerbrant van Vledder

364

De zeevaarders van Oceanië konden met alleen natuurlijke hulpmiddelen hun weg vinden tussen ver uit elkaar gelegen eilanden [1, 2]. Deze vaardigheden raakten in de verdrukking door de introductie van het kompas, nauwkeurige klokken, mechanisch aangedreven schepen en gps-technieken. Met name de zeevaarders van de Marshalleilanden

gebruikten ook de kenmerken van oceaangolven voor navigatiedoeleinden. De bijna altijd aanwezige achtergronddeining hielp hen koers te houden, maar men bezat ook de gave om de nabijheid van een eiland te bespeuren aan de hand van subtiele veranderingen in het golfveld door interacties van golven met een eiland.

De Marshalleilanden bestaan uit der-

tig bewoonde atollen en ruim 1200 kleine eilanden, verspreid over een oppervlakte van bijna twee miljoen km² en een totaal landoppervlak van 181 km². Door hun lage ligging is er nauwelijks landbouw mogelijk en zijn de bewoners primair op de zee aangewezen. Hierdoor ontwikkelden zij hun navigatietechnieken tot grote hoogten. De universiteit van Hawaii

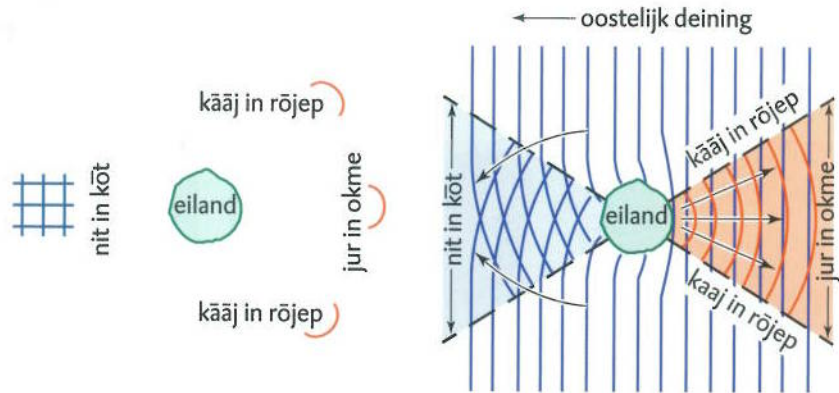


Figuur 1 De Jitdam Kapeel, een traditionele outrigger canoe. Foto: Gerbrant van Vledder.

voert onderzoek uit naar deze technieken [2]. In dat kader organiseerden zij in juni 2015 een wetenschappelijke expeditie naar de Marshalleilanden. Dit artikel is gewijd aan de achtergronden van deze expeditie.

Oceaangolven

Het begrijpen van golfnavigatie vereist inzicht in het ontstaan en de voortplanting van oceaangolven en hoe deze interageren met eilanden. Hierbij wordt gebruikgemaakt van wiskundige modellen om oceaangolven te beschrijven. Op de wereldzeeën komen diverse soorten watergolven voor. De meeste zijn door de wind opgewekt. Daarnaast zijn er getijgolven en incidentele tsunami's, maar deze zijn niet van belang voor golfnavigatie. Een windgedreven golfveld op zee (een windzee) bestaat uit dwars door elkaar lopende golfcomponenten, elk met een eigen amplitude, periode, lengte en voortplantingsrichting. Zo'n golfveld ontstaat door energieoverdracht van de atmosfeer naar het water. Bij aanhoudende wind nemen de gemiddelde golfperiode en golfhoogte toe. De groei van een golfveld vindt met name plaats in stormen, maar op de oceaan kunnen golven ook flink groeien door lang aanhoudende passaatwinden. Een typische windzee oogt chaotisch maar heeft desondanks een onderliggende orde. Het golfoppervlak η kan namelijk beschouwd worden als de superpositie van een groot aantal sinusoidale (Fourier) componenten, elk met een eigen golflengte L , periode T , amplitude a , richting θ en fase φ :



Figuur 2 Schematisch overzicht van traditioneel bekende golfverschijnselen bij een eiland: *jur in okme* (parallel gereflecteerde deining), *kaaj in rōjep*, (scheef gereflecteerde deining), *nit in kōt* (kruisende deining) [1].

