

Het Wilde Westen onder water

Oceanen

BIOWETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ
KWARTAAL 2 2014



Oceanen

Dit cahier is een uitgave van Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) en verschijnt vier maal per jaar. Elk nummer is geheel gewijd aan een thema uit de levenswetenschappen, speciaal met het oog op de maatschappelijke gevolgen ervan.

Stichting BWM is ondergebracht bij ZonMw.

BESTUUR

Dr. J.J.E. van Everdingen
(voorzitter)
Prof. dr. W.P.M. Hoekstra
(penningmeester)
Dr. A. van der Auweraert
Prof. dr. J.M. van den Broek
Dr. L.H.K. Defize
Prof. dr. J.T. van Dissel
Prof. dr. ir. F.P.M. Govers
Prof. dr. N.M. van Straalen

RAAD VAN ADVIES

Prof. dr. P. van Aken
Prof. dr. D. van Bakkum
Prof. dr. J.P.M. Geraedts
Prof. dr. J.A. Knottnerus
Prof. dr. J. Osse
Prof. dr. E. Schroten

REDACTIE

Prof. dr. Nico van Straalen
Prof. dr. Herman Ridderinkhof
Ir. Rob Buiters (eindredactie)

BUREAU

Drs. Rianne Blok
Monique Verheij

BEELDREDACTIE

B en U international picture
service, Diemen

VORMGEVING

Studio Bassa, Culemborg

DRUK

Drukkerij Tesink, Zutphen

INFORMATIE,

ABONNEMENTEN EN

BESTELLEN LOSSE NUMMERS

Stichting
Biowetenschappen en
Maatschappij
Postbus 93402
2509 AK Den Haag
telefoon: 0345 54 55 60
e-mail: info@
biomaatschappij.nl
www.biomaatschappij.nl

© Stichting BWM

ISBN 978 90 73 1967 42

Stichting BWM heeft zich

ingespannen om alle

rechthebbenden van de

illustraties in deze uitgave

te achterhalen. Mocht u

desondanks menen rechten

te kunnen laten gelden, dan

verzoeken wij u vriendelijk

om contact met ons op te

nemen.



Biowetenschappen
en Maatschappij

Inhoud

Voorwoord: 'Dat de zee bruiest met haar volheid' 2
Mare incognitum, een historische inleiding 4

1 De basis van de voedselketen 9

De C in de zee 14
Creatief met primaire producenten 18

2 Het weer onder water 21

Grootschalige oceaanstromingen 22
Golven in de diepzee 28
Dode bodem, bron van kennis 34

3 Biodiversiteit op zee 37

De Koraaldriehoek als centrum van mariene biodiversiteit 38
Extreme habitats 43
Mariene virussen 49
Oases in de diepzee 54

4 De bedreigde oceaan 57

Visserij 58
De plastic soep 63
Diepzee mijnbouw 67
Geslept met organismen over de wereldzeeën 72
Verstekelingen via vliegtuig en scheepshuid 74

Epiloog: Het Wilde Westen is dichterbij dan je denkt 76

Nabeschouwing 80
Nadere informatie 81
Auteursinformatie 82
Illustratieverantwoording 83

*50% korting
op de
normale
verkoopprijs*

Bezoek onze website voor
andere publicaties over
bijvoorbeeld geneesmiddelen,
biodiversiteit en gezond
ouder worden. En met een
abonnement op de cahiers
van Biowetenschappen en
Maatschappij bespaar je bijna
50%!

Meer informatie op pagina. 84

Voorwoord: 'Dat de zee bruiest met haar volheid'

HOE KAN het dat de inwendige onrust van de zee ons zo'n rust geeft?

Voor de meesten van ons berust het begrip van de zee op ervaringen op het strand, of hooguit in de havens, op de boot of gedurende het zeilen in kustwateren. Bijna overal – behalve op eilanden ver in de oceanen – werd mij gevraagd, als ik weer eens een oceaan overstak, 'of ik langs de kust ging?' Men denkt blijkbaar dat dat relatief veilig is, met het land nooit meer dan een paar uur weg. Maar als ik dan aan de grote stormen denk die ik uiteraard heb meegemaakt, dan was ik altijd blij dat deze ver van de kust af waren, daar waar ruimte is.

Niets is te vergelijken met wat er psychisch met je gebeurt als een zeeman echt in het grote, hoge, wilde blauw daarginds tuurt. Huilende geluiden rond de masten, groen, koud water dat over het dek davert, en water dat soms zo hard tegen de romp slaat dat het voor een ogenblik lijkt of de tijd ophoudt te bestaan. En dat dagen achter elkaar. Binnen een mum van tijd kan een hevige storm het scheepje versplinteren en kan het gebeurd zijn. Dan verdrink je in de duisternis beneden je. Dan bidt elke zeeman het bekende Bretonse gebed: 'Gedenk mij, Uw zee is zo groot en mijn schip is zo klein.'

Al bij Homerus speelde de zee een belangrijke rol, met name in zijn verhaal van die grote zwerver die, nadat hij de ondergang van Troje had bewerkstelligd, rondzwierf en veel doormaakte op de zee. Behalve 'de zee' (*pontos, thalassa*), waarmee de Middellandse Zee werd aangeduid, kende Homerus

ook nog de *Okeanos*, die alles omvat en die de bron zou zijn van alles wat bestaat.

Het land werd tot dienste van de mens in cultuur gebracht. Een dienstknecht der mensen is de zee nooit geworden. En toch, of misschien juist daardoor, heeft zij zeer bevorderend gewerkt op de ontwikkeling van culturen. Juist de vrije zee gaf aan de volkeren en culturen geheel eigen wegen van ontwikkeling en expansie.

We moeten niet onderschatten hoeveel invloed die zee kan hebben, ook op mensen die haar alleen van het strand af kennen. Hoeveel mensen hebben niet steeds de kust als een bevrijding, een verademing, juichend begroet als ze van achter de duinen kwamen en haar dan plotseling voor zich zagen, uitstrekkend van de brandingzoom tot aan de verre horizon. Dát beeld wordt steeds meegenomen als ze later weer teruggaan, het land in.

Het land is mooi, de zee is anders.

En dan die enkele eenling, die de zee zoekt. In een atlas reisde hij reeds rond de wereld toen hij een jochie was. De koopvaardij verschaftte hem de middelen om de wereld te leren kennen. Het leerde hem ook een vak: zeeman. Wist hij tevoren hoe het zou zijn, alleen op die onmetelijke zee te zijn? Nee, natuurlijk niet. Maar toen omstandigheden hem ertoe dwongen alleen een oceaan over te steken, toen pas begreep hij de rust van de zee. Toen pas begreep hij de woorden van de Chileense dichter Pablo Neruda:



*...and now, nothing more,
I want to be alone with my essential sea...
I don't want to speak for a long time,
Silence! I want to learn,
I want to know if I exist.*

Hij voelde zich één met het grootse om hem heen. Hij was zich bewust van het gevaar, want zijn schip is klein en de zee is zo groot. Hij keek soms, op die windstille dagen met een zee als een spiegel, in de verre diepte en zag lichtschitteringen in de oneindigheid waartussen vissen zwommen. Onder de tropenzon of onder de stormluchten van hoge

breedten. Onder de Grote Beer of onder het Zuiderkruis. Op de lange passaatdeining in de equatoriale stiltezone, tussen de steile stormgolven van de Noord-Atlantische Oceaan of in de 'roaring forties', tussen 40 en 50° Zuiderbreedte.

Hoe kan het dat de inwendige onrust van de zee ons zo'n rust geeft? Het is een van de weinige vragen waar dit boek misschien geen antwoord op geeft. Dat wil zeggen: niet direct. Dit boek is een boek van de zee. Van de kennis over zeeën en oceanen, over klimaat, ecologie en biodiversiteit, de natuur in al haar grootsheid. Het verhaalt ook van golven, zowel onder als aan het oppervlak. Deininggolven zijn ware wereldreizigers. Het is die beweging in de zee die ons zo fascineert.

Amsterdam, 21 maart 2014
Henk de Velde

Mare incognitum, een historische inleiding

■ DR. ANNELIES PIERROT-BULTS

DE OCEANEN en zeeën mogen dan meer dan twee derde van de globe beslaan, ze bestrijken bij lange na niet hetzelfde aandeel in onze kennis van het aardoppervlak. Tot op de dag van vandaag is de oceaan nog voor een belangrijk deel wat cartografen vroeger aanduiden als *Terra incognita*: onbekend gebied. Dat geldt vandaag de dag misschien niet meer zozeer voor de topografie van de oceaanbodem, maar nog wel degelijk voor het water daarboven. Daar stroomt nog steeds een *Mare incognitum*. Maar wat hebben oceanografen en marien biologen de afgelopen eeuwen dan uitgevoerd? Een bloemlezing als historische inleiding tot de huidige kennis.

Aristoteles als eerste marien bioloog

Oceaanonderzoek kan ruwweg worden verdeeld in vier periodes: de Oudheid tot en met de Middeleeuwen, de periode van de grote ontdekkingsreizen, de wetenschappelijke expedities in negentiende en twintigste eeuw en de periode na de Tweede Wereldoorlog.

Van de Oudheid tot de Middeleeuwen was de oceaan écht onbekend gebied. De plaatsbepaling op zee was een groot probleem en men waagde zich liever niet te ver van de kust, want men was bang niet terug te kunnen keren. Toch was er al wel visserij en er werd ook uitgebreid handel gedreven. De benodigde kennis was de praktische kennis van zeelieden over stromingen en havens, die mondeling werd doorgegeven. De grote drijfveer achter het ontdekken van nieuwe gebieden was de zeer lucratieve handel in specerijen en andere oosterse producten van oost naar west.

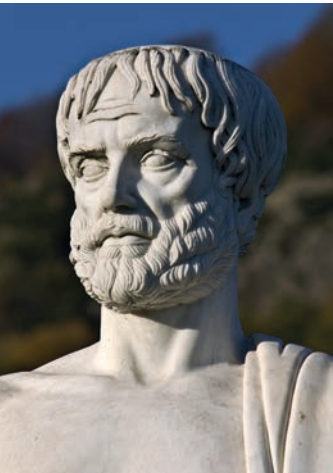
Voor zover we weten was Aristoteles (384-322 v. Chr.) de eerste marien bioloog *avant la lettre*. Hij schreef onder andere over de fauna van de Aegeïsche Zee. Hij publiceerde – net als tijdgenoten – ideeën over de fysische oceanografie, zoals over getijden en de neerslag- en verdampingscyclus als verklaring voor het zoutgehalte van het water.

In de Middeleeuwen kwamen daar weinig nieuwe inzichten bij. Wel waren sinds ongeveer de achtste eeuw de winden bekend die met de seizoenen wisselden en die op de Indische Oceaan werd gebruikt door handelsschepen bij de oversteek van China, Indonesië en India naar het Midden-Oosten en weer terug: de moessons.

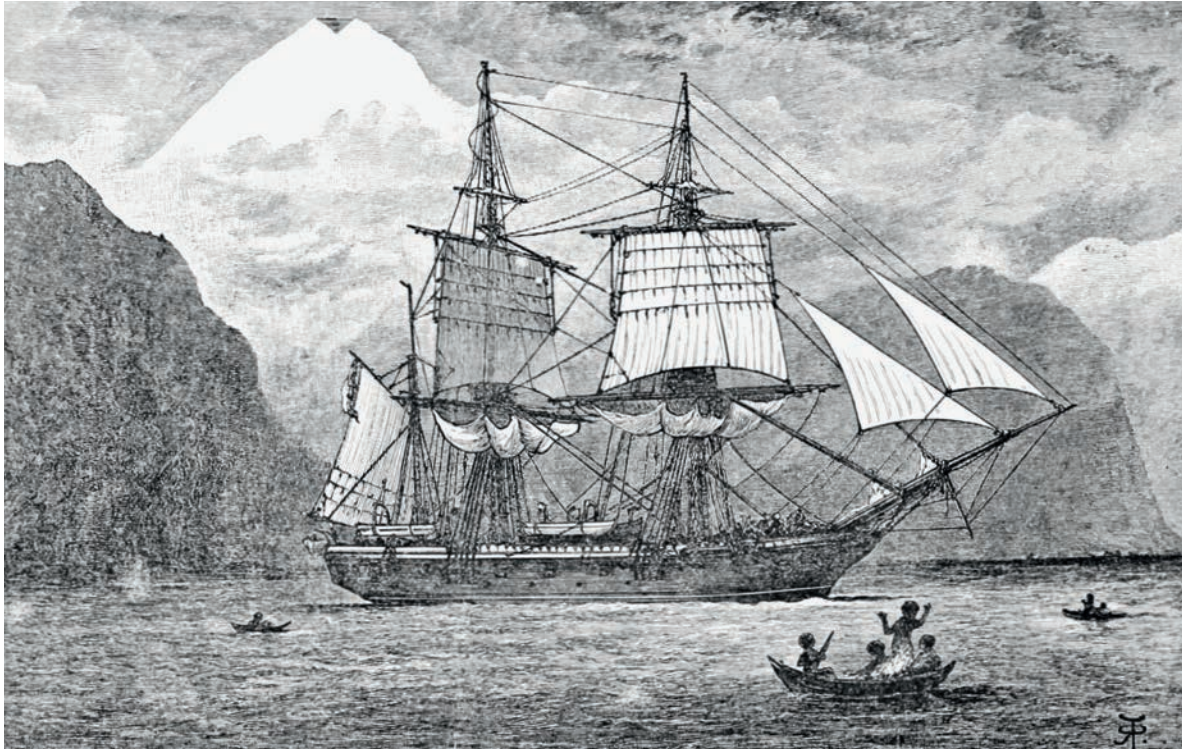
Ontdekkingsreizen

Na het uiteenvallen van het Mongoolse Rijk en de val van Constantinopel in 1453 waren de belangrijke handelsroutes over land grotendeels geblokkeerd en vond de handel nog meer plaats via scheepvaart. Er was dan ook een grote noodzaak om de kusten in kaart te brengen en gegevens over diepte en stroming paraat te hebben aan boord van de schepen. Ook was het letterlijk van levensbelang om een goede plaatsbepaling te kunnen uitvoeren. In het begin van de vijftiende eeuw werden de breedtegraden bepaald aan de stand van de hemellichamen met behulp van een kompas en een windroos. Pas halverwege de achttiende eeuw kon dankzij de uitvinding van de chronometer ook met voldoende nauwkeurigheid de oost-west positie worden bepaald.

Vanaf het eind van de vijftiende eeuw werden er veel ontdekkingsreizen ondernomen, van



Aristoteles, marien bioloog
avant la lettre.



HMS Beagle in de Straat van Magellaan.

Columbus (1451-1506) tot James Cook (1728-1799). Deze reizen hadden als doel nieuwe routes, kusten en handelsplaatsen te vinden tussen Europa en 'de Oost'. Nadat in 1595 de eerste Nederlandse handelsvloot naar Oost-Indië was gestuurd werd in 1602 de VOC opgericht. De VOC had ook zijn eigen kaartenafdeling. Vader en zoon Blaeu waren de bekendste cartografen in dienst van de VOC. De circulatie in de oceaan werd bekend en de Nederlander Bernard Varen publiceerde in 1650 het boek *Geografia Generalis*,

met daarin de basis van de moderne (mariene) geografie.

Zeeleven

Kennis over het leven in de oceaan was meestal afhankelijk van de belangstelling van een officier of de scheepsarts. Vanaf het begin van de zeventiende eeuw deden zeevarenden ook meer systematische metingen aan getijden, stromingen en diepte. Die waren immers van groot belang om veilig de havens te kunnen bereiken. Er werden

dieptemetingen gedaan vanaf de kust richting de oceaan. Zo ontdekte men het continentale plat en de vrij steile continentale helling. Daarachter werd het zo diep dat er geen bodem kon worden bereikt. Men veronderstelde dan ook dat er alleen leven mogelijk was in de oppervlakkige lagen en dat de donkere diepte koud en leeg was.

In de negentiende eeuw werden diverse expedities georganiseerd met een, al dan niet gedeeltelijk, wetenschappelijk doel. De bekendste is natuurlijk die met de Beagle (1831-1836), met aan boord ene Charles Darwin als naturalist. Een andere belangrijke stap in de ontdekkingen van het leven in de diepzee was feitelijk een toevallige. In 1866 werden namelijk de eerste telegraafkabels in de Atlantische Oceaan gelegd, tussen Europa en Noord-Amerika. Als bij storingen die kabels naar boven werden gehaald voor reparatie bleek er van alles op te groeien; er zat wel degelijk leven in de diepzee!

Na een aantal voorbereidende expedities werd in 1872 de Engelse Challengerexpeditie georganiseerd om de diepzee te onderzoeken. Vele expedities volgden, zoals één van de grootste Nederlandse expedities ooit, de Siboga-expeditie (1899-1900) in de Indonesische wateren onder leiding van Max Weber. De Siboga-expeditie had tot doel om diepte- en temperatuurmetingen te doen en zoveel mogelijk organismen te verzamelen. De grootste gemeten diepte was ongeveer vijfduizend meter. De expeditieleider van de Challengerexpeditie had Weber aangeraden om niet alleen naar de diepzee te kijken. Daardoor heeft de Siboga-expeditie een belangrijke bijdrage geleverd aan de kennis van de soorten in zee. Het Indo-Maleisische gebied kent immers de grootste biodiversiteit op aarde. Veel van de gevonden dieren werden daar voor het eerst gevonden en beschreven. Daarmee is de Sibogacollectie een van de belangrijkste referentiecollecties voor mariene taxonomie geworden. De resultaten van de Siboga-expeditie zijn tussen 1902 en 1970 neergelegd in 147 monografieën. Anna Weber-van



De International Indian Ocean Expedition was in 1959 de eerste grote internationale oceanexpeditie.

Bosse, echtgenote van expeditieleider Max, schreef in 1903 het boek *Een jaar aan boord H.M. Siboga*, 'om den lezer een getrouw beeld te geven van ons dagelijks leven aan boord'. Bij de 100-jarige herdenking van de expeditie in 2000 verscheen daarvan een herdruk.

In 1929 werd de Snelliusexpeditie naar het toenmalige Nederlands-Indië gehouden. Hoewel deze expeditie primair hydrologisch en geologisch was, zijn er ook vele biologische monsters genomen, gepubliceerd als *Biological Results of the Snellius Expedition*.

In dezelfde tijd als de grote wetenschappelijke expedities werden overal in Europa en Noord-Amerika aan de kusten zoölogische stations opgericht die nu vaak nog steeds bestaan. Het oudste is het Anton Dorn station in Napels uit 1872. In eigen land had de Nederlandse Dierkundige Vereniging sinds 1876 een verplaatsbare houten keet als station in Den Helder. Dat werd later het Nederlands

Instituut voor Onderzoek der Zee, dat in 1969 van Den Helder naar Texel verhuisde.

In 1902 kwam ook het inzicht dat zeeonderzoek internationale coördinatie behoeft. De *International Council for the Exploration of the Sea* (ICES) werd opgericht in Kopenhagen, door onder andere Nederland. Het is de oudste internationale organisatie voor visserij- en marien onderzoek.

Na de Tweede Wereldoorlog

Direct na de Tweede Wereldoorlog was er nog weinig geld, maar vanaf eind jaren vijftig kwam het zeeonderzoek in een stroomversnelling. De niet-gouvernementele organisatie *Scientific Committee on Oceanic Research*, SCOR (1957) werd opgericht, net als de VN-organisatie *Intergovernmental Oceanographic Organization*, IOC (1961). Het leidde mede tot de eerste grote internationale expeditie: de *International Indian Ocean Expedition*, IIOE (1959-1965).

Door nieuwe instrumenten werd het gaandeweg mogelijk om veel nauwkeuriger diepte, temperatuur en zoutgehaltes te bepalen, zodat watermassa's ook beter konden worden herkend en gevolgd. Ook werden netten ontwikkeld die op de gewenste diepte konden worden opengemaakt en weer gesloten. Hierdoor konden de verticale verspreidingspatronen van planktonsoorten worden vastgesteld. Door goede metingen van de hoeveelheid water die door het net stroomde, kon men bovendien de juiste aantallen bepalen van de aanwezige soorten, waardoor een beter begrip van de ecologische processen werd bereikt. De rol van de oceanen bij klimaatsveranderingen, zoals opslag van CO₂ en warmteopslag in lagen dieper dan drieduizend meter, werd een belangrijk onderzoeksterrein.

Hoger, dieper ...

Het immense oppervlak van de oceanen maakt het verzamelen van gegevens niet makkelijk. Sinds 1979 kunnen we ook met satellieten naar de oce-

aan kijken. Over een groot oppervlak kun je de temperatuur van het zeewater meten of de kleur van het zeewater bepalen. Die kleur wordt gebruikt als een maat voor het aanwezige fytoplankton en zodoende kan de productiviteit snel en over grote gebieden worden gemeten.

Door de ontwikkeling van duikbootjes met goede camera's zijn we ook meer te weten gekomen over het leven in de diepzee, al bestond het team dat in 1977 onderzoek deed naar heetwaterbronnen op grote diepte alleen uit geologen, geochemici en geofysici. Niemand had bedacht dat er ook een bioloog nodig zou zijn. Men dacht dat er in diep water en op de zeebodem nauwelijks leven zou zijn. Toch waren de meest spectaculaire vondsten van deze diepzee-expeditie de concentraties van enorme aantallen krabbetjes, grote tweekleppige schelpen en manshoge kokerwormen die profiteren van de bacteriën die daar bij de bronnen leven. Het zijn net oases in een woestijn.

... en meer!

In de afgelopen tientallen jaren zijn diverse internationale onderzoekprogramma's opgetuigd, zoals het fysische *World Ocean Circulation Experiment*, WEOC (1990 tot 2002) en het ecologische programma *Global Ocean Ecosystem Dynamics*, GOED (1998-2010). Ondanks al dat onderzoek en de bijbehorende vooruitgang weten we ook nu nog niet zo veel van de diepzee. Het meest recente internationale programma *Census of Marine Life*, CML (2000-2010) heeft nog vele nieuwe soorten ontdekt. Voorlopig zijn we blijkbaar nog niet uitgestudeerd.



De basis van alle voedselketens in zee wordt gevormd door eencellige bacteriën en algen. Omdat 70% van het aardoppervlak wordt bedekt door oceanen, vertegenwoordigen deze bacteriën en algen meteen ook de grootste biomassa op aarde. Maar wat bepaalt de groei van algen? En wat doen extra CO₂ en opwarming met de primaire productie op zee?