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos(\theta_j) - k_i y \sin(\theta_j) + \varphi_{i,j})$$

In deze vergelijking is k het golfgetal van een golfcomponent die afhangt van de golflengte L volgens $k = 2\pi/L$, en $\omega = 2\pi/T$ is de radiale golfrequentie. De variabele φ is een willekeurige fase, uniform verdeeld op het interval $[0, 2\pi]$. Daarom wordt dit model ook wel het random-fasemodel genoemd. Een belangrijk kenmerk van windgolven is dispersie. Op basis van lineaire golftheorie geeft de dispersierelatie het verband tussen de frequentie ω en het golfgetal k volgens $\omega^2 = gk \tanh(kd)$ met d de waterdiepte en g de valversnelling. Hieruit volgt dat de loopsnelheid c van een golfcomponent afhangt van de golflengte $L = 2\pi/k$ en waterdiepte volgens:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$$

Windenergie wordt alleen overgedragen aan golfcomponenten die langzamer lopen dan de wind. Niet-lineaire wisselwerkingen zorgen voor een herverdeling van golfenergie naar zowel kortere als langere golfcomponenten. Met name de kortere golven breken waardoor er netto meer langere golven ontstaan. Geleidelijk ontstaan er langere golfcomponenten die sneller lopen dan de wind. Zij ontvangen dan geen energie meer van de wind, terwijl het omgekeerde nauwelijks het geval is. Golven die niet meer onder de invloed van wind staan, worden vervolgens deiningsgolven. Dispersie leidt ertoe dat als de wind wegvalt, het initieel chaotische golfveld langzaam uit

elkaar getrokken wordt waardoor het een regelmatiger karakter krijgt.

Golfnavigatie bij de Marshalleilanden

Waarom is golfnavigatie juist in de Marshalleilanden tot grote bloei gekomen? Dit komt enerzijds doordat de inwoners gedwongen zeevaarders waren en anderzijds was de locatie van de Marshalleilanden, net ten noorden van de evenaar, gunstig voor de vorming van een relatief constant achtergrondsignaal van deining. Deze golven worden opgewekt door stormen in het noorden en in het zuiden van de Grote Oceaan en kunnen zich vrijwel zonder energieverlies duizenden kilometers over de oceaan voortplanten. Metingen laten zien dat nabij de Marshalleilanden er altijd wel een of meerdere achtergronddeiningen staan. Dit gegeven maakt redelijk betrouwbare golfnavigatie rond de Marshalleilanden mogelijk, mede omdat zulke deiningsvelden altijd enkele dagen aanhouden. Als Marshallese schippers naar een bepaald buureiland willen varen, koppelen zij eerst de richting van hun koers aan zichtbare omgevingskenmerken. Eenmaal voldoende buitengaats, relateert men de richting van de aanwezige achtergronddeining aan de beoogde koers. Door vervolgens de onderlinge hoek constant te houden, komt men meestal bij het beoogde eiland aan. De zeevaarders van de Marshalleilanden kunnen ook de verstoringen van golven door eilanden interpreteren. Golven worden op verschillende wijzen beïnvloed door koraaleilanden.