De basis van de voedselketen

■ PROFESSOR JEF HUISMAN

EÉN VAN de meest talrijke organismen op aarde ziet er uit als een langgerekt bolletje van 0,8 tot hooguit 1,5 micrometer groot. Het is groen en luistert naar de naam *Prochlorococcus*. In een milliliter oceaanwater zitten er duizend tot maximaal een miljoen. Dat wil zeggen: in de bovenste honderd meter van de zeeën en oceanen waar het zonlicht doordringt. Het is een zogenoemde cyanobacterie, net als *Synechococcus*, een ander 'massaal organisme'. Beide zijn bacteriën die – net als algen en planten – fotosynthese gebruiken om zonlicht vast te leggen.

Micro-organismen als *Synechococcus* en *Prochlorococcus* vertegenwoordigen niet alleen een enorme biomassa, ze vormen samen met veel andere micro-organismen ook de basis van wat vaak wordt verbeeld als een voedselpiramide. Zij vormen de belangrijkste en vaak de enige voedingsbron van vele grotere dieren in zee. Die microbiële basis vertegenwoordigt naar schatting 97% van de totale biomassa in de oceanen.

Primaire productie

De groei van organismen die zonlicht gebruiken om energie vast te leggen in de vorm van organische verbindingen wordt primaire productie genoemd. De primaire productie is de basis van

alle leven in zee. In de oceanen is de primaire productie afhankelijk van een aantal basisvoorwaarden: voedingsstoffen zoals stikstof, fosfaat, ijzer en koolstof, voldoende licht voor de fotosynthese en voldoende warmte om de chemische processen op een acceptabele snelheid te laten verlopen.

Ver op zee is de beschikbaarheid van voedingsstoffen vaak een beperkende factor. De essentiële voedingsstof ijzer bijvoorbeeld, is slecht oplosbaar en slaat daarom snel neer. Op de open oceaan betekent dat meteen dat het kilometers ver de diepte in verdwijnt. De gemiddelde diepte van de oceanen is vier kilometer, met extremen tot elf kilometer in de diepste troggen. Dat is uiteraard ver voorbij de bovenste laag waar algen kunnen groeien. Alleen in de bovenste honderd meter van helder water dringt voldoende licht door voor de fotosynthese. Als in die lagen geen ijzer aanwezig is belemmert dat de primaire productie.

Ook fosfaat is niet onbeperkt voorradig op de oceaan. Net als ijzer wordt het aangevoerd vanaf land. Het kan daardoor op de open oceaan te beperkt aanwezig zijn voor een goede groei van algen. Stikstof lijkt op het eerste gezicht nog de minste van de problemen voor primaire producenten. Sommige soorten cyanobacteriën kunnen stikstof als het grootste bestanddeel van gewone

lucht binden om het in te bouwen in aminozuren. Toch komen die stikstofbindende cyanobacteriën nauwelijks voor op gematigde breedtegraden. Daar kan de beschikbaarheid van stikstof dus wel degelijk een beperkende factor zijn voor de groei van algen.

Om stikstof uit de lucht te binden maken cyanobacteriën gebruik van een enzym waar ijzer in zit. Vandaar ook dat stikstofbindende cyanobacteriën floreren op plaatsen waar veel ijzer in het water zit.

Rond de Sargassozee, in het subtropische deel van de Noord-Atlantische Oceaan, leven bijvoorbeeld veel stikstofbinders. Het ijzer komt in dat geval vooral met zandstormen uit de Sahara mee. Op die plaats is fosfaat over het algemeen de beperkende factor voor de primaire productie.

In de Zuidelijke Oceaan speelt een apart probleem. Daar is in principe nog wel voldoende

fosfaat en stikstof beschikbaar, maar weinig ijzer. Vanuit de gletsjers op Antarctica komt nauwelijks ijzer het water in, zoals dat bijvoorbeeld wel vanuit de Sahara de oceaan opwaait. Vandaar dat in de Zuidelijke Oceaan is geëxperimenteerd met het toevoegen van ijzer aan het water. Dat bleek vrijwel direct te resulteren in extra groei van algen.

Op de oceaan komen gebieden voor met nauwelijks primaire algengroei

Woestijnen op zee

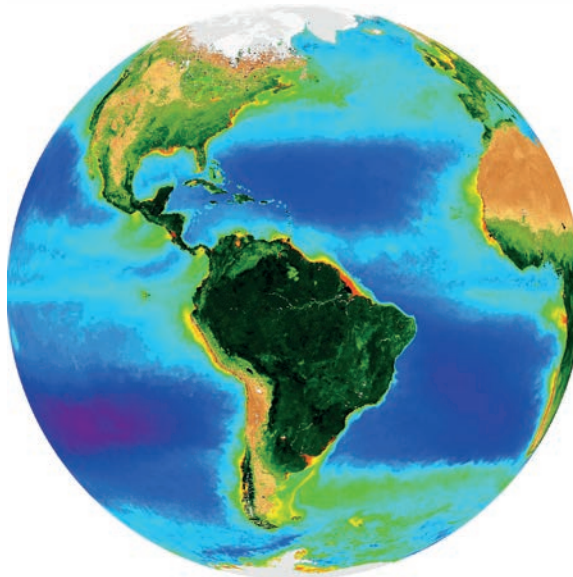
Voor primaire productie op het land is neerslag vaak de beperkende factor. Als gevolg daarvan zijn er grote gebieden die te droog zijn voor voldoende plantengroei: de woestijnen. Ook op de oceanen komen dergelijke 'woestijnen' voor: gebieden met geen of nauwelijks primaire productie. Zelfs vanuit de ruimte zijn die gebieden goed te herkennen door de chlorofylconcentratie te meten. Chlorofyl is het molecuul dat door planten, algen en cyanobacteriën wordt gebruikt om zonlicht te 'vangen'. Veel primaire productie betekent dus per definitie: veel chlorofyl.

De illustratie hiernaast laat zien hoe de hoeveelheid chlorofyl over de aarde is verdeeld: immense dichtheden in de tropische regenwouden en ook in veel streken rond de kusten en in de noordelijke oceanen, en enorme chlorofylloze gebieden in de Sahara, maar ook in de subtropische delen van de oceanen. Dit zijn de subtropische gyres, die een bijzonder lage primaire productie hebben. Het absolute dieptepunt in primaire productie op de oceanen bevindt zich grofweg rond Paaseiland, ten westen van Zuid-Amerika in de Stille Oceaan. Door diverse oorzaken komen hier nauwelijks voedingsstoffen voor in de bovenste waterlaag.

Schaarste in gelaagd water

Groei van algen kan alleen plaatsvinden bij voldoende licht, dus in de bovenste honderd meter van de oceaan. In dat relatief flinterdunne schillete van de oceaan is het voedsel vrij snel uitgeput wanneer er veel algen groeien. Er moet dus steeds

De verdeling van chlorofyl over de wereld. Het paarse gebied in de Stille Oceaan is nagenoeg vrij van bladgroen.



verse voeding worden aangevoerd in de vorm van stikstof, fosfaat en ijzer. Koolstof wordt vrij automatisch aangevoerd vanuit de bovenliggende luchtlaag.

De plek van de grote 'mariene woestijnen' (de blauwe vlakken in de figuur op p. 10) kun je eenvoudig begrijpen uit de temperatuurverdeling op de oceanen. In de warme subtropische oceanen is er vrijwel continu een warme laag water die lichter is en dus bovenop de koudere onderlaag drijft. Door die zogenoemde permanente stratificatie (gelaagdheid) van het water vindt er nauwelijks menging plaats met het voedselrijkere diepe oceanwater. De voedingsstoffen in de warme, lichte bovenlaag zijn dan ook binnen de kortste keren uitgeput waardoor de primaire productie stopt.

In gematigder en koude streken koelt de bovenste laag van de oceanen in de winter af. Daardoor verdwijnt de stratificatie, treedt er weer menging op met het onderliggende water, en komen er weer nieuwe voedingsstoffen beschikbaar voor een volgende ronde van algenbloei. Dit leidt tot de voorjaarsbloei, wat formeel geen bloei is zoals van planten maar een explosieve groei van algen. De bekendste is de Noord-Atlantische voorjaarsbloei. Deze strekt zich uit over de hele Noord-Atlantische Oceaan, en is zo massaal dat naar schatting 20% van alle CO₂ die jaarlijks door de mens de atmosfeer in wordt gestuurd door deze algenbloei wordt opgevangen. De ingevangen CO₂ wordt ten dele direct door koud water uit het noorden afgevoerd naar de diepzee en ook indirect door algen die als dood materiaal naar de bodem van de oceaan zinken.

Extra voedsel door opwelling

Behalve de mariene woestijnen in de subtropische oceanen zijn er ook specifieke gebieden waar juist opvallend veel primaire productie plaatsvindt. Bijvoorbeeld langs de Afrikaanse westkust is veel primaire productie, net als voor de westkust van



Zuid-Amerika en langs een langgerekte band over de evenaar. Die extra productie is daar te danken aan zogenoemde opwelling van water uit de diepe oceaan, inclusief alle opgeloste voedingsstoffen.

Opwelling – meestal aangeduid met de Engelse term *upwelling* – ontstaat onder heel specifieke omstandigheden. Rond de evenaar bijvoorbeeld waaien de passaatwinden vanuit het noordoosten en vanuit het zuidoosten naar de evenaar toe. De passaatwinden buigen daar af richting het westen door het Coriolis-effect (zie ook p. 22). De wind neemt aan het wateroppervlak een beetje water mee. Maar zoals de Noorse ontdekkingsreiziger Fridtjof Nansen aan het eind van de negentiende eeuw al voor het eerst opmerkte: dat transport van water gaat uiteindelijk haaks op de windrichting: het zogenoemde Ekman-transport. Nansen zag bijvoorbeeld dat ijsbergen zich haaks op de heersende windrichting verplaatsen. Aan de evenaar heeft dat het effect dat het water zich onder de invloed van de passaatwinden weg beweegt van de evenaar, noordwaarts op het noordelijk halfrond en zuidwaarts op het zuidelijk halfrond. Het 'watertekort'

Voor de kust van Peru zorgt opwelling van voedselrijk water voor een ongekeende rijkdom aan vis, en daarmee aan visetende vogels.

dat hierdoor op de evenaar ontstaat wordt aangevuld vanuit de diepzee, waardoor er voedselrijk water omhoog komt. Dit is de evenaars-opwelling, die verantwoordelijk is voor de hoge primaire productie op de evenaar.

Op een vergelijkbare manier veroorzaakt de wind die bijvoorbeeld langs de Zuid-Amerikaanse westkust naar het noorden waait door Ekman-transport een waterstroom van de kust af. Dit wordt aangevuld met koud voedselrijk water vanuit de diepzee. Door deze kust-opwelling zijn bijzonder productieve ecosystemen ontstaan langs de westkust van Zuid-Amerika en Afrika.

Lange en korte voedselketens

In de open oceaan vindt de primaire productie vooral plaats in de vorm van de minuscule cyanobacteriën *Synechococcus* en *Prochlorococcus*. Onder de voedselarme omstandigheden op de oceaan is het voor een micro-organisme slim om juist zo klein mogelijk te zijn. Dan heb je als bolletje relatief meer oppervlak ten opzichte van celvolume, en kun je relatief veel oppervlakte-enzymen plaatsen die voor de opname van de schaarse voedingsstoffen kunnen zorgen. Die piepkleine cyanobacteriën worden op hun beurt gegeten door kleine zoöplanktonsoorten. Die worden weer gegeten door grotere zoöplanktonsoorten, die worden gegeten door roeipootkreeftjes, die worden gegeten door vissen.

In de figuur op p. 13 is verbeeld dat de voedselketens in rijke opwellingsgebieden aanmerkelijk korter zijn. De primaire productie vindt daar plaats in de vorm van veel grotere diatomeeën (kiezelwieren) en dinoflagellaten. Die hoeven niet per se heel klein te zijn, omdat in de opwellingsgebieden voedsel in overvloed is. De veel grotere primaire producenten kunnen meteen worden gegeten door roeipootkreeftjes. Iedere stap in de voedselketen heeft een verlies van ruwweg zo'n 90% van de opgeslagen energie tot gevolg. Een voedsel-

El Niño

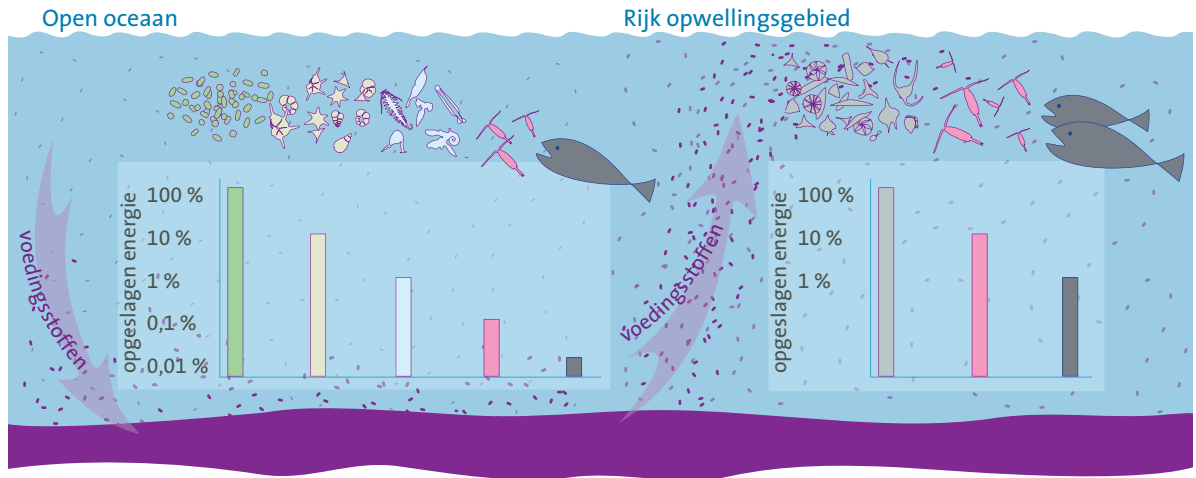
In sommige jaren vallen de passaatwinden in de Stille Oceaan tijdelijk weg. Hierdoor is er minder transport van warm oppervlaktewater van Zuid-Amerika richting Australië en Indonesië, maar hoopt het warme water zich op aan de westkust van Zuid- en Midden-Amerika. Dit fenomeen, dat vaak begint in december of januari, wordt *El Niño*, het kerstkind genoemd. Daardoor komt er gedurende meerdere maanden geen koud, voedselrijk water meer uit de diepere oceaan omhoog. *El Niño* heeft gevolgen op heel veel terreinen. Er is toenemende droogte in Australië en Indonesië, er is juist meer regen in Zuid-Amerika en er is veel minder primaire productie aan de westkust van Zuid-Amerika.

Een lage primaire productie leidt ook tot veel minder visproductie. Lange tijd behoorden de kustwateren van Peru tot de allerrijkste visgronden van onze planeet. Hier vond maar liefst 15 tot 20% van de wereldwijde visvangst plaats. Maar in het *El Niño*jaar 1972 ging het mis. Terwijl de primaire productie dat jaar sterk terugliep door het wegvallen van opwelling, investeerden Peruaanse vissers in meer en grotere schepen om hun visvangst op peil te houden. Het gevolg was dat de ansjovispopulatie door een combinatie van voedselgebrek en overbevissing in dat jaar volledig werd weggevaagd. Het heeft daarna meer dan 20 jaar geduurd voordat de ansjovispopulatie van Peru zich weer herstelde.

Peruaanse vissers hebben de ansjovispopulatie in het *El Niño* jaar 1972 bijna volledig weggevist.



Bij een voedselketen in vijf stappen komt maar 0,01% van de oorspronkelijke energie in vissen terecht. Bij een korte voedselketen in opwellingsgebieden is dat honderd keer zoveel.



keten die dus niet uit vier stappen bestaat maar uit twee houdt per saldo honderd keer zoveel energie vast. Door de combinatie van een hoge primaire productie en korte voedselketens zijn de opwellingsgebieden bijzonder rijke visgronden. Van de wereldwijde visproductie komt bijna de helft uit de opwellingszones.

De trek van walvissen

De primaire productie in de oceaan verklaart niet alleen waar de basis van de voedselketen het stevigst is. Het biedt ook een verklaring voor een spectaculair fenomeen als de jaarlijkse trek van baleinwalvissen. Baleinwalvissen zoals de vinvis en de bultrug leven voornamelijk van krill, een garniaalachtige die op zijn beurt weer van algen leeft. Zoals een koolmees de timing van haar eileg richt op het massale voorkomen van rupsen in het bos, zo legt de krill haar eitjes vlak voor de voorjaarsbloei van de algen in de Noord-Atlantische Oceaan. Zodra de eitjes uitkomen, is er massaal alg/eten beschikbaar.

Een baleinwalvis kan niet veel met net uitgekomen krill-larven: die zijn nog te klein om met baleinen uit het water te zeven. Maar zodra de krill voldoende groot gegroeid is, ongeveer vier maanden na het uitkomen van de eitjes, blijven

ze tussen de baleinen hangen wanneer een walvis een grote hap water uit zijn muil weer naar buiten perst.

Lange tijd werd gedacht dat baleinwalvissen op hun voorjaarsstrek naar het noorden niets eten, maar waarnemers rond de Azoren hebben nu onomstotelijk vastgesteld dat de walvissen wel degelijk eten onderweg. Sterker nog: de noordwaartse migratie van baleinwalvissen blijkt de voorjaarsbloei van algen in de Noord-Atlantische Oceaan met een vertraging van precies vier maanden te volgen: ze wachten keurig tot de krill groot genoeg is. In het najaar, tijdens de trek naar het zuiden stomen de walvissen wél in een keer door. Er is dan nauwelijks primaire productie en daardoor geen krill beschikbaar rond het 'Tankstation Azoren'.

Opwarming van de oceaan

Met het warmer worden van de atmosfeer warmt feitelijk met name de oceaan heel langzaam op (zie later in dit hoofdstuk). Dat zou kunnen betekenen dat de noordgrens van de subtropische gyres met een permanente stratificatie, dus de gebieden met een permanente warme en dus voedselarme waterlaag op het koude voedselrijke water, langzaam



Baleinwalvissen zoals deze bultrug nemen onderweg grote happen water waar zij de krill uit filteren.



verder naar het noorden opschuift. Bijvoorbeeld de Azoren, die nu net boven de noordgrens van de ‘mariene woestijn’ in de subtropische Atlantische Oceaan liggen, zouden daarmee wel eens langzaam in het voedselarme gebied kunnen komen. In dat geval zal de voorjaarsbloei bij de Azoren sterk afnemen en zal een walvisexcursie op die plek vrij zinloos worden; om maar een van de vele gevolgen van de opwarming van de aarde te noemen.

De C in de zee

■ PROFESSOR HEIN DE BAAR

Sinds 1780 – het begin van de Industriële Revolutie – heeft de mens door verbranding van fossiele brandstoffen 350 petagram (een gram met 15 nullen) koolstof in de lucht gebracht in de vorm van kooldioxide. Daarvan is ongeveer 60% in de lucht gebleven. Die stijging van de CO₂-concentratie veroorzaakt opwarming van de aarde.

Ongeveer 93% van de extra warmte is opgenomen in de bovenste 700 meter van de oceanen. Die bovenlaag is dan ook meetbaar warmer geworden. Een verdere 3% van de extra warmte is verbruikt als smeltwarmte van sneeuw en ijs, zowel op land als op zee. Ook de bodem op land heeft extra warmte opgenomen: nog eens 3%. Slechts 1% van de extra warmte is de oorzaak van de opwarming van de lucht. Gemiddeld over de hele aardbol is sinds het jaar 1900 de lucht met 0,8 °C opgewarmd.

De opwarming van de lucht is relatief het grootste in de richting van de polen. Het Noord-

poolgebied is het snelst opwarmende gebied van het noordelijk halfrond. Sinds 1950 is de temperatuur daar met 2 tot 3 °C gestegen. De wintertemperatuur is zelfs met 4 °C gestegen sinds 1950. Dat

De oceaan vangt 40% van de CO₂-uitstoot van de mens op

betekent dat het oppervlak van het Arctisch zeeijs sterk is afgenomen. Op het zuidelijk halfrond is de snelste stijging van temperatuur gemeten in het gebied aan de westzijde van het Antarctische schiereiland. Daar smelten sneeuw en ijs geleidelijk weg en worden de gletsjers kleiner.

Niet alleen de extra warmte verdwijnt in het water, ook 40% van de extra CO₂ uit fossiele brandstoffen is in de oceanen opgenomen. En

dat is een meevaller! Als dit ook in de lucht was gebleven waren atmosfeer en oceaan nog sneller opgewarmd. Tegelijk is het ook een tegenvaller, want de extra CO_2 die is opgelost in zeewater veroorzaakt verschuivingen van de chemie van het zeewater. Dit heeft ook gevolgen voor de biologie van alle levende organismen in de oceanen. Dit is 'het andere CO_2 -probleem'. Om dit probleem te begrijpen is wel enige basiskennis vereist.

Waarom is de zee zout ?

Er zit veel zout in zeewater: 35 gram per liter. Dit opgeloste zout bestaat uit positief geladen ionen zoals natrium (Na^+) en calcium (Ca^{2+}) en negatief geladen ionen zoals chloride (Cl^-), bicarbonaat (HCO_3^-) en carbonaat (CO_3^{2-}). De opgeloste zouten in zeewater zijn in oorsprong afkomstig van het land. Door de chemische verwerking van gesteentes lossen de zouten op in de regen en spoelen de ionen via de rivieren in de zee. Het zeewater verdampt op enig moment en wordt weer regen, om opnieuw een beetje zout mee te nemen naar de oceaan. Het zout blijft steeds achter in de zee. De oceanen bevatten nu ongeveer 40.000 Pg koolstof in de vorm van opgelost anorganisch koolstof (*Dissolved Inorganic Carbon*, DIC). Dit komt voor in drie chemische vormen: HCO_3^- (90%), CO_3^{2-} (5 tot 10%) en opgelost CO_2 (0,5 tot 1%). De totale hoeveelheid opgelost DIC is ongeveer 2,4 millimol per liter zeewater.