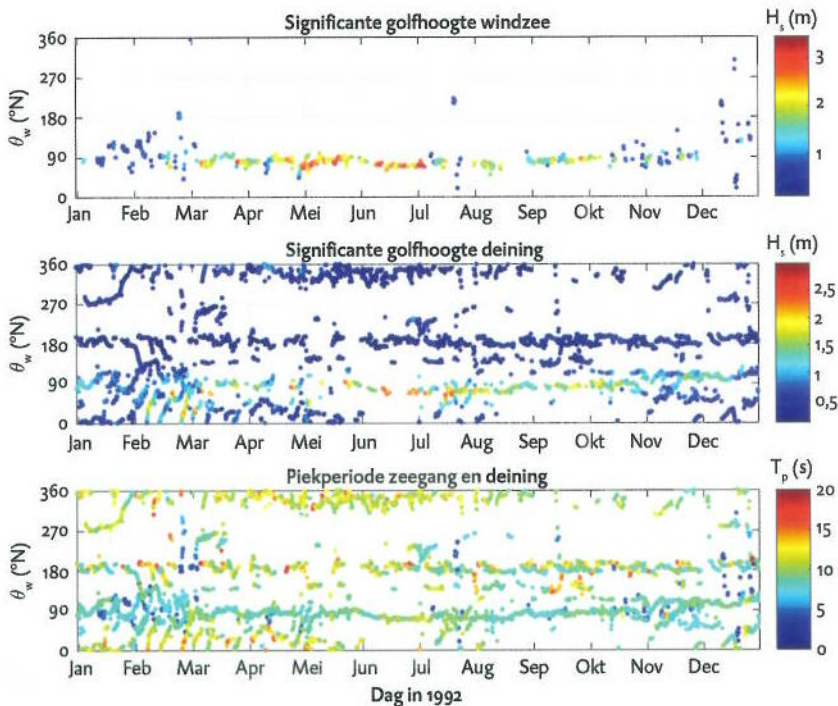
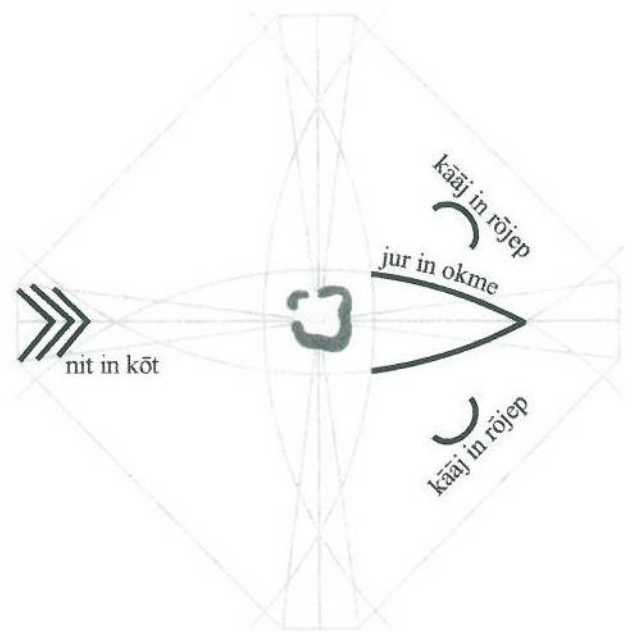
Gerbrant van Vledder (1957) studeerde civiele techniek in Delft en specialiseerde zich daar in de statistische beschrijving en modellering van zeegolven. Na zijn promotie ging hij aan de slag bij het Waterloopkundig Laboratorium en later bij de ingenieursbureaus Alkyon en BMT ARGOS. Vanaf 2007 is hij verbonden aan de TU Delft, eerst als deeltijd universitair hoofddocent en nu als gastonderzoeker. Daarnaast is hij sinds 2013 ook werkzaam als zelfstandig adviseur. Zijn werk bevindt zich op het grensvlak van onderzoek en toepassing van computermodellen voor de voorspelling van zeegolven.



G.P.vanVledder@tudelft.nl



Figuur 3 Navigator Korent met een stokjeskaart (links). Relatie met golfverschijnselen (rechts) [1].



Figuur 4 Tijdvariatie van de significante golfhoogte H_s , piekperiode T_p en gemiddelde golfrichting θ_w in het jaar 1992 bij Majuro (171° E , 8° N). Significante golfhoogte windzee (bovenste paneel) en van de deining (middelste paneel) en bijbehorende piekperiodes (onderste paneel). Langs de verticale assen staat de richting waaruit een golfveld komt.