Evenwichten

De drie vormen van opgeloste koolstof verkeren in een chemisch evenwicht van HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 en H^+ . Via H^+ is dit evenwicht dan ook bepalend voor de zuurgraad van de oceaan. In het jaar 1780 had het natuurlijke oppervlaktewater van de oceanen een zuurgraad van ongeveer 8,3: de zee was dus basisch.

Tijdens de fotosynthese wordt opgelost koolstof opgenomen in algenzellen, en met behulp van

Warme puitaal redt het niet

De temperatuurstijging van de oceaan hoeft niet groot te zijn om drastische gevolgen te hebben. Temperatuur heeft namelijk ook gevolgen voor het zuurstofgehalte, wat dieren de das om kan doen. Dit is duidelijk geworden door onderzoek aan de puitaal, een vissoort van de noordelijke Atlantische Oceaan, de Noordzee en de Oostzee. Vissen zijn voor hun ademhaling afhankelijk van zuurstof in het water die wordt opgenomen via de kieuwen. Omdat in water maar weinig zuurstof is opgelost, moeten de kieuwen hard werken om het lichaam van vol-

doende zuurstof te voorzien. Voor veel vissen is het zuurstofgehalte van het water een belangrijke beperkende factor. In warm water lost minder zuurstof op dan in koud water. Daarom zal een temperatuurstijging van pH 7,7 het zeewater hard aankomen bij vissoorten die aan de rand van hun opnamecapaciteit functioneren. Zo'n soort is de puitaal. Uit fysiologisch onderzoek van het Alfred Wegenerinstituut voor Polair en Marien Onderzoek in Bremerhaven blijkt dat bij stijging van de temperatuur soorten lokaal kunnen uitsterven of moeten vertrekken naar kouder water.



zonlicht omgezet in biomassa en zuurstof. Daardoor neemt de pH toe. Wanneer die algen vervolgens door bacteriën en dieren als energiebron – de zogenoemde respiratie – worden verbruikt daalt de pH juist weer. In de diepzee is veel respiratie van dode algen en andere biomassa die naar beneden is gevallen. Als gevolg daarvan is de hoeveelheid opgelost koolstof in de diepzee zeer hoog en de CO_3^{2-} juist zeer laag.

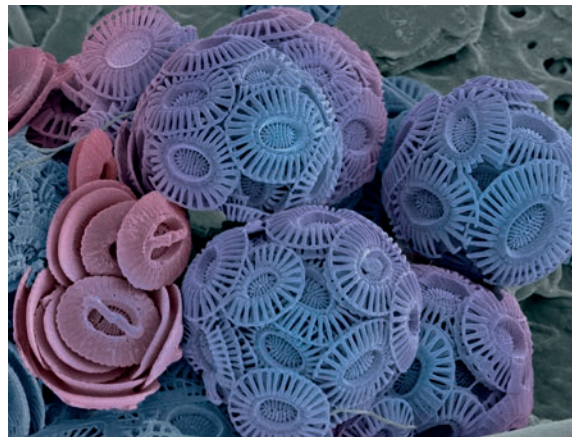
Oceaanverkalking

Een blik in de wasmachine of in de waterleiding leert dat kalk in water spontaan kan neerslaan. In zeewater gebeurt dat echter niet; daar wordt alle kalkvorming door levende organismen geregeld. Dat wordt biocalcificatie genoemd. Verschillende organismen in de zeeën en oceanen leggen kalk vast. Dat zijn bijvoorbeeld schelpdieren die een schelp om hun lijf bouwen, koraaldiertjes die een rif bouwen maar ook algen zoals *Emiliania huxleyi*, die een kalkskelet hebben. Die biocalcificatie kan langs twee verschillende routes lopen. Calcium-ionen kunnen met bicarbonaat kalk, CO_2 en water vormen, of direct met carbonaat reageren tot kalk (CaCO_3). De bovenlaag van de oceanen is flink oververzadigd met carbonaat, dus is het makkelijk voor organismen om daar kalk te vormen. In

Kijken in de glazen bol van een vulkaan

In het vulkanisch actieve gebied rond Milne Bay in Papoea Nieuw-Guinea stromen grote hoeveelheden vulkanisch CO_2 uit de zeebodem. Die bronnen bieden een uitgelezen kans om te voorspellen wat er zal gebeuren wanneer de hoeveelheid CO_2 uit de atmosfeer naar de oceaan zal toenemen. Ver van Milne Bay is een hoge biodiversiteit te vinden, met onder andere grote koraalriffen. Dichter bij de bron neemt de diversiteit af terwijl groene algen, die profiteren van extra voeding in de vorm van CO_2 ,

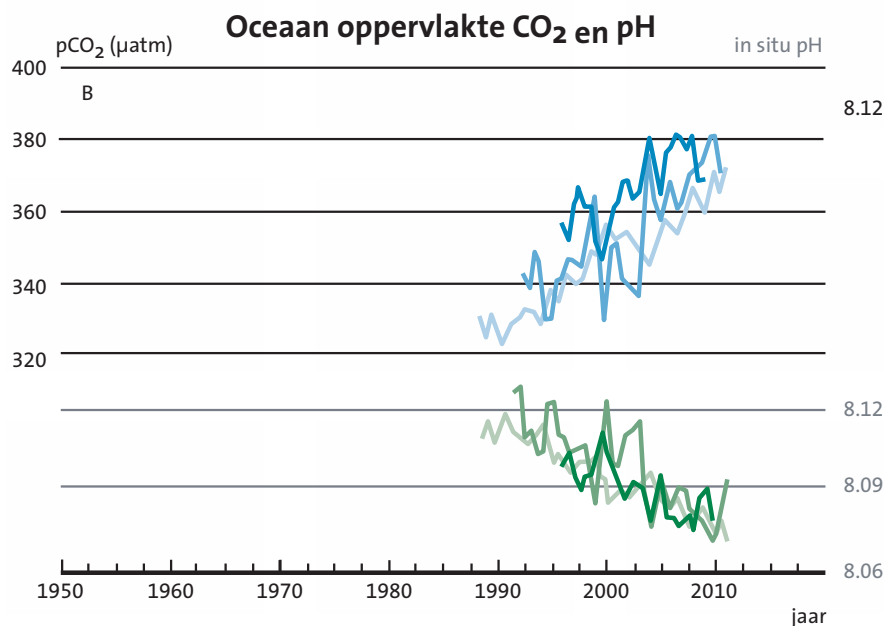
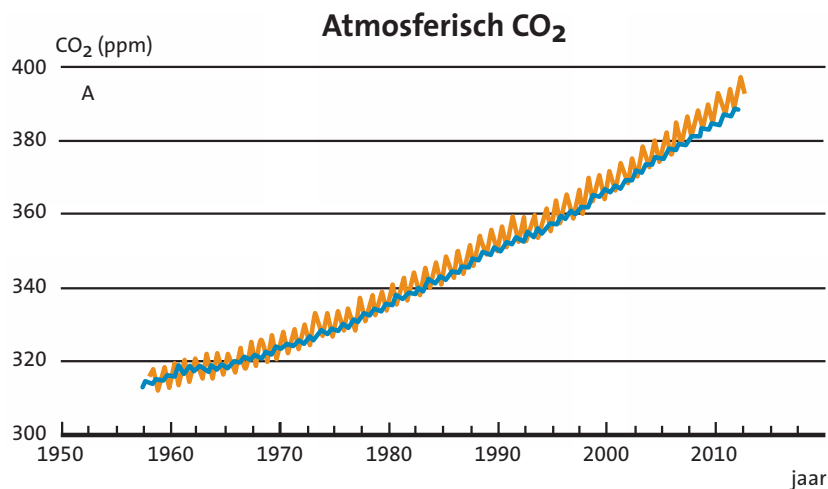
juist toenemen. Door het afnemen van koraalriffen als leefomgeving, nemen ook de inwonende diersoorten zoals vissen en ongewervelde dieren af. Dicht bij de CO_2 -bron daalt de zuurgraad tot 7,7 of minder en is ontwikkeling van koraalriffen niet meer mogelijk. Die pH van 7,7 is de waarde die ook wordt voorspeld rond het jaar 2100, bij een scenario met hoge uitstoot van CO_2 . Met andere woorden: tegen het eind van de eenentwintigste eeuw zouden koraalriffen wel eens verdwenen kunnen zijn.



Ook een alg als *Emiliania huxleyi* is gevoelig voor stijgende CO_2 -gehalten.

de diepzee is de concentratie van carbonaat door respiratie juist zeer laag. Op de diepte waaronder het zeewater onderverzadigd is met carbonaat lossen kalkschelpen en andere vormen van biologische kalk op: het tegenovergestelde van biocalcificatie.

Biocalcificatie gebeurt dus altijd door een levend organisme. Het gaat ook altijd samen met fotosynthese of respiratie. De calcificerende alg *Emiliania huxleyi* doet tegelijkertijd aan fotosynthese en calcificatie. Bovendien zijn er belangrijke gevallen van symbiose. Korallen bijvoorbeeld, zijn calcificeerders die in symbiose leven met speciale algen: de zoöxanthellen. De korallen zelf doen aan biocalcificatie, terwijl de zoöxanthellen aan fotosynthese doen.



De stijgende CO₂-concentraties (blauw) en de daarbij behorende verzuring (dalende pH, groen) op drie meetpunten.

Invasie van CO₂ in zee

In het jaar 2012 was de uitstoot van koolstof uit al onze schoorstenen en uitlaten (volgens de cijfers van het *global carbon project*) ongeveer 9,7 Pg koolstof per jaar. Dat was dus nota bene meer dan honderd keer de hoeveelheid koolstof die in de lijven

van zeven miljard mensen op aarde is opgeslagen (0,07 Pg). Van deze uitstoot dringt ongeveer 40%, ofwel iets minder dan 4 Pg per jaar, binnen in de oceanen. Het merendeel van de extra CO₂ reageert vervolgens met water en vormt bicarbonaat en een proton. Volgens de regels van de chemie neemt de verzadiging van het zeewater met kalk bij afname van carbonaat af. Het wordt dan ook moeilijker voor bijvoorbeeld schelpdieren om kalk vast te leggen in hun schelp. Bovendien wordt het water zuurder. Was de pH vóór de Industriële Revolutie 8,2 bij benadering, vandaag de dag is die al gedaald tot 8,08. Rond het jaar 2100 zal de pH naar verwachting verder zijn gedaald tot 8,05 of zelfs tot 7,75 wanneer je uitgaat van een scenario met veel CO₂-emissie.

Een stijging van de in zeewater opgeloste koolstof, zowel in de vorm van CO₂ als bicarbonaat, zal betekenen dat de fotosynthese door algen in de zee zal toenemen. Voor het vastleggen van kalk door bijvoorbeeld algen, schelpdieren of koraaldiertjes bestaan twee tegengestelde verwachtingen. Enerzijds zou door de stijging van bicarbonaat de biocalcificatie wellicht sneller en beter kunnen gaan, dus meer kalkvorming. Anderzijds zou door de afname van carbonaat de biocalcificatie wellicht langzamer en slechter verlopen, dus minder kalkvorming.

Creatief met primaire producenten

■ ROB BUITER

VERGELEKEN MET de enorme primaire productie op land (de donkergroene gebieden in het kaartje op p. 10) zijn de oceanen relatief voedselarme gebieden.

Nergens wordt de potentie van fotosynthese in de oceaan ten volle benut. Stop een beetje extra voeding in het systeem en er wordt meteen meer voedsel geproduceerd. Dat gegeven kan de meer praktisch ingestelde wetenschappers op verschillende manieren inspireren.

Een opgevoerde koolstofpomp

In de Zuidelijke Oceaan is er een specifiek gebrek aan één bepaalde voedingsstof: ijzer. Bemesting van de Zuidelijke Oceaan met ijzer zorgt dan ook direct voor extra groei van algen, zo blijkt uit experimenten. Daarbij wordt CO_2 vastgelegd in biomassa door fotosynthese. Het merendeel van deze extra algen wordt al snel weer gegeten door bacteriën en zoöplankton. Daarbij komt de CO_2 al snel weer vrij. Maar wanneer de algen sterven door

In de oceaan rond de Zuidpool deden Hein de Baar en collega's onderzoek naar ijzergehalten en algengroei.



gebrek aan licht of tenslotte toch weer ijzergebrek, dan zakken ze voor een deel naar de diepzee, onder medeneming van koolstof die ze tijdens hun groei hebben opgeslagen in hun cellen. Op die manier zorgen groeiende, stervende en zinkende algen voor een transport van CO₂ uit de atmosfeer naar de bodem van de oceaan. Grootschalige ijzerbemesting van de Zuidelijke Oceaan zou daarmee een manier kunnen zijn om de extra uitstoot van CO₂ door de verbranding van fossiele brandstoffen te compenseren.

In experimenten is gebleken dat de benodigde hoeveelheid toe te voegen ijzer wel tientallen tot misschien zelfs honderden malen groter is dan sommige optimistische geesten eerst dachten. In dat geval kost de gelijkmatige verspreiding van zoveel extra ijzer door schepen veel meer aan CO₂-emissie door die schepen dan de extra CO₂ die in de diepzee verdwijnt. Dat heeft dus geen zin.

Ook zijn veel marien biologen huiverig voor grootschalige bemesting van de oceaan. Wat de precieze effecten van die extra *boost* van de primaire productie rond de Zuidelijke Oceaan zouden kunnen zijn valt onmogelijk te voorspellen. Wellicht komen ook schadelijke algen tot bloei? Wellicht groeien er, analoog aan de overbemesting op land, uiteindelijk meer distels dan waardevolle bloemen? En wat gebeurt er met de zuurstofhuishouding of de methaanproductie in zeewater? Ijzerbemesting zou daarmee wel eens een 'doos van Pandora' kunnen blijken voor de mariene ecologie.

Stimulans voor de visserij

Bemesting van de zee zou ook de visserij kunnen bevorderen. Waar de primaire productie door een tekort aan voedingsstoffen wordt beperkt, zou de hele voedselketen een duw kunnen krijgen door meer fosfaat of stikstof. Meer mest in het water geeft meer alg, die weer meer vis kan voeden. Maar net als de doos van Pandora die door ijzerbemesting van de Zuidelijke Oceaan kan worden geopend, lijkt ook het stimuleren van de visserij via bemesting van de oceaan geen goed idee.

Toch heeft de geschiedenis al eens laten zien dat er naast een hele hoop nadelen ook wel positieve effecten kunnen zitten aan extra voedingsstoffen. In de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw kwam er heel veel fosfaat via landbouw en wasmiddelen in het milieu terecht. Via de grote rivieren en de Noordzee kwam dat voedselrijke water ook in de Waddenzee. De visserijsector heeft lange tijd ontkend dat de teruggang in de visstand door overbevissing zou komen. Niet zij, maar het terugdringen van de fosfaatvervuiling zou schuldig zijn aan de teruglopende visstand.

Inmiddels zijn vriend en vijand het er wel over eens dat extra fosfaat in het water echt voor extra vis en schelpdieren in de Noordzee en Waddenzee hebben gezorgd. Maar ook voor overdadige algenbloei en alle problemen die daarmee gepaard gaan. Geo-engineering, zoals dit soort experimenten ook wel wordt genoemd, is al met al een riskante onderneming die de bron van de problemen niet aanpakt.



Zoals het weer zich laat beschrijven in termen van hoge- en lagedrukgebieden, wind, neerslag en temperatuurverschillen, zo kun je ook de dynamiek van de oceanen niet begrijpen als je de stroming, de temperatuurverdeling en zeker ook alle golven niet kent.

Het weer onder water

In 1893 probeerde de Noorse bioloog en ontdekkingsreiziger Fridtjof Nansen met zijn schip de Fram als eerste de Noordpool te bereiken. Hij bereikte de pool wel – bij benadering – maar niet per schip. De Fram liep vast in het ijs en Nansen moest zijn tocht te voet vervolgen. In de weken daarvoor had zijn schip al met veel mysterieuzer tegenslagen te maken gekregen. In de Noorse fjorden leek de Fram vast te lopen, terwijl de peilstok aangaf dat er nog meer dan voldoende water onder de kiel stond. Dit verschijnsel werd door zeelieden ‘doodwater’ genoemd. Eerdere schepen die met dit fenomeen te maken hadden gekregen, hadden hun schip soms zelfs voor reparatie naar het dok gestuurd, om daar te ontdekken dat het schip helemaal niet aan de grond was gelopen. Nog geen krasje te bekennen!

Bij thuiskomst beschreef Nansen zijn ‘doodwaterervaring’ aan de Noorse meteoroloog Vilhelm Bjerknes. Die kwam met een goede verklaring: door zoet smeltwater dat vanaf het land de fjorden inloopt ontstaan er twee lagen in het water: een lichte, zoete laag die blijft drijven op de zoute laag daaronder. Zoals er golven kunnen ontstaan aan het oppervlak, zo kunnen er ook golven ontstaan op het zoute water daaronder. Als die heftig genoeg zijn, kan er zelfs een soort ‘branding onder water’

ontstaan die sterk genoeg kan zijn om schepen tegen te houden, terwijl er aan het oppervlak niets te zien is. Dat ‘doodwater’ is dus verre van dood!

Waar Nansen zich aan het eind van de negentiende eeuw liet verrassen door het onbekende karakter van de golven diep in het fjord, zo moeten we ook aan het begin van de eenentwintigste eeuw nog constateren dat we lang niet alle karakteristieken van stroming en golven in de diepzee kennen, laat staan begrijpen.

Grootschalige oceanstromingen

■ DR. HENDRIK VAN AKEN

Op de oceanen bestaat een grootschalige circulatie van stromen die water, warmte, zout, voedingsstoffen, vervuiling en zelfs hele ecosystemen transporteren. Er bestaan in grote lijnen twee typen stroming. In de bovenste anderhalve kilometer van de oceaan drijft de wind de stroming aan. Een andere stroming die door dichtheidsverschillen wordt aangedreven, de zogenoemde thermohaliene stroming, brengt ook de diepere lagen van de oceaan in beweging.

Door de draaiing van de aarde worden bewegingen ten noorden van de evenaar naar rechts afgebogen, ten zuiden naar links.

Het krachtenevenwicht van de oceanstromen

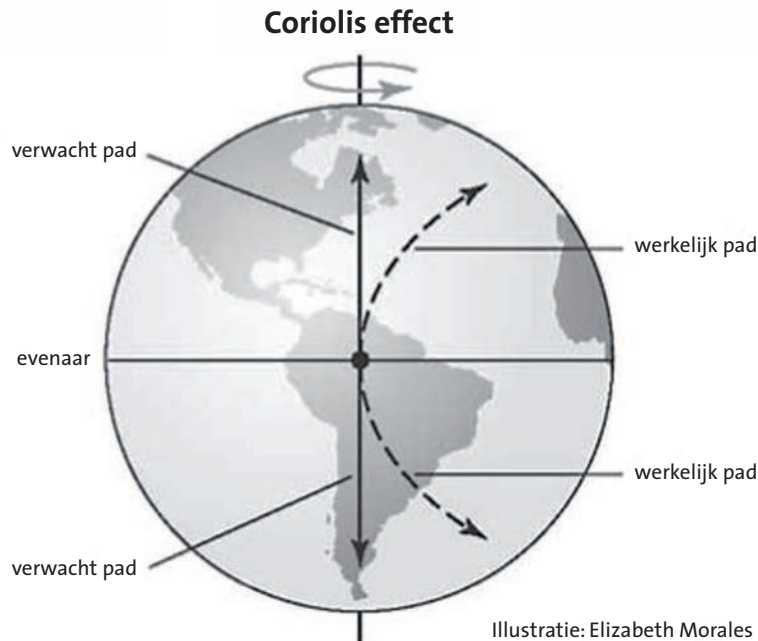
Om de oceanstromingen te begrijpen moet je eerst de krachten kennen die ze veroorzaken. Het gaat dan in grote lijnen om drie krachten: de Corioliskracht, de kracht die de wind uitoefent op het

wateroppervlak, en de drukverschillen die kunnen ontstaan door opstuwing van water.

De Corioliskracht is een externe horizontale 'schijnkracht', vernoemd naar een leraar aan de militaire academie in Parijs. Het is de kracht die door de draaiing van de aarde wordt uitgeoefend op alle bewegende objecten, dus ook op bewegende lucht- of waterdeeltjes. Door de bolvorm van de aarde is de Corioliskracht op het noordelijk halfrond naar rechts gericht ten opzichte van de watersnelheid, op het zuidelijk halfrond naar links. Er is een eenvoudige lineaire relatie tussen de watersnelheid en de sinus van de geografische breedte: hoe dicht bij de evenaar, hoe kleiner de Corioliskracht. Bij de evenaar loopt het aardoppervlak parallel aan de aardas. De sinus is daar nul. Daar is de Corioliskracht dan ook afwezig.

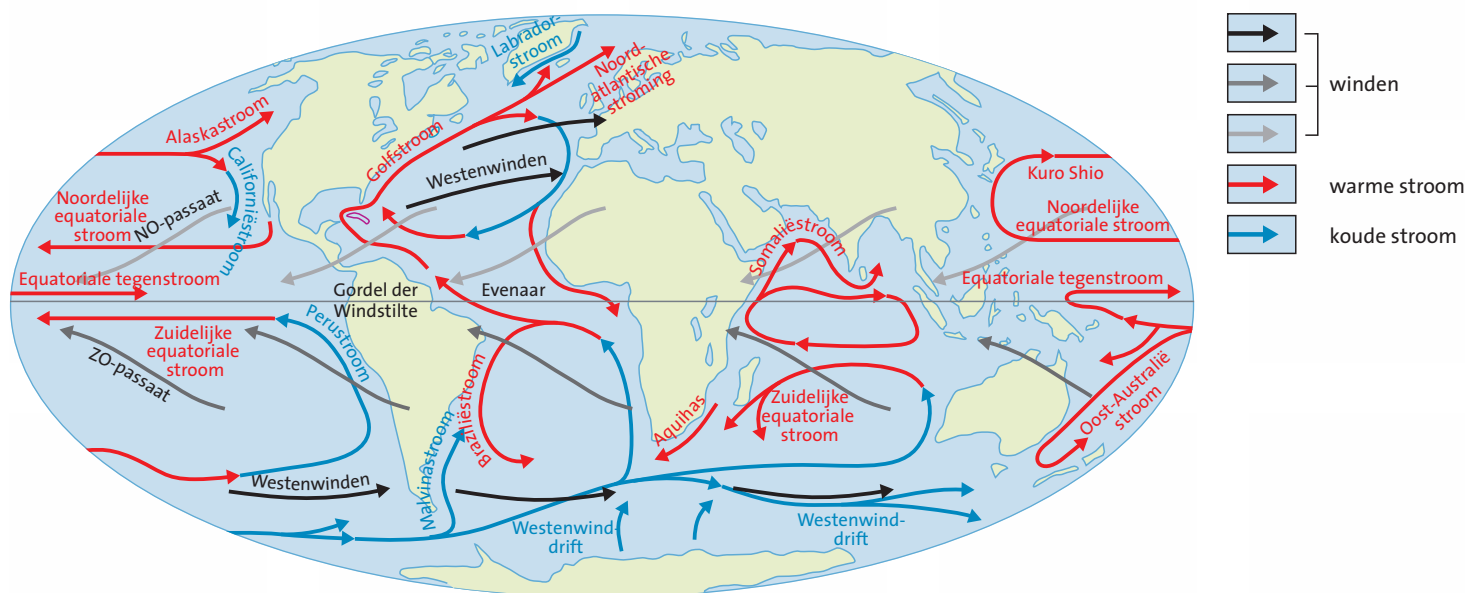
De bekendste externe kracht is de 'meeslepende kracht' die de wind uitoefent op het zeeoppervlak. Andere externe krachten zijn in het algemeen drukkrachten die ontstaan doordat de druk in een horizontaal vlak varieert. Deze drukkrachten kunnen twee verschillende oorzaken hebben. De eenvoudigste vorm van drukkrachten hangt samen met hoogteverschillen van het zeeoppervlak. Dergelijke verschillen van de hoogte van het zeeniveau ontstaan door de oceaancirculatie en staan dus los van de getijdebewegingen die je gedurende de dag kunt zien. De hoogteverschillen aan het oceaanooppervlak hebben wereldwijd een typische waarde van maximaal ongeveer één meter. Tegenwoordig kunnen die hoogteverschillen op een paar centimeter nauwkeurig worden gemeten met radarmetingen vanaf speciale satellieten. Op basis van die metingen en de resulterende krachten kan ook de resulterende stroomsnelheid aan het zeeoppervlak worden berekend.

Een andere oorzaak van drukkrachten op grotere diepte zijn de verschillen in de dichtheid van het zeewater. Die hangen samen met verschillen in temperatuur en zoutgehalte. Waar die dicht-



Illustratie: Elizabeth Morales

Schets van de overheersende winden en de dominante oceaanstromen



heid groot is, door kouder of zouter water, neemt de druk per meter diepte meer toe dan waar die dichtheid klein is. Daardoor vind je onder koud water vaak een hogere druk dan onder warm water.

De windgedreven oceaancirculatie

Er bestaat een samenhang tussen de overheersende windvelden boven de oceanen en de oceaancirculatie. De noordoost- en zuidoostpassaat komen voor in het tropische gebied ten noorden en zuiden van de evenaar. Op de gematigde breedten van beide halfronden komen we de gordels van westenwinden tegen, en op hoge noordelijke breedten vinden we overheersende oostenwinden. Volgens het Corioliseffect op het noordelijk halfrond, zal de meeslepende kracht van de wind op het water in de tropen samenhangen met een noordwestelijke watersnelheid in de bovenste honderd meter, en dus een noordwestelijk

watertransport. De horizontale beweging van het water in deze direct door de wind aangedreven stroming wordt Ekmantransport genoemd. De bijbehorende snelheden zijn maar beperkt: een paar centimeter per seconde.

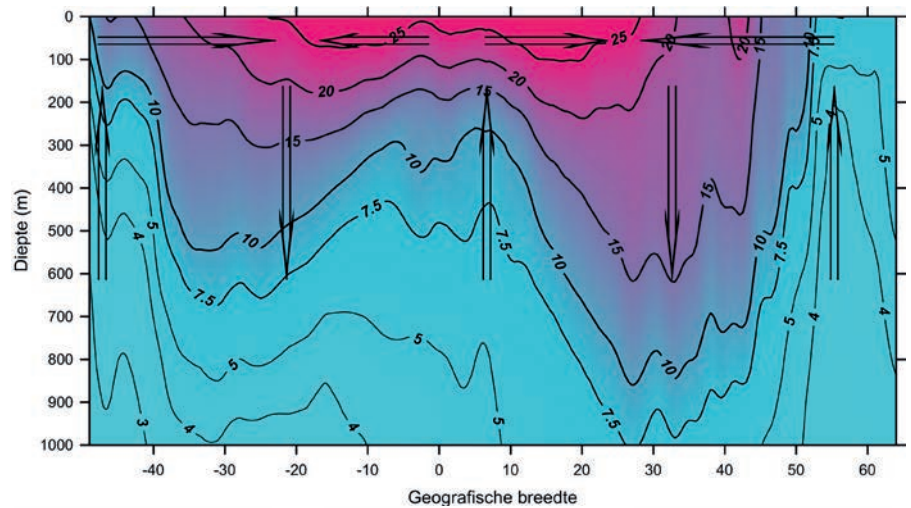
Onder de gordel van westenwinden op het noordelijk halfrond kunnen je een zuidwaarts watertransport verwachten. Dat betekent dat het warme water in de oppervlaktelaag zich zal ophopen in de subtropen. Dit wordt convergentie genoemd. Daar zal het zeeniveau wat hoger worden dan normaal. Je krijgt daar dus een hogere druk ten opzichte van de tropen en de gematigde breedten. Bij die drukverdeling hoort, volgens het evenwicht van de Corioliskracht en de drukkracht in de Noord-Atlantische Oceaan, een westwaartse stroming tussen de evenaar en de subtropen (de Noord-Equatoriale Stroom) en een oostwaartse stroming tussen de subtropen en de gematigde breedten (de Noord-Atlantische Stroom).

De oost-west snelheden als gevolg van deze drukverschillen zijn hier wat groter, tot enkele tientallen centimeters per seconde. Langs de Amerikaanse oostkust worden deze stromingen kortgesloten door de Golfstroom, en verder naar het oosten zal er een zuidwaartse stroming ontstaan om de cirkel rond te maken. Het water stroomt dus met de klok mee in een subtropische wervel. Een zelfde wervel of 'gyre' vinden we ook in de noordelijke Stille Oceaan.

Volgens vergelijkbare mechanismen kun je bedenken dat in de zuidelijke oceanen ook een min of meer gesloten circulatie ontstaat rond de subtropen waarbij het krachterevenwicht op het zuidelijk halfrond tegengesteld is. Dus daar vinden we zowel in de Atlantische, Indische en Stille Oceaan een circulatie rond de subtropen die tegen de wijzers van de klok ingaat.

De direct door de wind aangedreven stroming in de bovenste honderd meter zorgt ervoor dat materiaal dat zich in de subtropische wervels bevindt, zoals plastic deeltjes, daar geconcentreerd blijft en zich niet verspreidt over de hele oceaan. De warme, snelle poolwaartse stromingen in het westen van die wervels en de koudere langzamere stromingen in het oosten zorgen samen voor warmtetransport van de evenaar naar de pool.

De door de wind aangedreven subtropische convergentie in de bovenste honderd meter heeft nog een gevolg. Het warme oppervlaktewater wordt in de subtropische wervels ook omlaag gedreven. Daardoor ontstaat op grotere diepten een warme poel zoals in de figuur op deze pagina op 30°NB en 30°ZB. Bij de evenaar beweegt het wat koudere water naar boven om het door de wind aangedreven Ekmantransport te voeden. De resulterende verschillen in dichtheid werken de drukkrachten, die ontstaan door de hoogteverschillen aan het zeeoppervlak, juist tegen: er ontstaat minder druktoename in het warme centrum. Daardoor rijken de subtropische wervels maar tot een diepte



De belangrijkste stromingen in de oceaan en de bijbehorende verdeling van de temperatuur van het zeewater.

van ongeveer anderhalve kilometer. Omdat de passaatgordels niet precies symmetrisch liggen ten opzichte van de evenaar, ontstaat in dat gebied ook vaak nog een oostwaartse equatoriale tegenstroom.

In het uiterste noorden van de Noord-Atlantische Oceaan vinden we nog de overwegend oostelijke winden. Tussen deze windgordel en het gebied van de westenwinden zal de direct door de wind

aangedreven waterbeweging in de bovenste honderd meter van het water juiste een tekort vertonen, een divergentie. Het zeeoppervlak zal daar dalen, en er ontstaat een circulatie tegen de wijzers van de klok in. Ook wordt koud water van grotere diepte

In het westen van de Atlantische Oceaan stroomt honderd miljoen kuub water per seconde naar het noorden

opgezogen: in de figuur hierboven rond ongeveer 56°NB. Ook hier zullen de drukkrachten vanwege de hoogteverschillen aan wateroppervlak worden tegengewerkt door de drukkrachten vanwege verschillen in waterdichtheid.

Rond Antarctica zitten er geen continenten in de

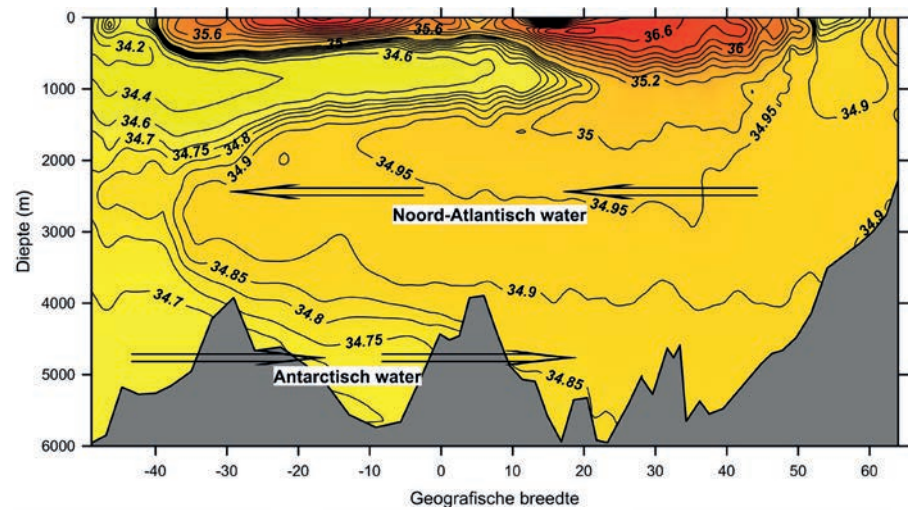
weg, daar ontstaan dus geen wervels. Daar vinden we de Westenwinddrift of Antarctische Circumpolaire stroming, die, zoals de naam ook aangeeft, de Zuidpool omringt. Ook daar beweegt het koudere water omhoog om de direct windgedreven stroming in de bovenste honderd meter te voeden.

Zoals gezegd is de Corioliskracht ook afhankelijk van de geografische breedte: hoe verder van de evenaar, hoe groter de kracht. Dat heeft tot gevolg dat de circulatie aan de westelijke kant van de subtropische wervels geconcentreerd is in een smalle en heel snelle stroming, met snelheden die meer dan een meter per seconde kunnen halen. Die snelle stromingen vind je in het westen van alle oceanen. In de Golfstroom stroomt bijvoorbeeld ongeveer tachtig tot honderd miljoen kubieke meter water per seconde naar het noorden.

Stroming door dichtheidsverschillen

Al tijdens de Challengerexpeditie in de negentiende eeuw ontdekte men dat in het diepe gedeelte van de oceaan, beneden de twee kilometer, het zeewater overal koud is, zelfs bij de evenaar. Bij de bodem worden daar temperaturen gemeten van minder dan 2°C. Dat kan alleen als er op grote diepte een zeestroming is van de Noord- of Zuidpool naar de evenaar. De dynamica van die diepe stroming is nog niet zo goed begrepen als die van de windgedreven stroming.

De drukkrachten die bij deze stroming betrokken zijn moeten samenhangen met verschillen in dichtheid, temperatuur en zoutgehalte van het zeewater. In de buurt van de polen neemt de dichtheid van het zeewater toe door afkoeling. Ook neemt het zoutgehalte nog toe door de vorming van (zoet) zeeijs. Dat zwaardere water daalt vervolgens. Op lagere breedten, bijvoorbeeld aan de evenaar, mengt dat koude water met warmer water uit de ondiepere lagen. Hierdoor neemt de dichtheid van dat diepe water wat af, en kan het weer naar boven bewegen, als in een stel communicerende



Het zoutgehalte in de oceaan.

vaten. De diepe stroming die hierbij op gang komt veroorzaakt in combinatie met het Corioliseffect weer oost-west dichtheidsverschillen. Net als bij de windgedreven stroming vindt je op grote diepten de snelste stromingen aan de westkant van de oceanen, met snelheden tot ongeveer tien centimeter per seconde. In het inwendige van de oceanen beweegt het water veel langzamer. Het draait tegen de wijzers van de klok in op het noordelijk halfrond, en met de wijzers mee in het zuiden. De snelheden zijn daar in de orde van één millimeter per seconde.

Het diepe, koude water uit de noordelijke poolgebieden van de Atlantische Oceaan heeft een relatief hoog zoutgehalte. Dat biedt een mooie kans om het Atlantische diepe water te volgen als het zich door de Atlantische Oceaan verspreidt richting de Indische Oceaan en de Stille Oceaan. In het noorden van de Stille Oceaan kan zulk koud water niet naar de bodem bewegen omdat het zoutgehalte van het oppervlaktewater daar veel te laag is. Het diepe water afkomstig van de gebieden rond de Zuidpool is nog kouder dan het Noord-Atlantische diepe water en blijkt langs de oceaانبodem in alle oceanen naar het noorden te stromen.

Door de vorming van (zoet) zeeijs neemt het zoutgehalte van het water toe.



Oceaanstromen als motor achter het klimaat

De diepe oceaancirculatie is waarschijnlijk heel belangrijk voor het mondiale klimaat. Waar de windgedreven circulatie symmetrisch is tussen de Stille en de Atlantische Oceaan, met overal grote wervels, is de diepe circulatie asymmetrisch. Als op een soort lopende band stroomt het koude water uit de noordelijke Atlantische Oceaan met dertien miljoen kuub per seconde rond Afrika naar de Indische Oceaan en rond Australië naar de Stille Oceaan. Daar mengt dat koude water zich met het erboven liggende warme water. Het wordt warmer en stijgt op naar de oppervlaktelagen waar het nog meer warmte ontvangt van de zon. Dat warm geworden water moet uiteindelijk weer terugstromen naar de noordelijke Atlantische Oceaan. Dit loopt gedeeltelijk via de Golfstroom, waar het echter nog geen kwart van uitmaakt. De noordelijke Atlantische Oceaan ontvangt zo warmte die door de zon in de Indische en Stille Oceaan is

ingestraald. Hierdoor is het klimaat boven en rond de noordelijke Atlantische Oceaan warmer dan boven en rond de noordelijke Stille Oceaan. Omdat de wervel ten westen van Noorwegen ook een deel van dat opgewarmde water ontvangt, is het klimaat in Scandinavië een stuk aangenamer dan in Alaska.

Het weer in de zee

Net zo min als het klimaat en het weer, is het hierboven geschetste beeld voor eeuwig stationair en onveranderlijk. Het klimaat wordt bepaald door grote lucht- en waterstromen, het weer wordt van dag tot dag beïnvloed door hoge- en lagedrukgebieden die steeds variëren. Op zee is de aandrijving door de wind niet constant. Er zijn veranderingen door het langstrekken van hoge- en lagedrukgebieden, veranderingen gedurende de seizoenen, en veranderingen van jaar tot jaar.

De aan het weer gebonden veranderingen van de wind gebeuren zo snel dat de oceaanstromen

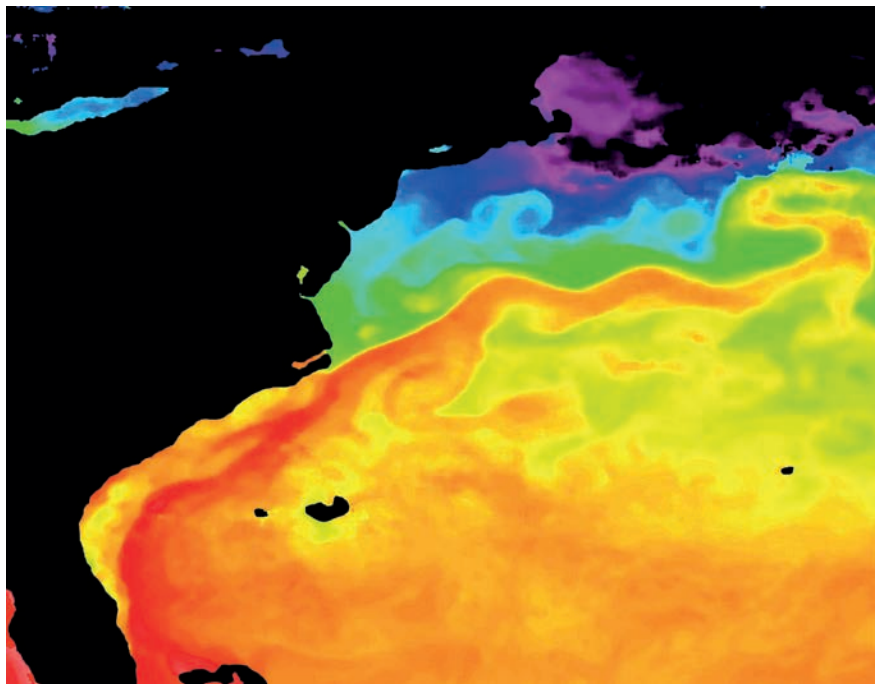
die in het algemeen niet goed kunnen volgen. Dat geldt zelfs ook nog voor de seizoensveranderingen. Een uitzondering hierop is de noordelijke Indische Oceaan. Daar zorgen de moessons ervoor dat zelfs de hele windgedreven circulatie van richting omslaat.

Meteorologen herkennen in het weer boven de oceanen ook langduriger oscillaties. Boven de tropische Stille Oceaan bijvoorbeeld, vertonen de passaten een sterke variatie, waarbij de sterkte eens in de drie tot zeven jaar duidelijk afzwakt (kader 'El Niño' op p. 12). Boven de Noord-Atlantische Oceaan vertonen de westenwinden een sterke variatie van jaar tot jaar: de Noord-Atlantische Oscillatie. Die geeft weer aanleiding tot verplaatsing van de grote oceaankwetsels en de daarbij behorende temperatuurverdeling. Ook hier zie je weer variaties van het ecosysteem, direct aangedreven door de veranderlijke wind, of indirect door de veranderlijke oceaancirculatie. En zo kent bijna ieder zeegebied z'n oscillaties als gevolg van de koppeling tussen oceaan en atmosfeer.

Wervels op drift

De oceaan kent ook variaties in de stromingen door interactie met zichzelf. De snelle stromingen langs de westrand van de oceanen, zoals de Golfstroom of de Agulhasstroom zijn vaak instabiel. Als de stroming de kust loslaat kan ze gaan meanderen. Die meanders groeien, en worden op een gegeven moment zo sterk dat ze van de hoofdstroming afsnoeren en er een losse ring ontstaat met doorsneden tot ongeveer driehonderd kilometer. Die ringen hebben, afhankelijk van hun rotatierichting, een warme of een koude kern, wat met infraroodopnamen vanuit satellieten goed te zien is. Die ringen kunnen lang blijven bestaan. Er worden regelmatig ringen waargenomen die zijn ontstaan in de Agulhasstroom bij Zuid-Afrika, die na één of twee jaar de kust van Brazilië bereiken.

Elders in de oceaan hebben de ringen kleinere



afmetingen. Die worden ook wel mid-oceaankwetselingen genoemd. Ze vervullen in zee een rol die enigszins vergelijkbaar is met hoge- en laagdrukgebieden in de atmosfeer, al zijn die zijn veel groter. De oceaankwetselingen hebben op gemiddelde breedten doorsneden van vijftig tot honderd kilometer. Op hoge breedten, zoals in de Noorse Zee, kan dat afnemen tot ongeveer tien kilometer. Toch is er per saldo een enorme hoeveelheid mechanisch energie opgeslagen in al die ringen en kwetselingen. Als je de energie van de gemiddelde stroming ziet als signaal, en de energie van de ringen en kwetselingen als ruis, kom je voor de gehele oceaan tot een signaal-ruisverhouding van 1:10 of zelfs 1:100. De variatie is dus groter dan de oceaanstrooming zelf. Maar voor het begrijpen van het warmtetransport, de grootschalige temperatuurverdeling en de rol van de oceaan in het klimaat, is de gemiddelde oceaancirculatie, zoals geschetst in de figuur op p. 23, toch nog steeds het belangrijkste.

Voor de Amerikaanse oostkust ontstaan wervels die zich op enig moment zelfs kunnen afsnoeren van de hoofdstroom.

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.

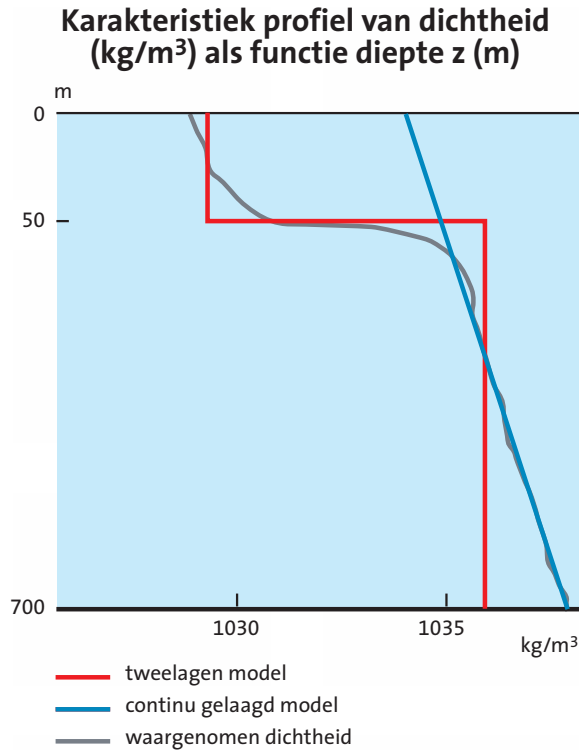
Het getij – de periodieke verandering van hoog naar laag water onder invloed van de zon en de maan – is in feite ook een heel lange golf. Net als windgolven en tsunami's zijn de getijden zwaartekrachtsgolven. In dit soort golven drijft de zwaartekracht het door de zon en de maan uit zijn evenwicht gebrachte 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 onderwatervolven hebben een aantal verrassende eigenschappen die ze wezenlijk anders maken dan de ons bekende, goed zichtbare volven. Tegelijk zijn die mysterieuze onderwatervolven 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 onderwatervolven 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 sprongsgewijze, 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 onderwatervolven optreden met heel verschillend gedrag.