366

Hierbij spelen reflectie, diffractie, refractie en schaduwwerking een rol. Golven breken op de rand van het koraalrif waarbij slechts een klein deel reflecteert. Sommige navigators kunnen deze golven nog waarnemen tot wel veertig kilometer uit de kust. Het lijkt alsof zij een zesde zintuig hebben [3]. Golven kunnen door refractie een beetje afbuigen in de smalle ondiepe zones rondom een eiland. Op grotere schaal buigen golven door diffractie om een eiland waar-

door er achter het eiland kruispatronen ontstaan. Figuur 2 illustreert de essentie van de belangrijkste verschijnselen door interacties van golven met een eiland. Afhankelijk van de positie van een kano ondergaat deze een bepaalde beweging. De navigator kan uit deze beweging afleiden in welk type golfveld de kano zich bevindt en vervolgens de positie ten opzichte van het eiland. In de opleiding tot navigator wordt gebruikt van stokjeskaarten, een

vlechtwerk van takjes, vezels en schelpen. Figuur 3 toont een stokjeskaart waarin schematisch de reflectie en buiging van golven tegen en rondom een eiland worden weergegeven.

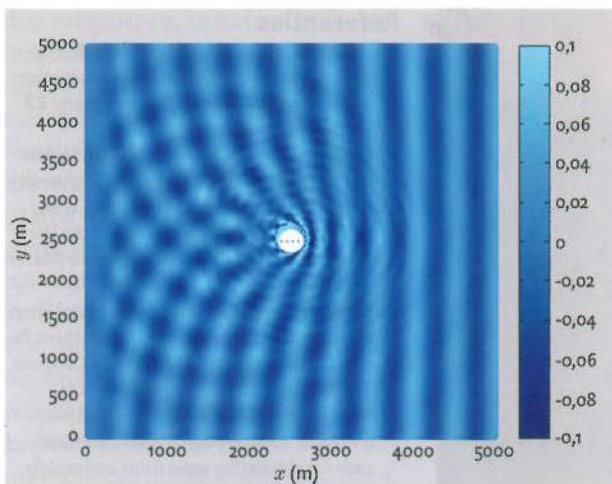
Golfmodellering

Om inzicht te krijgen in de fysica van golfnavigatie zijn simulaties uitgevoerd van golfvelden bij de Marshall-eilanden. Hierbij is gebruikgemaakt van twee soorten modellen: enerzijds fase-gemiddelde golfmodellen die een balans bijhouden van de (gemiddelde) hoeveelheid energie per golfcomponent van een in de tijd en ruimte evoluerend golfveld, en anderzijds fase-oplossende modellen waarin de beweging van elke individuele golf wordt gevolgd. De eerste soort modellen wordt gebruikt om het grootschalige beeld van oceaangolven te simuleren, terwijl de tweede soort gebruikt wordt om de details van golf-eilandinteractie te onderzoeken.

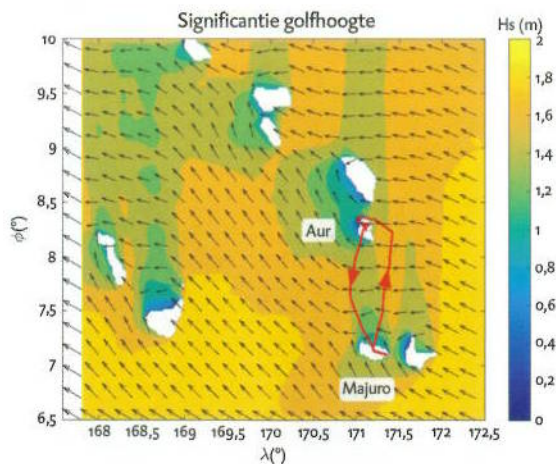
De fase-gemiddelde golfmodellen maken gebruik van het begrip energiedichtheid. In het random-fasemodel wordt het golfveld opgebouwd uit de som van sinusoidale golfcomponenten. Elke individuele golfcomponent met amplitude $a_{i,j}$ heeft daarbij op basis van lineaire golftheorie een verwachte hoeveelheid variantie

$$\eta^2 = E \left\{ \frac{1}{2} a_{i,j}^2 \right\}$$

onder de aanname van een homogeen en stationair golfveld. Voor de spectrale beschrijving van golven wordt nu aangenomen dat de variantie



Figuur 5 Momentopname van de oppervlakteuitwijking van een unidirectionele monochromatische golf met een periode van 20 s en een amplitude van 0,1 m na interactie met een zwak reflecterend cirkelvormig eiland.