Onderwatervolven op grensvlakken

Het wateroppervlak kun je omschrijven als een enorme dichtheidsprong: van ongeveer duizend kg/m^3 van water naar één 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 volven 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 onderwatervolven, vergeleken

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



met windgolven van vergelijkbare golflengte, veel langzamer bewegen, langere 'golfterieën' 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.

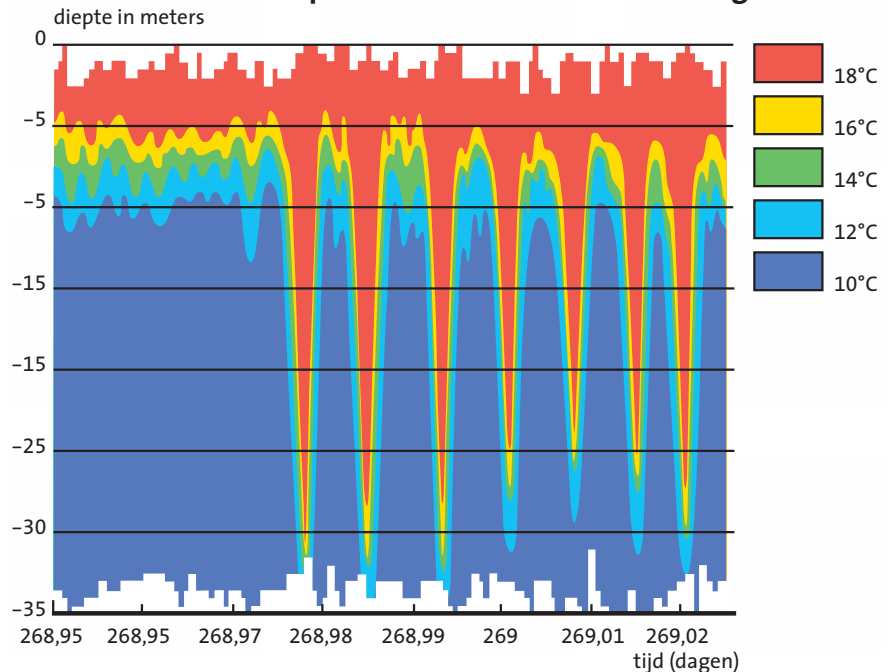
De ietwat morbide benaming doodwater is misschien niet eens misplaatst in het licht van de vele (bijna) ongelukken die het heeft veroorzaakt. Zo worden de problemen van geoeefende langeafstandszwimmers nog wel eens aan vermoeite of onderkoelde spieren geweten. Maar als die problemen op een warme zomerdag 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

Fluctuaties in temperatuur verraden onderwatergolven



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 zwimmers in de problemen kunnen komen.

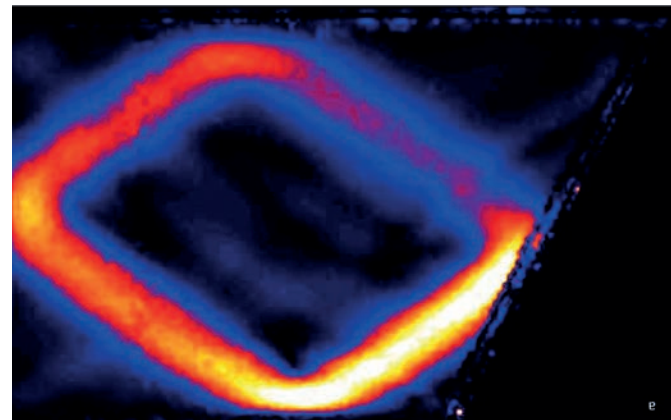
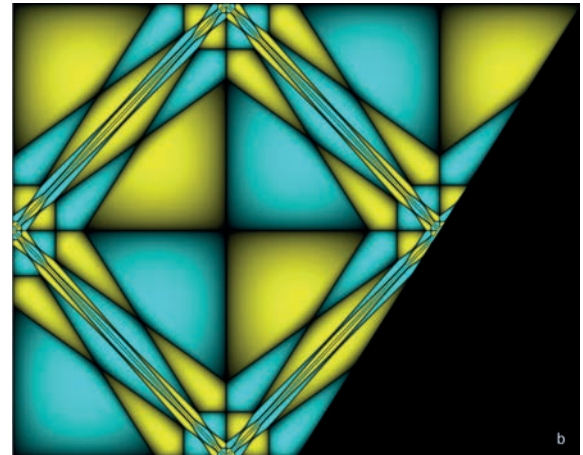
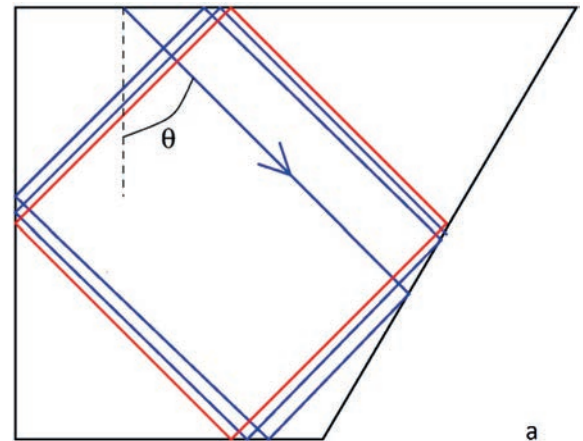
Ook in niet-lineaire golven treedt een beetje massatransport op. Daarnaast is soms sprake van volledige invanging van een pakket water in het soliton. Daarmee worden solitonen dus een soort pakketdienst voor voedingszouten en andere opgeloste stoffen, vergelijkbaar met het transport door honderd kilometer 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 vertikaal 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.



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!

Dode bodem, bron van kennis

■ PROFESSOR APPY SLUIJS

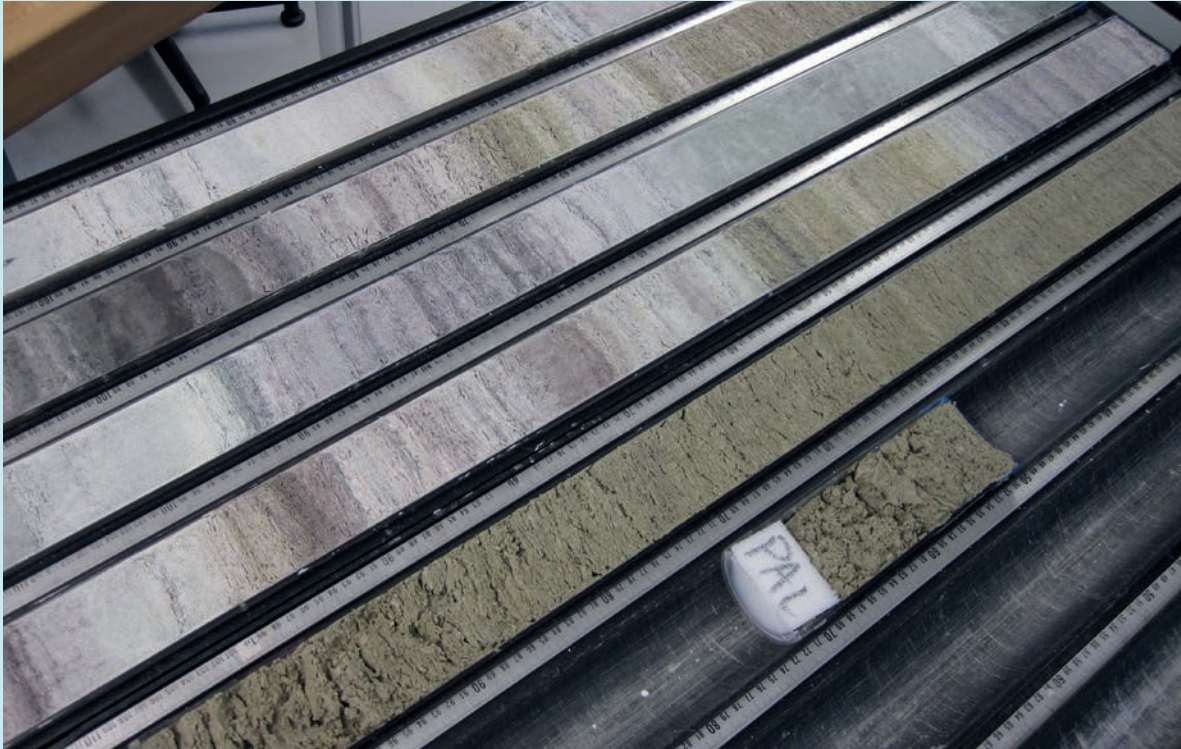
T*here is nothing in biology yet found that indicates the inevitability of death."* Richard Feynman, een Amerikaanse winnaar van de Nobelprijs voor natuurkunde, mocht dan wel vinden dat er geen bewijs is voor de onvermijdelijkheid van de dood, maar die dood zelf is er wel. In de oceaan wordt meer en sneller gestorven dan op land. In de oceaan wordt jaarlijks vijftig petagram (vijftig duizend keer een miljard kg) aan koolstof vastgelegd door primaire productie (fotosynthese). Dit is ongeveer evenveel als op land. Maar op land is zo'n tweehonderd keer meer levende biomassa aanwezig dan in zee. Dat betekent automatisch dat de biomassa in de zeeën en oceanen sneller sterft. Al dat sterven kun je dan maar beter gebruiken. Voor de wetenschap wel te verstaan.

Nergens is zoveel dood als op de zeebodem. Ze is ermee bezaaid; ze bestaat eruit. Met name harde delen van kalk, silicaat of organisch materiaal, gevormd door eencellige organismen. Veel anders komt er niet, afgezien van wat klei dat vanaf het land door de wind over de hele oceaan wordt verspreid. In de buurt van de continenten liggen ook grote hoeveelheden klei en zand die met organische resten van organismen door rivieren zijn aangevoerd. Oceaanbekkens zijn in deze zin enorme taartvormen die zich langzaam, jaar op jaar vullen met wat er maar in neervalt. Triljarden eencelligen, die nu honderden of zelfs duizenden meters opgestapelde oceanbodemmodder vormen, zijn de afgelopen honderden miljoenen jaren op de zeebodem neergedwarreld, niet lang nadat ze de dood hadden gevonden.

Palmen op de pool

Tien jaar geleden namen onderzoekers van de Universiteit Utrecht deel aan een grote expeditie in de Noordelijke IJszee. Ze verzamelden boorkernen uit de oceanbodem. In materiaal van 56 miljoen jaar oud bleken fossielen te zitten van tropische algen en zelfs palmen, die het toentertijd blijkbaar prima naar hun zin hadden rond de geografische Noordpool. Let wel: die regio lag toen praktisch in dezelfde geografische positie als nu. Het zeewater aan de Noordpool was warmer dan 20 graden, net als rond Antarctica. Zwemmen in de bloedhete tropische wateren was waarschijnlijk helemaal geen pretje. De fossielen in de zeebodem bieden dus uniek inzicht in hoe de biologie reageerde op veranderingen in de omstandigheden van het klimaat en hoe deze klimaatveranderingen zich manifesteerden in de oceaan.

We zijn er aan gewend dat wij als mens onze leefomgeving hebben gevormd naar onze behoeften, maar onze invloed op de natuur heeft allerlei bijeffecten. Zo neemt door de verbranding van fossiele brandstoffen de CO₂-concentratie in de atmosfeer sterk toe, wat leidt tot klimaatopwarming. De bijeffecten van menselijke invloed op de zee worden pas de laatste tien jaar serieus onderzocht. Ook de zee warmt op. Verder lost CO₂ uit de atmosfeer op in zeewater. Ongeveer 40 % van de 'menselijke CO₂' is in zee verdwenen en vormt daar een zuur, waardoor de pH daalt (zie p. 17). Verder komen door menselijk handelen vervuilende stoffen de oceaan in, net als meststoffen die op land uitspoelen. In combinatie met klimaatverandering leidt dit tot zuurstofgebrek in diepere waterlagen.



Boorkernen uit het diepst van de oceaanbodem verraden een hete geschiedenis.

Opwarming, verzuring en zuurstofgebrek, zeker in combinatie, hebben bijna zeker een groot effect op de biologie in de oceaan. Maar welk effect?

De zeebodem kan antwoorden geven. We kunnen aan de hand van de gesteentelagen onderzoeken hoe omstandigheden door de tijd heen veranderden, welke gevolgen het had voor de biologie, hoe het systeem zich weer herstelde en hoe lang dat duurde. Uiteraard biedt het verleden geen garanties voor de toekomst. De staat van de wereld is nooit zo geweest als nu en de CO_2 -concentratie

is waarschijnlijk nog nooit zo snel gestegen als in de afgelopen decades. Maar er zijn door natuurlijke oorzaak wel degelijk perioden geweest waarin de temperatuur ook snel steeg, de oceanen verzuurden en zuurstof gebrek ontstond. Soms in combinatie, soms los van elkaar. Er ligt dus een enorme schat aan informatie opgeslagen onder de zeebodem die ons een idee kan geven wat er in de toekomst wellicht gaat gebeuren.



Wie graag nieuwe plant- of diersoorten wil vinden moet of het tropisch regenwoud in, of een duikpak aanschaffen. Mede dankzij de drijvende kracht van rijke koraalriffen, extreme biotopen, maar ook door de constante dreiging van virusinfecties hebben de oceanen heel diverse levensvormen voortgebracht.

Biodiversiteit op zee

HET IS tot op de dag van vandaag onduidelijk hoeveel soorten planten en dieren er op aarde voorkomen. Het beste dat we hebben zijn ruwe schattingen. Die zijn gebaseerd op de aantallen beschreven soorten plus nog eens een geschat aantal op basis van het tempo waarin nieuwe soorten worden ontdekt. De meeste nieuw ontdekte soorten zijn tropische insecten en landplanten die worden aangetroffen in tropische regenwouden. Als je het beperkt tot het zeeleven is er in 2012 een schatting gepubliceerd die uitgaat van maximaal een miljoen soorten meercellige organismen. Dat is veel minder dan het geschatte aantal soorten op land.

Het land mag dan wel de meeste soorten dieren en planten huisvesten, in de zee zijn de meeste zogenoemde fyla vertegenwoordigd. Fyla – het meervoud van fylum, ‘stam’ in het Nederlands – zijn de hoogst geordende diergroepen, zoals de Arthropoda (geleedpotigen), Mollusca (weekdieren), Porifera (sponzen), Echinodermata (stekelhuidigen) of Chordata (chordadieren, waaronder de gewervelden). Sommige van die stammen komen alleen voor in de zee, zoals bijvoorbeeld de stekelhuidigen (zee-egels, zeekomkommers, zeelelies en zeesterren). Deze verscheidenheid van fyla houdt ook in dat zeedieren onderling sterk van elkaar

kunnen verschillen in hun bouwplan. Ze zijn dus niet alleen in genetica, maar ook in uiterlijk en anatomie meer divers dan landdieren.

Taxonomische stamboom voor bijvoorbeeld de bultrug

Rijk:	Animalia (Dieren)
Stam:	Chordata (Chordadieren)
Klasse:	Mammalia (Zoogdieren)
Orde:	Cetacea (Walvissen)
Onderorde:	Mysticeti (Baleinwalvissen)
Familie:	Balaenopteridae (Vinvissen)
Geslacht:	<i>Megaptera</i>
Soort:	<i>Megaptera novaeangliae</i>

De Koraaldriehoek als centrum van mariene biodiversiteit

■ DR. BERT HOEKSEMA

Een groot deel van de mariene biodiversiteit komt voor rond tropische koraalriffen. De koraalriffen met de hoogste biodiversiteit komen voor in het grensgebied tussen de Indische en de Grote Oceaan, tussen het zuidoostelijke deel van het Aziatische continent en Australië, met nog een deel van de westelijke Stille Oceaan. Dit gebied wordt de Koraaldriehoek genoemd, omdat de begrenzing wordt bepaald door de aanwezigheid van het maximum van vijfhonderd tot zeshonderd soorten rifkoralen. Het omvat de Filippijnen, de Salomon Eilanden, Oost-Timor, en grote delen van Indonesië, Maleisië en Papoea Nieuw-Guinea. Vanwege de

hoge concentraties aan soorten koraalriforganismen is dit gebied ook een belangrijk aandachtsgebied geworden van zowel internationale als lokale natuurbeschermingsorganisaties, zoals het Wereld Natuur Fonds.

In de pers verschijnen regelmatig berichten over pas ontdekte, mysterieuze levensvormen uit de diepzee. Een deel van deze soorten wordt ontdekt door middel van onderzeeboten of op afstand bestuurbare robots die zijn uitgerust met camera's en grijpers. Wat deze onderzeese vaartuigen uit zee halen, overtreft vaak onze verbeelding. Af en toe zit er iets bij wat er zo vreemd uitziet dat biologen niet eens direct kunnen herkennen in welke diergroep zo'n onbekende soort thuishoort.

Toch komen niet alle pas ontdekte soorten zeeorganismen uit diep water. Veel onbekende soorten worden juist aangetroffen in ondiep water, met name op de tropische koraalriffen zoals in de Koraaldriehoek. Dat juist hier veel nieuwe soorten worden gevonden komt doordat koraalriffen zo extreem rijk zijn aan soorten. Een deel daarvan wordt pas ontdekt als ze worden waargenomen door een specialist die juist die diergroep goed kan herkennen wanneer hij zelf onderwater kijkt. Soms wordt zo'n onderzoeker pas op het goede spoor van nieuwe soorten wordt gezet als hij eerst genetische analyses uitvoert met meerdere organismen die veel onderlinge gelijkenis tonen. Als de genetica op sterke variatie wijst, dan is er sprake van zogenaamde 'cryptische soorten'.

Verder worden veel soorten voor het eerst opgemerkt door duikers die onderwaterfotografie als hobby of beroep bedrijven. Die onderwaterfotografie is de laatste decennia laagdrempeliger geworden door de ontwikkeling van goede persluchtuitrusting. Daarbij is zowel duiktoerisme als zeebiologisch onderzoek via duikcentra en *live-aboard* boten logistiek minder moeilijk geworden. De meest afgelegen plekken worden nu 'bedoken'.

De positie van de koraaldriehoek.



Expedities

De eerste waarnemingen aan de hoge biodiversiteit in de Koraaldriehoek werden verricht tijdens grootscheepse expedities, zoals de Siboga-expeditie (1899-1900) en de Snelliusexpeditie (1929-1930). Die gingen vooral naar oostelijk Indonesië. Het koraalrifonderzoek tijdens deze beroemde expedities werd grotendeels uitgevoerd door onderzoekers van het Zoölogisch Museum te Amsterdam, het Rijksmuseum van Natuurlijke Historie in Leiden en het Rijksherbarium, ook in Leiden. Die instituten zijn inmiddels gefuseerd tot het *Naturalis Biodiversity Center* in Leiden.

De verzamelde dierlijke en plantaardige monsters worden beheerd in de wetenschappelijke collecties van Naturalis, waar ze frequent worden geraadpleegd door biologen en geologen. Dankzij deze referentiecollecties, die als cultureel erfgoed eigendom zijn van de Nederlandse staat, kunnen onderzoekers verifiëren hoe de beschreven soorten er daadwerkelijk uitzien en wanneer ze waar zijn waargenomen. Dat laatste kan belangrijk zijn bij natuurbeschermingsonderzoek naar het plaatselijk verdwijnen van soorten.

Ook veel andere landen organiseerden in de eerste helft van de twintigste eeuw mariene expedities naar Indonesië of de Filippijnen. Door het uitwerken van expeditiemateriaal werden steeds meer soorten beschreven, waardoor het ging opvallen hoe hoog de soortenrijkdom in dit gebied is. Het gebied kreeg hierdoor internationaal steeds meer bekendheid onder mariene onderzoekers en werd uiteindelijk de Indo-Maleisische Driehoek genoemd, bestaande uit Indonesië, Maleisië en de Filippijnen. Deze driehoek is voornamelijk bepaald door de grenzen rondom deze drie landen. Die grenzen hebben op zich geen enkele biologische betekenis, in tegenstelling tot die van de meer oostelijk gelegen Koraaldriehoek, die wordt gedefinieerd door het hoge aantal koraalsoorten.



HMS Siboga in 1899.

Tegenwoordig vinden er nog steeds expedities plaats in de Koraaldriehoek, ook (mede) door het Nederlandse Naturalis in samenwerking met lokale universiteiten, onderzoeksinstituten en natuurbeschermingsorganisaties. Hierbij gaat het vooral om het vaststellen van de biodiversiteitspatronen in mariene parken. Daarmee kunnen prioriteiten worden gesteld in gebieden die beschermd moeten worden, waarbij ook de activiteiten van de plaatselijke bevolking niet te veel in het gedrang mogen komen. Verder vertellen de resultaten van zulke expedities veel over het voorkomen van zeldzame soorten, waarvan sommige alleen plaatselijk voorkomen of zelfs voor het eerst worden waargenomen.

Soortvorming

Het wetenschappelijk doel van het onderzoek aan mariene biodiversiteitspatronen is onder andere om te achterhalen hoe soorten ooit zijn ontstaan en welke factoren nu een rol spelen bij hun instandhouding. Hierdoor leer je de biodiversiteit beter te begrijpen, wat uiteindelijk ook een rol kan spelen in het juiste beheer van gebieden met hoge biodiversiteit of met specifieke zeldzame soorten.

Er zijn meerdere verklaringen bedacht voor de immense soortenrijkdom in de Koraaldriehoek. De meest voor de hand liggende is dat alle soorten ooit zijn ontstaan in dit gebied. Daarmee zou de Koraaldriehoek een 'centrum van speciatie' zijn. Maar daarmee negeer je dat de meeste aanwezige soorten ook ver buiten dit gebied voorkomen. Sterker nog: ze komen vaak al miljoenen jaren buiten het gebied voor, getuige hun voorkomen als fossiel in oude aardlagen. Een groot deel van deze algemeen voorkomende koraalrifbewoners heeft een verspreiding in een gebied dat zich uitstrekt van



Koraal krijgt het moeilijk bij een dalende pH.