Figuur 6 Ruimtelijke variatie van de gesimuleerde significante golfhoogte en gemiddelde golfrichting (zwarte pijlen) op maandag 22 juni om 12:00 UTM (02:00 Majuro tijd). De rode lijn toont de gevolgde route.

$$E\left\{\frac{1}{2}\bar{a}_{i,j}^2\right\}$$

verdeeld is over een frequentieinterval Δf_i rondom een frequentie f_i en een richtingsinterval $\Delta\theta$ rondom een richting ϑ_j . De limiet naar nul van het frequentieinterval Δf en de richtingssector ϑ_j voor alle i en j geeft dan het tweedimensionale golfspectrum:

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta\theta} E\left\{\frac{1}{2}\bar{a}^2\right\}$$

Dit spectrum staat aan de basis van spectrale golfmodellen. Elk spectrum geeft de gemiddelde hoeveelheid variantie (of golfenergie) in een bepaald gebied met afmetingen Δx en Δy weer. Het oceaanooppervlak wordt opgedeeld in cellen met afmetingen Δx en Δy . Op basis hiervan wordt een balansvergelijking opgesteld die aangeeft hoe snel de hoeveelheid golfenergie per cel varieert door transport van en naar naburige cellen, toename door windgroei en afname door brekende golven en wrijving met de bodem.

De golfcondities bij de Marshalleilanden zijn voor een periode van 22 jaar gesimuleerd met het oceaandekkende golfmodel *Wavewatch III* [4]. Vervolgens is geanalyseerd hoe elk golfveld is opgebouwd uit één of meerdere golfvelden. Figuur 4 toont het tijdsverloop van de significante golfhoogte H_s (gedefinieerd als het gemiddelde van het hoogste eenderde deel van alle golfhoogten) voor de deiningvelden

en windzeën en bijbehorende piekperiode T_p als functie van golfrichting ϑ_w en tijd voor een locatie bij het eiland Majuro in de Marshalleilanden. De kleurenbalken geven de intensiteit in meters of seconden weer. Opvallende kenmerken van de golfvelden zijn de oostelijke windzee en een noordelijke en zuidelijke deining. Deze kenmerken komen goed overeen met traditioneel bekende eigenschappen. In kwalitatieve zin is veel bekend over de basisprincipes van de interactie tussen golven en eilanden, zie figuur 2. Om deze interacties kwantitatief en in detail te bestuderen, is gebruikgemaakt van het fase-oplossende SWASH-golfmodel [5]. Dit model geeft een volledige beschrijving van de oppervlakteuitwijking als functie van ruimte en tijd. Het is gebaseerd op een discretisatie van de niet-lineaire niet-hydrostatische ondiepwatervergelijkingen. Figuur 5 toont het resultaat van een simulatie voor een situatie zoals getoond in figuur 2. Het SWASH-model werd op de rand aangestuurd met een monochromatische unidirectionele golf met een periode van 20 s en een amplitude van 0,1 m. In het rekendomein lag een cirkelvormig eiland omgeven door diep water. Duidelijk is te zien hoe de golven om het eiland heen buigen en daarbij kruispatronen en een verzwakking van golfhoogte laten zien. Ook is de uitstraling van de zwak gereflecteerde golven te zien.