De soortenrijkdom van de Koraaldriehoek wordt nog niet begrepen

het westelijke deel van de Indische Oceaan tot het midden van de Grote Oceaan: de *Indo-West Pacific*.

Een tweede theorie gaat ervan uit dat de soorten van het centrum oorspronkelijk meer geïsoleerd aan de rand van hun huidige verspreidings-arealen zijn ontstaan, bijvoorbeeld in het westelijke deel van de Indische Oceaan of het oostelijke deel van de Grote Oceaan. Daar vandaan zouden ze langzamerhand naar het grensgebied

tussen beide oceanen (de *Central Indo-Pacific*) zijn gemigreerd om zich daar te concentreren. Ook deze theorie heeft zijn beperkingen. Als je uitgaat van een centrum van accumulatie, verklaar je niet waarom soorten niet elders zouden zijn ontstaan en waarom de meeste nu niet meer in de marges zelf voorkomen.

Een variant op de theorie van accumulatie stelt dat de soorten gebonden zijn aan aardschollen die langzaam over de aardbol schuiven. Bij soorten die weinig verspreiding vertonen zou dit wel kunnen opgaan. Dit zijn dan zogenoemde 'aardschol-enden'. Maar verreweg de meeste soorten hebben een larvaal stadium waarin ze via zeestromingen probleemloos met de oceaanstromen over de aardschollen kunnen migreren.

Een derde theorie gaat ervan uit dat alle verspreidingsarealen willekeurig verdeeld zijn over de *Indo-Pacific* en min of meer overlappen in het centrum: geen speciatie, geen accumulatie, maar een centrum van overlap. In dit geval blijft onduidelijk waarom de grenzen van de Koraaldriehoek deels zo scherp omlijnd zijn en afsteken bij omliggende gebieden. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de meeste soorten relatief oud zijn en dat hun verspreidingsarealen gedurende miljoenen



jaren telkens van positie zijn veranderd door de beweging van aardschollen en door meerdere cycli van zeespiegelfluctuaties. Uiteindelijk zou hun huidige areaal overgebleven zijn. Veel soorten stierven plaatselijk uit in ondiepe kustzeeën op het continentaal plat, die telkens droog kwamen te staan bij lage zeespiegelstanden. De laatste lage zeespiegelstand was ongeveer 17.000 jaar geleden, tijdens de koudepiek van de laatste ijstijd. Daarna steeg de zeespiegel weer totdat die zo'n 5.000 jaar geleden de huidige positie bereikte. Soorten die een voorkeur hebben voor riffen aan de rand van

**In de Koraaldriehoek komt een ongeken-
de verscheidenheid aan
zeeleven voor.**

diepe oceaانبekken of rondom oceanische eilan-
den met relatief slibvrij water, waren in staat om
met de dalende en weer stijgende zeespiegel mee
te verhuizen. Veel van deze soorten zijn kennelijk
niet in staat geweest om de ondiepe kustzeeën te
herbevolken nadat de zeespiegel de huidige stand
bereikte. Het is ook mogelijk, dat de condities in
deze ondiepe zeeën niet optimaal zijn om te kun-
nen overleven.

Variatie binnen de Driehoek

Binnen de Koraaldriehoek zijn niet alle koraalrif-
gebieden even rijk aan soorten. Gebieden met veel
diversiteit in habitats huisvesten doorgaans de
meeste soorten, maar er kunnen ook gebieden zijn
waar rifgroei slecht ontwikkeld is of monotoon
doordat de riffen hier onderhevig zijn aan sedi-
mentatie of veel bloot staan aan hevige golfslag. In
de buurt van rivieren met veel slibuitstoot zijn de
riffen soortenarm of zelfs afwezig doordat slib-
deeltjes in het water licht wegnemen. De meeste
rifbouwende koralen kunnen daar niet tegen. Bij
bezinking van het slib kan het koraal uiteindelijk
verstikken. Tegelijk zijn er ook enkele koraalsoor-
ten die juist het liefst dicht in de buurt van rivieren
voorkomen en daar optimaal gedijen.

De diversiteit op een koraalrif is veel meer dan
de diversiteit in koraal alleen. Riffen bestaan vaak
uit soorten koraalriforganismen die weer andere
soorten huisvesten. Deze geassocieerde soorten
zijn vaak strikt afhankelijk van een gastheer-
soort; ze zijn gastheerspecifiek. Deze vorm van
samenleving wordt symbiose genoemd. Veel
gastheersoorten zijn vastzittende organismen
zoals steenkoralen, waaierkoralen en sponzen.
Deze kunnen gastheer zijn van een combinatie
van meerdere geassocieerde soorten tegelijk. Veel
voorkomende symbionten zijn slakken, garnalen,
krabben en wormen. Hieronder zijn nog veel
onbekende soorten omdat veel van deze dieren
klein zijn en een verborgen leven leiden, diep

in het rif. De symbionten kunnen optreden als parasiet, wanneer ze van de gastheer eten of deze op een andere manier tot last zijn. Ze kunnen ook bij de gastheer leven als commensaal, waarbij de gastheer geen voordeel of nadeel ondervindt. Als de gastheer en de symbiont wederzijds voordeel

hebben van de samenleving, dan wordt dit mutualisme genoemd.

Een belangrijk voorbeeld van mutualisme op het rif is de relatie van rifkoraal met eencellige algen, de zoöxanthellen. Die algen leven in het zachte weefsel rondom het koraalskelet. Zonder deze

Veel meer rif

Bij zoveel nadruk op de Koraaldriehoek lijkt het overgrote deel van de overige koraalrifgebieden te weinig aandacht te krijgen. Dit zou ten onrechte zijn omdat de riffen daarbuiten ook belangrijk zijn. Het Groot Barrièrerif is wellicht armer aan soor-

ten dan de Koraaldriehoek maar is van belang voor Australië en de hele wereld vanwege zijn enorme afmetingen. De Rode Zee grenst aan de noordwestelijke uithoek van de Indische Oceaan en heeft half zo veel soorten als de Koraaldriehoek. Hiervan

zijn echter veel soorten uniek (endemen) vanwege de min of meer geïsoleerde positie van de Rode Zee. Net als in veel andere koraalrifgebieden speelt het duiktoerisme hier een belangrijke rol. Ook de koraalriffen van het Caribische gebied,

waaronder de Nederlandse Koninkrijksdelen, zijn beroemd, al hebben ze maar een tiende van het aantal soorten van de Koraaldriehoek. Met name Bonaire en Curaçao zijn geliefd bij Nederlandse sportduikers.



algen kan het rifkoraal niet snel groeien en zelfs sterven. De algen leveren zuurstof maar bevorderen ook de aanmaak van het kalkskelet. Op hun beurt profiteren de algen doordat ze huisvesting en kooldioxide krijgen van het koraal. Zonder deze symbiose zouden rifkoralen geen koraalriffen kunnen maken en ook geen schuilplaats en voedsel kunnen bieden aan andere organismen. Rifkoralen groeien dan ook veel sneller dan koudwaterriffen die op grotere diepte voorkomen en veel armer zijn in soorten.

Het belang van de symbiose met algen wordt helemaal duidelijk als koraal gaat bleken: de beruchte *coral bleaching* in jargon. Bij een te plotselinge verhoging van de temperatuur van het zeewater kunnen de zoöxanthellen niet overleven en verdwijnen ze uit het zachte weefsel van het koraal. De koralen verliezen hierdoor hun kleur, die eigenlijk de kleur is van de algen. Sommige koraalsoorten zijn hier extra gevoelig voor en gaan eerder dood dan andere soorten. Een belangrijk probleem hierbij is dat dit op grote schaal gebeurt en dat het aantal soorten na herstel sterk is verminderd.

Coral bleaching wordt meestal in één adem genoemd met de wereldwijde klimaatsveranderingen door menselijk toedoen. Mensen kunnen ook een nog directere bedreigingen vormen voor het leven op koraalriffen door destructieve visserij, bijvoorbeeld met explosieven of met grote netten die losraken en hele riffen kunnen verstikken. De aquariumindustrie kan ook lokaal verlies aan soorten veroorzaken doordat bepaalde soorten koraal en vis bijzonder gewild zijn in de internationale handel, waardoor overbevissing kan ontstaan. Ook vervuiling van riffen in de buurt van grote steden kan lokaal verlies van soorten als gevolg hebben.

Extreme habitats

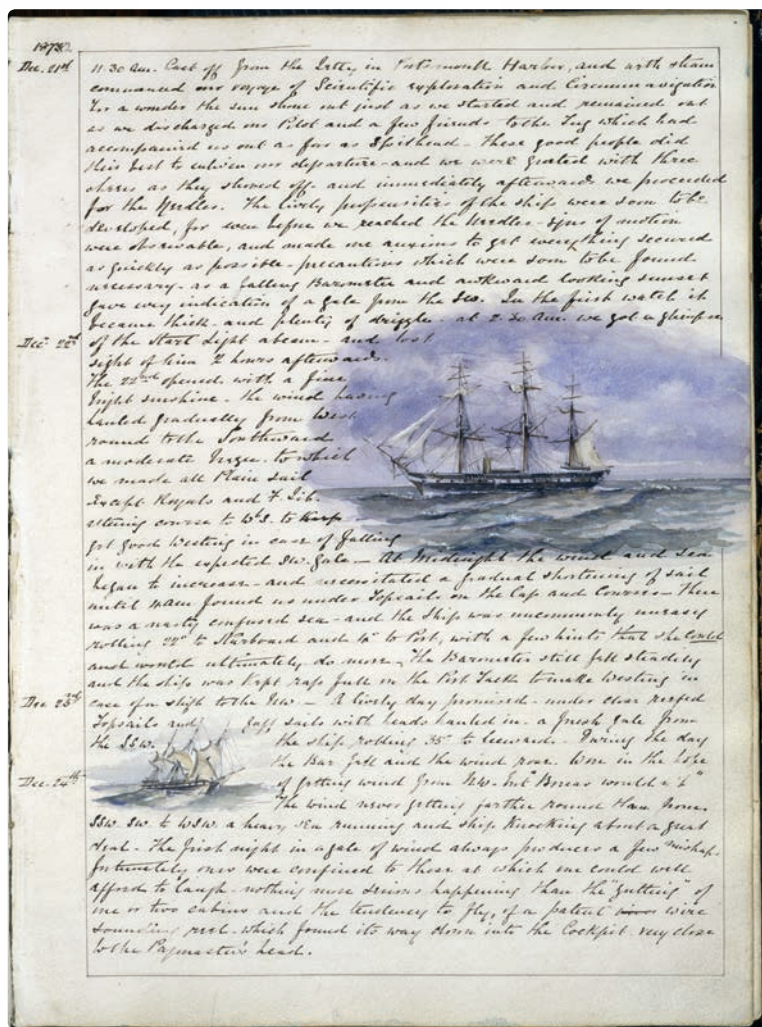
■ DR. MARC LAVALEYE

De diepzee vormt een enorm gebied met extreme omstandigheden. Het is er doorgaans kouder dan 4 °C en donker omdat er geen sprankje zonlicht doordringt. Er is nauwelijks voedsel aanwezig, en de druk is er enorm. Met diepzee bedoelen we meestal zeegebieden dieper dan 200 meter. Er bestaan drie zones: de bathyale diepzee (200 tot 4.000 meter), de abyssale zone (4.000 tot 6.000 meter) en de hadale zone (6.000 tot 11.000 meter). De diepste diepten in de diepzee zijn dus dieper dan de hoogste bergen op land hoog zijn. De term 'diepe biosfeer' wordt ook regelmatig gebruikt.

Van een afstand bekeken valt onmiddellijk op hoeveel van het aardoppervlak is bedekt met zeewater: meer dan twee derde (71%). Veel minder bekend is dat die oceanen zo ontzettend diep zijn, gemiddeld 3.200 meter. Varend met een schip vanuit de ondiepe Noordzee door het Kanaal de Atlantische Oceaan op, wordt het al snel 5 kilometer diep. Dat is een afstand waar je ruim een uur voor moet lopen, recht naar beneden wel te verstaan. Zo'n waterkolom van 5 kilometer drukt met een gigantische kracht naar beneden: 1 bar voor iedere 10 m water. In plaats van 1 bar aan het oppervlak is de druk daar dus 500 bar. Is leven daar in de diepzee dan wel mogelijk?

Leven in de diepzee

In de tijd van de eerste grote ontdekkingstochten op zee werd aangenomen dat de diepzee het thuis was van enorme, allesverslindende monsters. Dat is ook wel begrijpelijk als je bedenkt dat van veel van de schepen van ontdekkingsreizigers nooit meer wat werd gehoord. Edward Forbes was een van de eersten die het diepzeeleven wetenschappelijk onderzocht. Met een dreg viste hij in 1841 naar zeedieren in de oostelijke Middellandse Zee, tot



Fragment uit het scheepsjournaal van de Challengerexpeditie.

wel 420 meter diep. Omdat hij in dieper water nauwelijks nog dieren vond, kwam hij tot een theorie dat beneden 550 meter diepte geen leven mogelijk was in de diepzee. Die diepzee was volgens hem 'azoisch', dus zonder leven.

We weten nu dat het onderzoeksgebied van Forbes ongelukkig gekozen was. De oostelijke Middellandse zee is namelijk een extreem oligotroof gebied, wat betekent dat er heel weinig voedsel voorkomt. Bovendien was zijn dreg erg ineffectief.

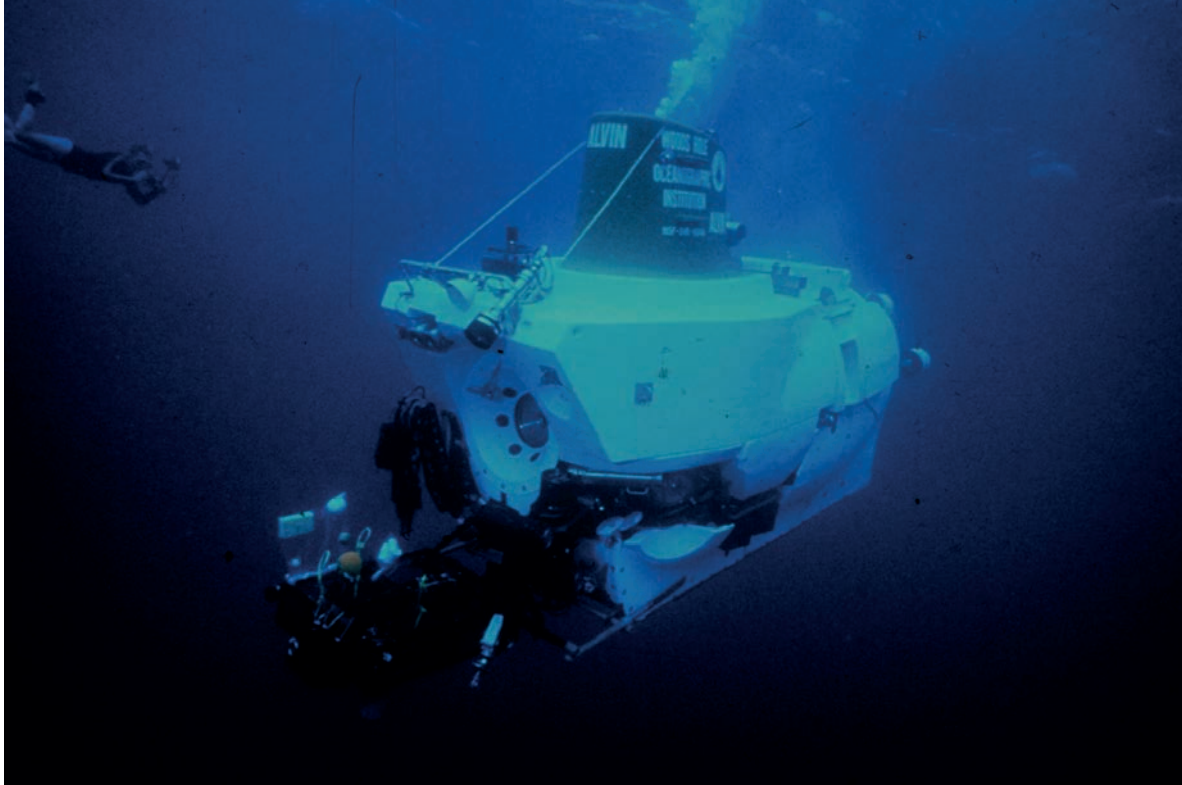
Zijn theorie kwam dan ook al snel onder druk te staan doordat diverse collega's wel allerlei dieren op grote diepte vingen.

Tijdens de Challengerexpeditie (1872 tot 1876) werd er met netten tot grote diepte in alle oceanen gevist. Het resultaat was dat er bijna 5.000 nieuwe zeedieren werden gevonden en beschreven. Het was voor eens en voor altijd aangetoond dat er leven tot op grote diepte in alle oceanen aanwezig is.

Leven onder grote druk

Met dank aan goede videocamera's kun je tegenwoordig met eigen ogen zien dat vissen op duizenden meters diepte heel gemakkelijk en gracieus rondzwemmen. Tere, zachte koralen, sponzen, zeekomkommers en zeeanemonen leven er zonder enige vorm van zware pantsering. Sterker nog: de diepzeedieren zijn vaak nog teerder dan die in ondiepe zeeën. De verklaring is vrij simpel. De druk is wel hoog, maar in het lichaam van de dieren is die even hoog als daarbuiten. Een object dat met gas is gevuld, zoals een duikboot, heeft een zware bepantsering nodig, omdat het anders wordt samengedrukt. Een voetbal van 4 liter, gevuld met lucht, wordt op 5.000 meter diepte samengeperst tot de grootte van een knikker van 2,5 centimeter. Vul je die voetbal eerst met water, dan verandert het volume niet noemenswaardig bij toenemende druk. Hiermee is gelijk ook het verhaal ontkracht dat dieren uit de diepzee zouden ontploffen als ze omhoog worden gehaald. Zelfs vissen met een met gas gevulde zwemblaas komen nog redelijk intact, zij het dood aan dek. Alleen hun ogen zijn opgezwollen en de maag is een beetje door de bek geperst.

Ze mogen dan niet exploderen, toch blijkt het niet gemakkelijk of zelfs onmogelijk om diepzeedieren in aquaria te laten overleven. Biologen weten dat dieren die zijn gevangen op een diepte beneden de 2.000 meter vaak geen enkel teken



De onderzeeër Alvin in actie.

van leven meer geven als ze gevangen zijn. Vaak werd dit geweten aan het grote temperatuurverschil. Maar er is meer aan de hand. In 1968 zonk het Amerikaanse onderzeevaartuig Alvin naar een diepte van 1.500 meter doordat er een kabel brak. De bemanning kon nog net op tijd ontsnappen omdat de onderzeeër nog een paar minuten bleef drijven. Een jaar later kon de Alvin geborgen worden. Het viel op dat de lunchpakketjes aan boord niet alleen intact maar zelfs nog redelijk vers en eetbaar waren. Kennelijk functioneerden de bacteriën die van het oppervlak waren meegezonden onder grote druk niet meer.

Microbiologen hebben ontdekt dat bacteriën ook verschillend kunnen reageren op druk. Zo blijkt dat de darmbacterie *Escherichia coli* al problemen krijgt bij 100 bar, dus op 1.000 meter waterdiepte. Andere, zogenoemde piezofiele (druk minnende) bacteriën functioneren juist goed onder druk. Die vallen stil of gaan dood als de druk wegvalt. Dit

heeft verschillende oorzaken. Bij chemische reacties verschuift onder hogere druk het evenwicht in de richting waar het volume kleiner wordt. Dit wordt het Le Châtelier-principe genoemd. Enzymen zijn in feite grote, driedimensioneel gevouwen moleculen die verantwoordelijk zijn voor allerlei belangrijke stofwisselingsprocessen in cellen. Die blijken van vorm te veranderen onder hoge druk en dan dus niet goed meer te werken. Ook de vloeibaarheid van lipiden, vetachtige stoffen die een belangrijke functie hebben in membranen, bijvoorbeeld rond cellen, veranderen bij hogere druk. Daardoor zijn de membranen niet meer doorlatend voor water en andere moleculen. Onder druk krijgt DNA ook problemen om zich te dupliceren. Al deze processen gelden niet alleen voor bacteriën maar voor alle dierlijke cellen. Op grond van metingen aan bacteriën schat men dat leven bij een druk van 1.500 bar helemaal niet meer mogelijk is. In 2012 bereikte James Cameron

met zijn Deep Sea Challenger de diepste plek van de oceanen, de Mariana Trog van 10.911 meter onder het wateroppervlak, bij een druk van meer dan duizend bar! De kreeftachtigen die hij daar zag bewezen dat leven hier in ieder geval nog mogelijk is.

‘Monsterparade’ uit de diepzee

In het dierenrijk onderscheiden we ongeveer 35 fyln, ofwel stammen. Hiervan komen er 31 in zee voor, waarvan 27 ook in de diepzee. Hieruit blijkt dus dat ondanks de extreme omstandigheden de meeste diergroepen ook in de diepzee vertegenwoordigd zijn. De meest opvallende grotere diepzeeorganismen die op of bij de bodem leven zijn vissen, stekelhuidigen, kreeftachtigen, neteldieren, sponzen en reuzeneencelligen. Een algemene vis-sengroep zijn de grenadiervissen. Die worden ook wel rattenstaarten genoemd vanwege hun lange, dun uitlopende staart die er door de smalle rug- en

anaal vin rafelig uit ziet als hij gevangen wordt. Ze kunnen tot een meter groot worden, komen in alle oceanen voor en zijn meestal binnen enkele minuten ter plaatse wanneer er

aas wordt aangeboden.

Het is opvallend dat diepzeevissen bijna allemaal ogen hebben, sommige zelfs ogen die 200 keer gevoeliger zijn voor licht dan die van de mens. Dat komt omdat allerlei dieren via speciale orgaan-tjes een zwak licht kunnen produceren via bioluminescentie. Ogen komen tijdens de jacht op zulke diertjes dus goed van pas in de donkere diepzee.

Tot de stekelhuidigen behoren zeesterren, zee-egels, zeekomkommers, slangsterren en zeelelies. Vooral de zeekomkommers zijn algemeen en een opvallende verschijning. Deze stevige, gelatineachtige, worstvormige dieren zijn soms meer dan een

halve meter groot. Ze bewegen zich langzaam over de zeebodem voort. Op hun mond zitten papillen waarmee ze het meest voedselrijke en zachte bovenste laagje van de diepzeebodem opslobben. Hun darmen zitten dan ook helemaal vol met sediment. De slingerende sporen van hun foera-geergedrag zijn vaak als een soort tractorspoor op de zeebodem te zien.

Zee-egels die hier rondlopen zien er op het eerste gezicht vrij herkenbaar uit. Eenmaal opgevisst blijkt dat hun skelet niet hard maar juist leerachtig is. Aan boord lopen ze helemaal leeg en worden ze zo plat als een pannenkoek.

Neteldieren worden vooral vertegenwoordigd door koralen, zeeanemonen en zeeveren. De steenkoralen die een hard kalkskelet hebben zijn meestal solitair, maar op sommige plekken komen ook echte riffen voor, opgebouwd uit kolonievormende steenkoralen (zie box op p. 54). Bij gebrek aan een vaste ondergrond hebben zeeanemonen vaak een klomp sediment met hun voet omsloten. Zo kunnen ze als een duikelaar recht overeind blijven staan. Zeeveren zien er uit als lange, buigzame sprietten, die rechtop in het sediment staan. Bovenaan de spriet zit een bosje poliepen met geveerde tentakeltjes.

Glassponzen zijn de dominante groep sponzen. Het bekervormige skelet bestaat uit duizenden fijne glasnaaldjes en staat vaak op een steel van lange glasnaalden die soms zo dik zijn als breinaalden.

In sommige gebieden ligt de zeebodem bezaaid met tere, driedimensionale structuren zo groot als golfballen. Deze *Xenophyophorea* worden ingedeeld bij de Foraminiferen en behoren tot de grootste eencelligen die we kennen. Individuen kunnen soms een diameter bereiken van 20 cm.

Minder opvallend is de zogenoemde infauna, die ingegraven in het sediment leeft. Hier zijn borstelwormen de dominante soort bij de macrofauna, terwijl nematoden het grootste deel van de meiofauna uitmaken. In vergelijking tot ondiep water is

Tot elf kilometer diep is nog leven mogelijk



James Cameron in zijn 'Deep Sea Challenger'.

de infauna opvallend klein. Biologen moeten dan ook veel fijnere zeven gebruiken bij diepzeedonderzoek, met een maaswijdte van soms maar 0,2 millimeter.

Levende fossielen in de diepzee

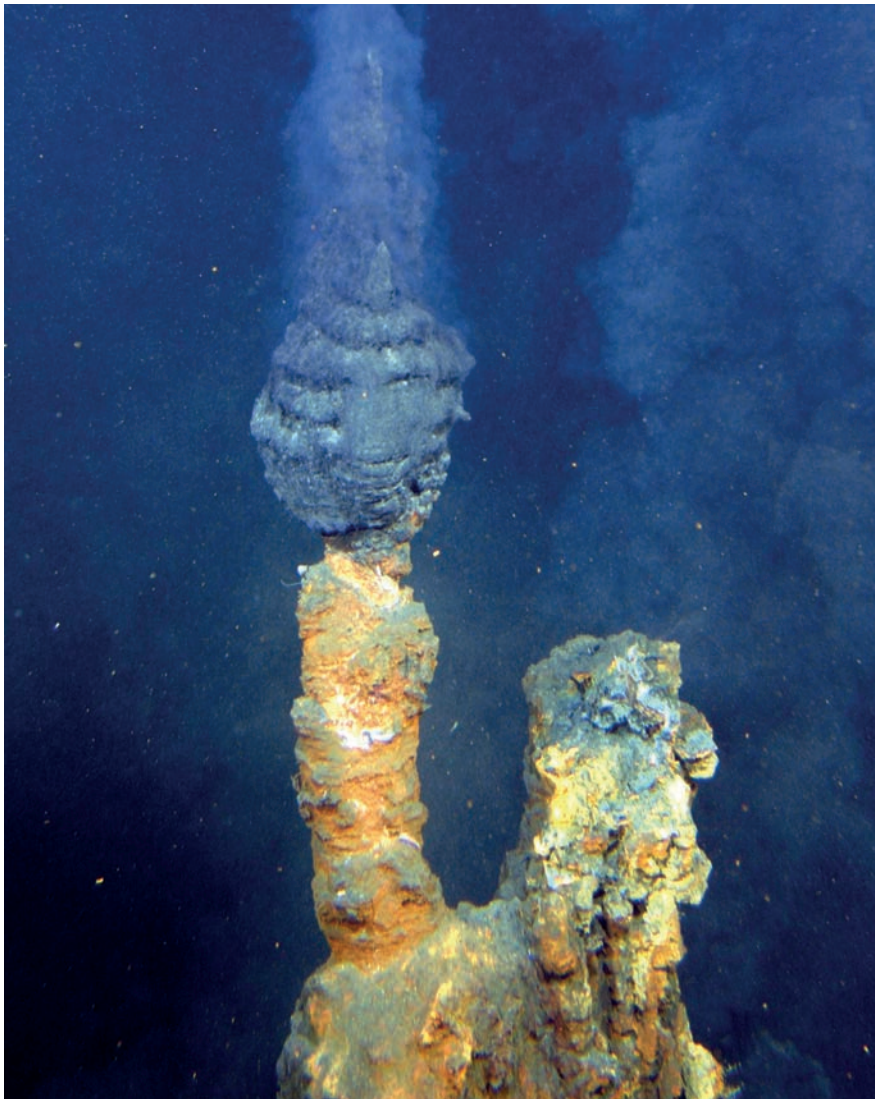
In 1864 ving de Noorse onderzoeker G.O. Sars op 550 meter diepte bij de Lofoten een gesteelde zeelelie, *Rhizocrinus lofotensis*. Dat was een enorme verrassing, want deze diergroep was tot dan toe alleen maar bekend als fossiel uit lang vervlogen periodes zoals het Perm, een geologisch tijdperk van meer dan 250 miljoen jaar geleden. Wetenschappers kregen daardoor hoop dat de diepzee een soort refugium zou kunnen zijn voor nog andere fossiele diergroepen. Zo werd er tijdens de Challenger-expeditie intensief gezocht naar ammonieten en belemnieten, maar zonder resultaat. In 1952 werd er nog een keer zo'n bijzondere vondst gedaan. De Deense Galathea-expeditie, speciaal georganiseerd

om de diepste gebieden van de oceanen te onderzoeken, vond in troggen voor de kust van Mexico in de Stille Oceaan op een diepte van 3.200 meter een aantal onooglijke napslakjes van nog geen 4 centimeter lengte. Bij nader onderzoek bleken die te behoren tot de Monoplacophora, een klasse van weekdieren waarvan toen nog werd gedacht dat die sinds het Devoon, dus 350 miljoen jaar geleden al waren uitgestorven.

Hoewel de diepzee dus niet de ultieme verzamelplek van levende fossielen blijkt te zijn, denkt men nu wel dat het eerste leven op aarde juist daar is ontstaan. In 1977 ontdekten Amerikaanse geologen op zoek naar vulkanisme in de diepzee tot hun verbazing een hele rijke fauna rond een zogenoemde *black smoker*. Onbekende, meters lange wormen (*Riftia*) en schelpdieren (*Calyptogenia*) tot 30 cm groot leefden daar in grote aantallen op een diepte van 2.500 meter. Uit de hete bronnen borrelde stinkend water van bijna 400 °C, met hoge concentraties waterstofsulfide. Onmiddellijk rees de vraag hoe deze rijke fauna hier kon overleven in de voedselarme diepzee.

Inmiddels weten we dat speciale bacteriën waterstofsulfide als energiebron kunnen gebruiken om zo uit koolzuur of methaan grotere organische moleculen te bouwen. In plaats van fotosynthese met zonlicht, doen deze bacteriën dus aan chemosynthese. De rijke fauna kan hier overleven door te profiteren van deze chemosynthetische bacteriën. Ze leven ermee samen of ze filteren ze uit het water als voedsel. Deze speciale dieren zijn in tegenstelling tot alle andere diepzeedieren dus onafhankelijk van zonlicht en van de primaire productie in de bovenste waterlagen door middel van fotosynthese.

Het eerste leven op aarde kon pas ontstaan nadat de aarde genoeg was afgekoeld, zodat de waterdamp kon condenseren om oceanen te vormen. Omdat er zich nog geen zuurstof in de atmosfeer bevond denkt men dat uitgerekend de onderzeese



Een *black smoker* op de bodem van de oceaan.

hete bronnen het perfecte milieu vormden voor het ontstaan van het eerste leven op aarde. De ontdekking van *Archaea*, net als bacteriën een speciale groep van prokaryoten, die onder zeer barre omstandigheden kunnen overleven, heeft die opvatting versterkt.

Hoge biodiversiteit

Al leven er bijzondere dieren in de diepzee, zoals pissebedden die zo groot zijn als je hand, toch neemt de biomassa van de fauna met toenemende diepte duidelijk af. Dat komt omdat ze praktisch allemaal afhankelijk zijn van de regen van organisch materiaal dat door algjes in de verlichte zone van de oceaan via fotosynthese wordt geproduceerd. Een deel daarvan zakt na afsterven langzaam naar de bodem. Naar schatting bereikt slecht 1% van dat organische materiaal uit de bovenste 200 meter uiteindelijk de bodem van de diepzee. Hoe dieper je komt, hoe minder voedsel er dus beschikbaar is. Het is daarom des te verrassender dat de biodiversiteit in de diepzee bij zo'n lage temperatuur en het gebrek aan variatie in de bodem nog zo hoog is.

Uit de nu bekende informatie blijkt dat het aantal soorten met de diepte toeneemt tot ongeveer 2.000 meter. Vanaf die diepte naar beneden neemt de variatie weer af. Er zijn verschillende verklaringen geopperd voor dit op het eerste gezicht vreemde verschijnsel. Eén ervan is dat de diepzee omgeving zo uniform en stabiel is dat ook de soortensamenstelling heel stabiel, en daarmee beperkt is. De kleinste verandering, zoals een heuveltje dat door een borstelworm is opgeworpen, zou meteen al een aparte niche kunnen worden voor andere dieren. Een andere theorie stelt dat de diepzee zo enorm uitgestrekt is dat als een soort zich eenmaal heeft aangepast aan deze omgeving en zich heeft verspreid over dit enorme oppervlak, de kans heel klein is dat zo'n soort nog zal uitsterven. Je moet wel steeds in je achterhoofd houden dat al onze gedetailleerde kennis van de fauna is gebaseerd op onderzoek van maar een piepklein deel van de diepzeebodem, misschien maar een aantal voetbalvelden groot. Het onderzoek in de diepzee heeft dus nog heel veel te ontdekken.

Mariene virussen

■ PROFESSOR CORINA BRUSSAARD

Binnen het leven op aarde vormen virussen een buitencategorie. Het zijn geen planten, het zijn geen dieren, strikt genomen zijn het niet eens levende organismen. Ze zijn voor hun voortplanting en voortbestaan immers afhankelijk van andere organismen. Toch vormen virussen wel degelijk een sleutelfactor in de ecologie onder water en ook in het ontstaan van biodiversiteit.

In de zeeën en oceanen hebben virussen het voor een belangrijk deel gemunt op de primaire producenten: de eencellige planktonsoorten. Eerder dan bijvoorbeeld hogere planten sterven die door een virusinfectie. Daardoor zorgen virussen voor een snellere kringloop van nutriënten uit stervende algen. Door de continue dreiging van virusinfecties is er ook steeds een reden voor

De Pelagia, het onderzoeksschip van het NIOZ dat voor al het Nederlands zee- en oceaanonderzoek wordt gebruikt.



onderwaterorganismen om zich aan te passen. Daarmee zijn virussen ook motoren achter de evolutie.

Veel virussen

Zoals zoveel over de oceanen op aarde nog onbekend is, weten we ook over virussen in de zee nog maar het topje van de ijsberg. De mariene virussen zijn in ieder geval met velen: per glas zeewater zo'n 150 tot 3.000 miljoen 'individuen'. Ondanks dat ze heel klein zijn – gemiddeld 50 nanometer, oftewel 50 miljoenste millimeter – bevatten alle virussen in de oceanen tezamen meer organische koolstof dan 75 miljoen blauwe vinvissen.

Net als op land, zijn virussen in zee parasieten: ze hebben een gastheer nodig om zich te vermenvuldigen. Virussen zijn immers niets meer dan stukjes genetisch materiaal (DNA of RNA) die bij elkaar worden gehouden door een omhulsel van eiwit en soms nog een extra membraan (envelop). Ze zijn in zee met zo velen omdat hun gastheren niet alleen zeehonden of vissen zijn, maar ook de eencellige micro-organismen, zoals algen of cyanobacteriën. Deze microben staan aan de basis van de voedselketen, spelen een essentiële rol in de kringlopen van elementen als koolstof, stikstof en fosfaat, en vormen tezamen meer dan 97% van de biomassa in de oceanen.

Elke seconde vinden er in zee ongeveer 100.000.000.000.000.000.000.000 (10^{23}) virusinfecties plaats. Omdat de gastheren in de meeste gevallen maar één cel groot zijn, is ziekte een relatief begrip. De gastheer sterft meestal binnen een uur tot hooguit een paar dagen.

Uit de cel gebarsten

Virussen kennen verschillende levenscycli. De lytische en de lysogene cyclus zijn de bekendste. De lytische virussen infecteren hun gastheer, brengen daarbij hun genetisch materiaal in de gastheercel, die daarop wordt aangezet tot vermeerdering van

de virussen. Op een gegeven moment barsten die letterlijk uit de gastheer: de zogenoemde lysis. Als ze daarbij vrijkomen in het omringende water kunnen ze weer andere gastheercellen infecteren.

De lysogene virussen bouwen hun eigen genetisch materiaal in het DNA van de gastheer en delen vervolgens in hetzelfde tempo als de gastheer. Pas na een specifieke impuls worden de ‘pro-

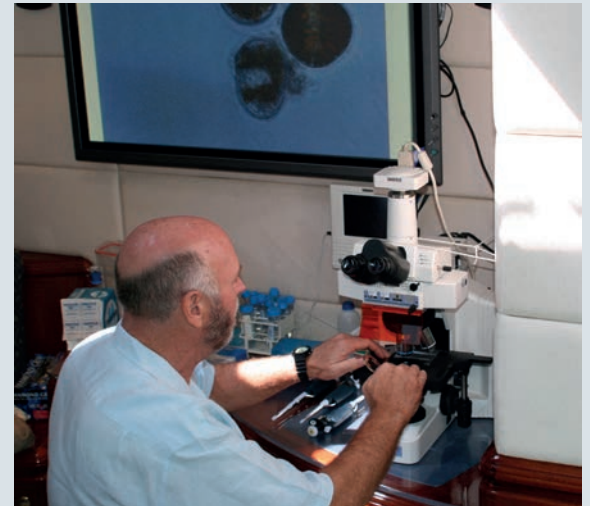
virussen’ in de gastheer aangezet om een lytische cyclus te starten.

Uit onderzoek op zee blijkt dat lysogenie een goede strategie is om magere tijden uit te zitten, bijvoorbeeld als de gastheer niet genoeg voedsel heeft of in lage aantallen aanwezig is. Immers, de nieuwe virussen worden alleen gemaakt bij de gratie van de stofwisseling van de gastheer. En

Het DNA van de oceaan

In 2004 presenteerde de Amerikaanse bioloog en biotechnologie-pionier Craig Venter een radicaal nieuwe benadering in het DNA-onderzoek. Tot dan toe had de genoombiologie zich geconcentreerd op het uitlezen van het genoom van één dier-, plant-, of bacteriesoort. Nu stortte Venter zich met zijn team op het genoom van het milieu. Hij voer met zijn zeiljacht *Sorcerer II* naar de Sargassozee en nam monsters van een paar honderd liter zeewater, waaruit hij DNA isoleerde dat lukraak in talloze kleine stukjes uitgelezen werd. De benadering werd snel bekend als metagenomica: het bekijken van het DNA van een hele levensgemeenschap tegelijkertijd, zonder je druk te maken over de vraag uit welke

organismen dat DNA afkomstig is. De benadering van de metagenomica kreeg in 2009 een nieuwe impuls met de introductie van de nieuwste biotechnologische methodes en DNA-machines die met zo’n onvoorstelbare snelheid en capaciteit DNA kunnen uitlezen dat het mogelijk werd om ook van complexe levensgemeenschappen een groot deel in beeld te brengen. Venter is na zijn analyse van het DNA van de Sargassozee met zijn schip de *Sorcerer II* verder de wereld over gaan varen in een expeditie die bekend is geworden als de *Global Ocean Survey*. Uit de analyse van de talloze DNA monsters zijn verschillende nieuwe inzichten ontstaan. Zo bleken Archaea (oerbac-



Craig Venter aan boord van zijn onderzoeksjacht *Sorcerer II*.

teriën) te beschikken over het cruciale gen dat nodig is om ammonium te oxideren tot nitraat. Tot dan toe was dit alleen bekend van een aantal bacteriesoorten. Ook bleken virussen een belangrijk reservoir te zijn van genetische informatie voor het plankton van

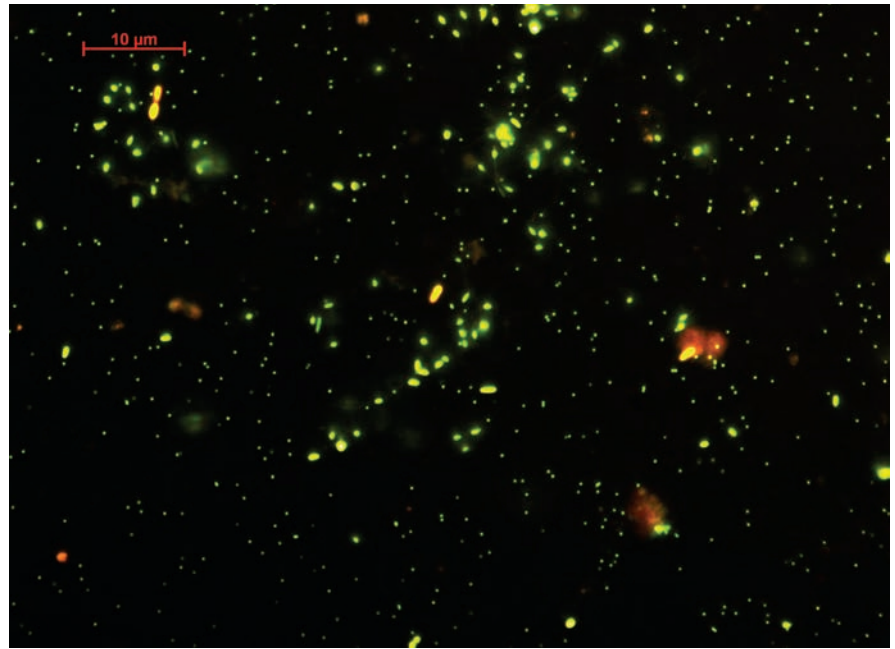
de oceaan. Terwijl voor dieren de opbrengstcurve van het DNA-onderzoek alweer aan het afvlakken is, blijkt de oceaan nog bij elke nieuwe DNA-analyse nieuwe genen op te leveren. Daar is het einde nog niet in zicht.

virus en gastheer ontmoeten elkaar bij gebrek aan zwemvermogen alleen bij toeval, dus hoe meer er zijn, hoe beter de kans elkaar tegen te komen. De open oceaan heeft over het algemeen erg lage concentraties voedingsstoffen. Lysogenie is daar dan ook de belangrijkste virale strategie.

Biodiversiteit

Mariene virussen zijn wel met velen, maar ze kunnen niet allemaal alles en iedereen infecteren. De meeste virussen kunnen maar één soort infecteren, soms zelfs alleen één specifieke ondersoort. Dit komt omdat de eencellige gastheer er natuurlijk alles aan doet om niet geïnfecteerd te raken. Er is een constante wedloop tussen de gastheer die probeert resistent te worden tegen virusinfectie en het virus dat zich aanpast om de gastheer wél weer te infecteren. Afhankelijk van de gastheer, de virussoort en de omstandigheden kan dit proces heel langzaam, maar ook heel snel gaan. Hierdoor spelen virussen een belangrijke rol in het ontstaan en vergroten van biodiversiteit. Ze stimuleren niet alleen soortenrijkdom maar sturen ook de aantallen exemplaren van elke (onder)soort.

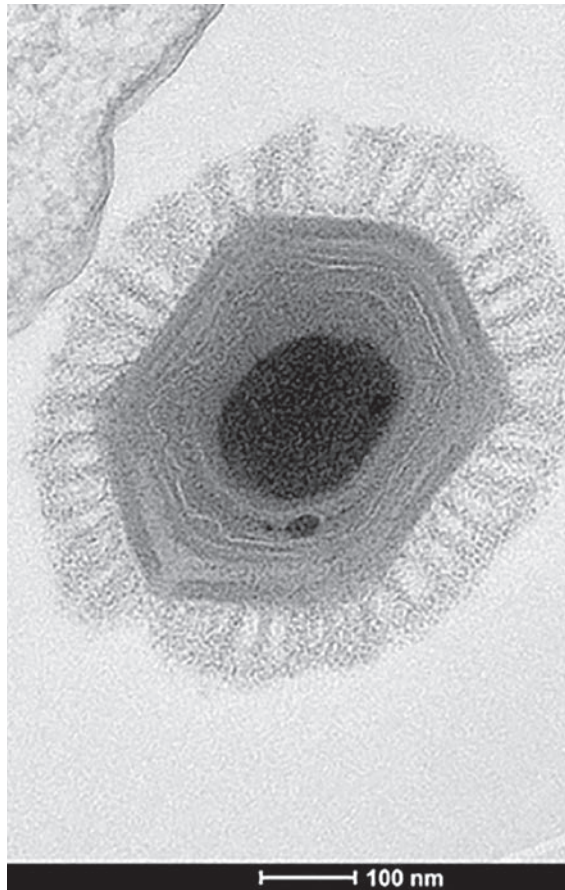
Als een bepaalde soort gastheer een hoge efficiëntie heeft voor het opnemen van voedingsstoffen, zal die het beter doen dan de concurrent en kan de soort tot bloei komen. Door die verhoogde aantallen kunnen de virussen zich vervolgens ook makkelijker verspreiden. Daarmee decimeren ze de gastheerpopulatie, net als bij een epidemie. Door toedoen van deze verhoogde virusactiviteit overleven nu juist de concurrerende soorten of de soortgenoten die resistent zijn geworden voor het betreffende virus. Zo kan het dus zijn dat de soorten die in lage aantallen gevonden worden in de zee toch de efficiënte groeiers zijn, maar dat ze in toom gehouden worden door virale lysis. Hun gevoeligheid voor virusinfecties en mogelijk ook begrazing zorgt er dan voor dat de hoge productie gelijk verloren gaat.