Zeilen op de oceaan

In juni 2015 reisde ik samen met de wetenschappers Joe Genz, John Huth

en de journalist Kim Tingley en fotograaf Mark Peterson af naar de Marshalleilanden om ter plaatse de navigatietechnieken van de zeevaarders te bestuderen. Op Majuro werden we ontvangen door Alson Kelen, een navigator in opleiding. Hij was onze navigator tijdens de zeiltocht naar het noordelijk gelegen atoleiland Aur. De tocht werd ondernomen met een gereconstrueerde traditionele outrigger canoe, de *Jitdam Kapeel* en een kleine volgboot met de wetenschappers. Tijdens deze tocht gebruikte de bemanning van de kano alleen natuurlijke hulpmiddelen, terwijl de volgboot op GPS kon zien of alles goed ging. Tijdens de heen- en terugreis registreerden we onze positie en wind- en golfgegevens om deze bij thuiskomst nader te analyseren met het oceaandekkende spectraal golfmodel *Wavewatch III*. Dit model wordt aangedreven door tijdsafhankelijke windvectoren afkomstig van een werelddekkend atmosferisch model. Figuur 6 toont voor een representatief moment uit een lange simulatie van de ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte rondom de eilanden Majuro en Aur. De zwarte pijlen geven de gemiddelde golfrichting weer. De rode lijn toont de gevolgde route. Opvallend was dat tijdens de terugtocht de gemiddelde golfrichting steeds haaks op de koers van de kano stond. Dit feit kan een mogelijke verklaring zijn van het enigmatische traditionele begrip *dilep*, het pad door de golven dat twee eilanden met elkaar verbindt. Het einddoel van ons onderzoek is



Figuur 7 De Jitdam Kapeel op weg naar Majuro. Foto: Gerbrant van Vledder.

om op systematische wijze de effecten van de verschillende soorten eilanden op de golfvelden in kaart te brengen en daarbij een relatie te leggen met de traditionele kennis over

golfnavigatie. De resultaten zullen dan gebruikt worden bij de opleiding van toekomstige navigators om zo dit cultureel erfgoed te behouden voor de Marshallese bevolking.

Referenties

- 1 J. Genz, J. Aucan, M. Merrifield, B. Finney, K. Joel en A. Kelen, *Wave navigation in the Marshall Islands*, *Oceanography* **22** (2009) 234-245.
- 2 D. Lewis, *We, the Navigators, The Ancient Art of Landfinding in the Pacific*, University of Hawaii Press, (1972) Honolulu, USA.
- 3 K. Tingley, *Sixth Sense, Secrets of the Wave Pilots*. *New York Times Magazine*, 20 March 2016.
- 4 G.Ph. Van Vledder, *Swell-wave Island Interaction and Wave piloting in the Southern Pacific Ocean*, Proc. 36th IAHR World Congress, The Hague (2015), The Netherlands.
- 5 M. Zijlema, G.S. Stelling en P.B. Smit, *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*, *Coastal Engineering* **58** (2011) 992-1012.

Column

368

Strontiumpaard, koperhond en joodpoes

Voor dieren is een bescheiden plek weggelegd in de natuurkunde. Door de jaren heen zijn specifieke kenmerken onderzocht van soorten als vleermuizen, hamsters en fruitvliegjes, waarbij een enkele variëteit verbonden is gebleven aan één fysicus, zoals de dubieuze kat van Schrödinger, de kikkers waarmee Volta zijn zoektocht ondernam en de glimwormen die Faraday benutte om erachter te komen hoe zij licht konden produceren.

Mijn eigen ervaring met dieren in de natuurkunde is beperkt gebleven tot de vleesvlieg. In een biofysisch lab kreeg ik een practicumopdracht over het facetoog. Een assistente had een

vlieg geprepareerd in een klompje kleefpasta en ze had een minuscule probe in het insect gemanoeuvreerd waardoor er elektrofysiologische reacties in de hersencellen vielen te meten. Ik drukte op een knopje en inderdaad observeerde de vlieg de uitgezonden fotonen, het aangesloten beeldscherm lichtte op. Was ik onder de indruk? Niet echt, maar als fysicus in opleiding was ik wel verrast door de manier waarop een insect gereduceerd kon worden tot meetinstrument.

De fysica heeft geprofiteerd van het dier, maar andersom, hebben dieren profijt gehad van de fysica? Op welke manier kan de natuurkunde

nuttig zijn voor het dierenrijk? Met enige regelmaat verzorg ik colleges voor veterinaire studenten. Binnen de faculteit Diergeneeskunde zijn er

Frans Kingma is geschoold als experimenteel fysicus (RU Groningen), gepromoveerd aan de Universiteit Utrecht en sinds 1999 werkzaam in het Ornsteinlaboratorium aldaar. Hij schrijft verhalen en columns, zijn meest recente literaire publicatie is *Spiegellevens* (roman, Meulenhoff).



frans.kingma@live.nl