Virussen (kleine groene stipjes), bacteriën (grotere groene vlekjes) en fytoplankton (rode vlekken) in een druppel zeewater.

Virussen beïnvloeden ook de genetische diversiteit. Tijdens de virale levenscyclus wordt er vaak genetische materiaal uitgewisseld tussen gastheer en virus, de zogenoemde horizontale genoverdracht. Zo'n overspringend stukje DNA kan voordeel opleveren voor gastheer of virus. Zo zijn er virussen die, ondanks dat ze geen eigen metabolisme hebben, toch de genen bij zich dragen die een deel van de fotosynthese kunnen uitvoeren. Het blijkt dat deze genen ook daadwerkelijk tot expressie worden gebracht wanneer de virussen de gastheren *Synechococcus* en *Prochlorococcus* infecteren. Beiden zijn de meest voorkomende cyanobacteriën die fotoautotroof leven in de oceaan: ze gebruiken zonlicht voor hun energievoorziening. Wanneer die cyanobacteriën worden geïnfecteerd met een virus dat fotosynthesegenen in zich draagt, kan het virus dus de fitness van de gastheer verhogen, en daarmee ook de productie van de eigen virusnakomelingen.

Het mariene reuzenvirus *Megavirus chilensis* heeft haarachtige draden aan de buitenkant.



Reuzenvirussen

Het genetisch materiaal van virussen bestaat uit dubbele of enkele strengen, DNA of RNA, lineair of cirkelvormig, heel lang (200 duizend baseparen) of juist heel kort (4 baseparen). Ook mariene virussen zijn er in vele vormen en maten. Recent zijn er zelfs extreem grote virussen geïsoleerd met een uitzonderlijke hoeveelheid genetisch materiaal: een genoom van meer dan 1 miljoen baseparen. Virussen met zo veel genen, waaronder ook genen die normaal alleen in 'gewone' organismen worden gevonden, zijn heel interessant voor evolutievraagstukken. En niet alleen deze mariene reuzenvirussen zijn interessant. Door gebruik van

de recente ontwikkelingen in moleculaire technieken krijgen we langzaam meer inzicht in wat er zich nog meer in het zoute water bevindt. Tot voor kort onbekende families van bijvoorbeeld hele kleine RNA virussen, gemiddeld 8 duizend baseparen groot, zijn ontdekt door middel van metagenomic sequencing (zie kader op p. 50). Dit soort studies laat ook zien dat deze RNA-virussen op nog geen enkel bekend RNA-virus lijken. Voor een deel komt dat doordat we gewoon nog niet genoeg weten van RNA-virussen, maar voor een ander deel ook zeker omdat het geheel nieuwe families betreft. De genetische diversiteit van virussen blijkt onvoorstelbaar groot en wordt momenteel geschat op enkele honderdduizenden verschillende genotypen. Het overgrote deel daarvan is nog onbekend.

De virusdeeltjes zelf kunnen er ook heel verschillend uitzien. Zo zijn veel van de virussen die algen infecteren hexagonaal van vorm. De meeste bacteriovirussen (fagen) hebben ook een soort 'staart' waarmee ze hun genetisch materiaal in de gastheer kunnen injecteren. De lengte van deze staart kan variëren van een enkele tot een paar honderd nanometer. De virussen die de zogenoemde archaea infecteren (een van de domeinen van leven, naast bacteriën en eukaryoten) hebben juist heel andere vormen. Van archaea wordt verondersteld dat ze zijn aangepast aan stressvolle omstandigheden en daardoor succesvol zijn in meer extreme omgevingen, zoals de diepzee, of heetwaterbronnen. Er zijn spoel-, limoen-, druppelvormige en lineaire archaeovirussen gevonden, maar niet allemaal in zeewater. Het mariene reuzenvirus *Megavirus chilensis* heeft zelfs haarachtige draden aan de buitenkant zitten, zie de foto hiernaast. Het zou kunnen dat het virus zich daarmee groter voordoet (700 nanometer) en zich zo vermomt als een goede prooi voor een bacterie. Daarmee zou hij makkelijk zijn gastheer binnengaan.

Om vragen over de interactie tussen virus en gastheer onder verschillende omstandigheden goed te kunnen beantwoorden is het nodig om gastheer-virus modelsystemen in het laboratorium in cultuur te krijgen. Daarvoor moeten beide geïsoleerd worden en dat valt niet altijd mee. De

condities waaronder de gastheer groeit zijn nog niet altijd genoeg bekend. Ook willen virussen hun infectiekracht soms verliezen, of de gastheer wordt resistent. Ook in het laboratorium gaat de

wedloop tussen gastheer en virus gewoon door. Maar als het goed gaat kan je inzicht krijgen in hoe de virussen de gastheer infecteren en hoeveel en hoe snel er nieuwe virussen geproduceerd worden. Ook kun je in detail de genetische informatie van het virus onderzoeken en kun je zien hoe succesvol virussen zijn als de gastheer zich moet aanpassen aan veranderende omstandigheden. Daarmee kunnen we dan bijvoorbeeld beter voorspellen wat de effecten kunnen zijn van klimaatverandering.

Ecologisch nut

Door sterfte van de gastheer komen niet alleen de nieuwe virussen vrij, maar ook de celinhoud van de gestorven gastheer. Bacteriën gebruiken deze organische componenten en bij deze afbraak komen ook weer wat elementaire voedingszouten zoals fosfaat en ammonium vrij in de waterkolom. Die kunnen weer door de omringende algen worden gebruikt. Zeker wanneer algen in hun groei beperkt worden door gebrek aan voedingsstoffen, zoals het geval is in de open oceaan, kan deze afbraak van cellen door virussen een belangrijke impuls geven aan de groei van andere cellen. Op de schaal van het complete ecosysteem hebben virussen dus ook zeker een positief effect. Zij sti-

muleren de kringloop van elementen. De manier waarop organismen in zee sterven is van groot belang voor het functioneren van het voedselweb en daarmee de draagkracht van het complete ecosysteem. Traditioneel werd begrazing van eencellige algen en cyanobacteriën door zoöplankton gezien als de belangrijkste verliesfactor. Daarbij vormt de een de prooi voor de ander en loopt de stroom van organische koolstof (biomassa) naar hogere trofische niveaus om te eindigen bij de top-predator. Inmiddels is sterfte door virale infecties een belangrijk onderdeel geworden van de theoretische modellen, en is de rol van grazers in de modellen afgenomen.

Virussen zorgen voor recycling en soortvorming

Oases in de diepzee

■ DR. FURU MIENIS

BIJ KORAAL denk je al snel aan kleurrijke tropische riffen, zoals het Groot Barrièrerif. Soortgelijke riffen worden ook gebouwd door koudwaterkoralen. Met dank aan de snelle ontwikkelingen op het gebied van de onderwatertechnologie weten we nu dat die koudwaterkoralen wereldwijd voorkomen in de koude, donkere delen van de oceaan. Ze groeien vooral op continentale hellingen, op zogenoemde *seamounts* en op andere verticale structuren, zoals bijvoorbeeld de poten van boorplatformen. De meeste koudwaterkoralen leven tussen de 400 en 1.000 m waterdiepte bij een temperatuur van ongeveer 4 tot 12 graden. Net als tropische koralen vormen koudwaterkoralen riffen die kilometers lang en breed kunnen worden. Het grootste levende koudwaterrif is te vinden voor de kust van Noorwegen. Ook ten noordwesten van Ierland, in de Golf van Mexico, langs de Amerikaanse oostkust en zelfs in de Arctische gebieden zijn koudwaterkoraalriffen ontdekt.

Koudwaterkoralen vormen net als tropische koralen een driedimensionale structuur, die door vele andere diersoorten wordt gebruikt als stabiel substraat, schuilplaats of kraamkamer. Daarom worden koudwaterkoraalriffen gezien als oases van biodiversiteit en vooral van biomassa. Tot nu toe zijn er meer dan 1.300 diersoorten gevonden op levende koudwaterkoraalriffen in de Atlantische Oceaan.

Het grootste verschil tussen tropische en koudwaterkoralen is dat de laatste onafhankelijk kunnen leven van licht. Voor hun voedsel zijn ze afhankelijk van primaire productiviteit aan het

wateroppervlak. Koudwaterkoralen hebben geen symbiotische algen in hun weefsel, maar vangen met hun tentakels voedseldeeltjes uit de waterkolom. Aanvankelijk werd gedacht dat koudwaterkoralen vooral talrijk zijn op plaatsen waar methaangas uit de zeebodem ontsnapt, waarbij de koralen zouden leven van de bacteriële activiteit die te vinden is rond zo'n gasbron. Maar onderzoek aan de isotopensamenstelling van koralen heeft aangetoond dat ze onafhankelijk leven van gas. Ze blijken vooral afhankelijk van organische koolstof uit de bovenste waterlagen. Het voedsel van de koudwaterkoralen bestaat voornamelijk uit resten van plantaardige algen, of uit zoöplankton.

Het aantal organismen per vierkante meter op de koudwaterkoraalriffen is veel hoger dan op de naastgelegen zeebodem. Die hogere biomassa vereist ook een verhoogde aanvoer van voedseldeeltjes. De mechanismes die zorgen voor het transport van voedsel vanaf het wateroppervlak naar de bodem zijn bepalend voor het succes van de koralen. De afgelopen jaren is er door medewerkers van het NIOZ veel onderzoek gedaan met behulp van zogenoemde bodemlanders. Dat zijn instrumenten die voor lange tijd de veranderingen in de omgevingsfactoren, zoals temperatuur, zoutgehalte, stroomsnelheid en de hoeveelheid deeltjes in de waterkolom kunnen meten.

Turbulent milieu

Koudwaterkoralen blijken vooral voor te komen op plekken waar het water zeer turbulent is. Zo zijn er tot tweehonderd meter hoge interne golven gemeten in een koraalgebied op 450 kilometer



Onderzoekers aan boord van de Pelagia bekijken monsters van een koudwater koraalrif.

ten westen van Groot-Brittannië, de Rockall Bank. Op een diepte van 600 tot 1.000 meter gaan deze golven gepaard met hoge stroomsnelheden. De turbulentie die daardoor wordt veroorzaakt is vergelijkbaar met de energie die aanwezig is in een ondiepe zee. Daarnaast zorgt deze golfbeweging voor een dagelijkse temperatuursverandering van ongeveer 3 graden. Nog extremere temperatuurvariaties zijn gemeten in een koraalgebied voor de kust van North Carolina. Door het meanderen van de Golfstroom in en uit het koraalgebied werden hier temperatuursveranderingen gemeten van wel 10 graden binnen één dag. Het lijkt er dus op dat koudwaterkoralen veel beter bestand zijn tegen veranderende omgevingsomstandigheden dan tropische koralen.

Op de Ierse continentale helling hebben de koudwaterkoralen kilometers lange, brede en tot wel 360 meter hoge heuvels gevormd. Deze heuvels zijn gedurende de afgelopen 1,5 miljoen jaar gebouwd en bestaan helemaal uit koudwaterko-

raaltakken en sediment dat daartussen is gevallen. De koraalriffen functioneren dus eigenlijk als een soort sedimentval. Omdat de koudwaterkoralen voorkomen op dieptes in de oceanen waar weinig of geen sedimentatie plaats vindt, vormen deze riffen ook een perfect 'archief' om het paleoklimaat te reconstrueren. Zo blijkt dat de koralen bij Ierland voornamelijk groeiden tijdens warme periodes en helemaal afwezig waren tijdens ijstijden. Het bovenste deel van deze riffen is dus pas na de laatste ijstijd aangegroeid en is daarmee niet ouder dan 11.000 jaar. In de Golf van Cadix voor de kust van Marokko is dit proces precies omgekeerd. Hier komen de levende koralen voor tijdens glacialen en zijn ze op dit moment afwezig. Ook dit patroon valt te verklaren met de aan en afwezigheid van voldoende voedsel. Het is waarschijnlijk dat tijdens ijstijden de productiviteit aan het wateroppervlak in de Golf van Cadix veel hoger was dan nu, terwijl voor de Rockall Bank precies het omgekeerde geldt.

Koudwaterkoraalriffen zijn vanwege de relatief hoge dichtheid aan organismen, hun hoge biomassa en hun structuur belangrijk voor vissen. Door bodemvisserij, die tegenwoordig al diepten bereikt van 1.500 meter, is een aantal van deze breekbare riffen beschadigd of zelfs vernietigd. Inmiddels worden de belangrijkste riffen nationaal dan wel internationaal beschermd. Dat wil zeggen: voor zover ze zijn ontdekt.



De zeeën en oceanen staan bloot aan bedreigingen die zeer divers zijn van aard, omvang en oorsprong. We belichten hier drie voorbeelden: visserij, vervuiling met plastic en mijnbouw.

BEDREIGINGEN VAN ZO'N ENORM deel van het aardoppervlak als de oceaan vallen pas op als ze zelf ook immens zijn. De beelden van vervuilde kusten na scheepsrampen zoals die met de Torrey Canyon bij Cornwall (1967), de Amoco Cadiz bij Bretagne (1978), de Exxon Valdez bij Alaska (1989), of van recenter datum de explosie op het boorplatform Deepwater Horizon in de Golf van Mexico (2010) staan velen nog helder voor de geest. Toch zijn de vele kleine, sluipende bedreigingen per saldo groter. Dat gold lange tijd zelfs voor olievervuiling. Uit inventarisaties van de Nederlandse Zeevogelgroep blijkt dat er tot vrij recent, dag in dag uit vogels aanspoelen op het strand met stookolie op hun veren. Al die kleine beetjes samen hadden meer impact op het zeeleven dan die incidentele spectaculaire vervuilingen.

Dat probleem van incidentele vervuiling via bijvoorbeeld het lozen van zogenoemd bilgewater uit de machinekamers van schepen, is door strengere controles en technische maatregelen voor een groot deel aangepakt. Voor veel andere activiteiten op zee lijkt nog steeds te gelden dat de enorme omvang roekeloos maakt. Zó veel water, zó veel oppervlak, zó veel vis ... waar maken we ons druk om?

Toch blijkt dat bijvoorbeeld door grootschalige visserij zelfs de meest omvangrijke visbestanden uitgeput kunnen worden. Een voorbeeld is de vangst van ansjovis voor de kust van Peru (zie ook p 12). Toen het visbestand door schommelingen in het klimaat in 1972 sterk afnam, en de vissers toch hun jaarlijkse vangst op peil wilden houden, stortte het bestand voor lange tijd in.

Een bedreiging van heel andere aard is de vervuiling met plastic. De wind en de rivieren brengen enorme hoeveelheden plastic van het land in de oceaan. Daar hebben zich spreekwoordelijke vuilnisbelten gevormd, waar per vierkante meter oceaan meer plastic dan plankton te vinden is.

Een bedreiging van recenter aard schuilt in de diepzeemijnbouw. Dankzij de voortgang van de techniek kunnen we nu bronnen van schaarse mineralen aanboren die voorheen onbereikbaar waren. Wat doet dit met het onderwatermilieu?

Visserij

■ PROFESSOR HAN LINDEBOOM

Al sinds mensenheugenis halen we vissen, week-, schaal- en schelpdieren uit zowel het zoete als het zoute water. Er zijn zelfs theorieën die stellen dat wij de ontwikkeling van ons brein – op zijn minst gedeeltelijk – te danken hebben aan de consumptie van bepaalde vetzuren die in schelpdieren voorkomen.

Er bestaan verschillende vormen van visserij. Vissen en inktvissen die zich in de waterfase bewegen worden gevangen door grote sleepnetten door het water te trekken, de zogenoemde pelagische trawls. Ook worden drijfnetten in het water te hangen, of lange lijnen met haken en aas achter schepen aan getrokken of in het water gehangen. Vissen en schaal- en schelpdieren op de bodem worden gevangen met ‘getrokken vistuigen’ zoals (boom)korren, bordentrawls, vislijnen met haken of met vallen waar aas in zit.

Visserij heeft verschillende effecten. Allereerst worden natuurlijk de doelsoorten gevangen en gedood. Dit leidt tot veranderingen in de populaties waarbij met name de oude en grote vissen zeldzaam worden of geheel verdwijnen. Daarnaast is er bijvangst van andere dieren die ook vaak worden gedood. Voorbeelden zijn zeezoogdieren en vogels die in netten verdrinken of aan de lange vislijnen worden gevangen. Ook de vangst van te kleine, zogenoemde ondermaatse vis, niet doelsoorten en ongewervelde organismen kan leiden

tot afname van die soorten. Verder heeft bodemvisserij effecten op het bodemleven en op de bodemstructuur.

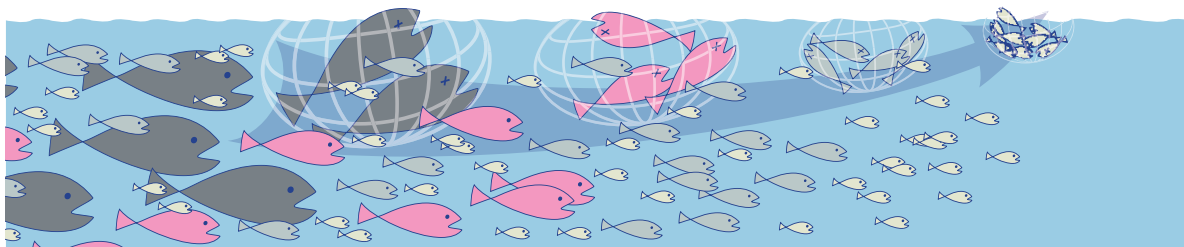
Tegelijk kan overboord gezette bijvangst ook een bron zijn van voedsel voor bijvoorbeeld zeevogels. Voor de Noordzee is ooit geschat dat ongeveer één miljoen vogels op het totaal van ongeveer 10 miljoen bestaat bij de gratie van deze door de mens gecreëerde extra voedselbron.

Bij overbevissing wordt er zoveel vis uit een bepaald gebied weggevangen dat het aantal sterk terugloopt en de soort soms zelfs geheel uit een gebied kan verdwijnen. Als de grote vissen verdwenen zijn verschuift de visserij vaak naar de kleinere soorten. De vermaarde Franse visserijbioloog Daniel Pauly heeft dit ooit op de kaart gezet als ‘*fishing down the food web*’. Zijn concept is recentelijk echter onder vuur komen te liggen, omdat ook sommige lager in het voedselweb voorkomende soorten die veel geld opbrengen direct worden bevestigd. Toch zijn er voldoende voorbeelden waarin Pauly’s concept wél opgaat. Dit geldt ook voor de Noordzee waar de gevangen vissen, bijvoorbeeld kabeljauw, vroeger veel groter waren. Ook werden hier vroeger heel andere soorten aangeland, zoals grote hoeveelheden roggen. Vaak weten we niet meer hoe het vroeger was en hebben we last van *shifting baselines*.

Shifting baselines

Het begrip *shifting baselines* of ‘veranderende ijkpunten’ wordt beschreven in het boek ‘*The Unnatural History of the Sea*’ van Callum Roberts. Vroeger

Door *fishing down the foodweb* worden de grote soorten en individuen langzaam uit het ecosysteem verwijderd.





In de Noordzee werkten
ooit ook tonijnvisser.

zag het leven in de zee er heel anders uit en we zijn vergeten hoe dat was. In ons deel van de Noordzee zwommen voor een groot deel kraakbeenvissen als roggen en haaien. Grote delen van het continentaal plat onder de Noordzee waren bedekt met platte oesters, er waren paardenmosselbedden en de meeste vissen werden veel groter en ouder. Zo zwommen er tot ongeveer 1960 in de Noordzee zelfs blauwvintonijnen die wel zes meter lang waren! Hoewel ook andere factoren zoals klimaatverandering een rol kunnen spelen, is overbevissing toch de meest waarschijnlijke oorzaak van deze veranderingen.

Een ander voorbeeld van de veranderende ijkpunten zijn de enorme oesterbanken in de Noordzee. Uit de Visatlas van Olsen uit 1883 blijkt dat er aan het eind van de negentiende eeuw zo'n 20.000 vierkante kilometer van de Noordzeewebodem bedekt was met oesters. De helft daarvan lag in

het Nederlandse deel. Door overbevissing, veranderende zeestromen en mogelijk ziekten, zijn al die oesters volledig verdwenen. Alleen de naam Oestergronden herinnert hier nog aan.

Klimaat of visserij?

De hoeveelheden vis in zee zijn zeer veranderlijk. Vaak krijgt de mens de schuld als vissen verdwijnen, maar dit is niet altijd terecht. Veranderend klimaat en veranderende zeestromingen hebben ook grote effecten, zowel op de visproductie als op de locatie waar ze voorkomen. Tussen de twaalfde en de zestiende eeuw was de haringvisserij een belangrijke economische pijler onder de welvaart rond de Noordzee. Het Hanzeverbond steunde er op. Maar de haringpopulaties zaten lang niet altijd op dezelfde plaats en daarmee ook niet altijd in de invloedzone van hetzelfde land. Dit leidde regelmatig tot conflicten en zelfs oorlogen.

Deze grootschalige verschuivingen hangen vaak samen met temperatuurschommelingen. Ook in onze tijd zien we zulke schommelingen. Die worden wel *regime shifts* genoemd. Zo verdwenen rond 1990 de platvissen uit de Waddenzee en zagen we soortverschuivingen in de Noordzee terwijl de kabeljauwstand bij de Verenigde Staten en Canada instortte. Het gelijktijdig voorkomen van dit soort veranderingen wijst op grootschalige invloeden. Het gegeven dat rond 1990 ook de temperatuur een sprong maakte, wijst op een duidelijke invloed van het klimaat. Dit leidt er toe dat vispopulaties soms sterk toenemen of juist sterk dalen. In dat laatste geval gaat het vaak mis omdat de visserij dezelfde hoeveelheden wil blijven vangen en dus een tandje bij zet. Op zo'n moment dreigt juist nog meer overbevissing. Duurzame visserij moet dan ook rekening houden met de natuurlijke variaties van het systeem.

Visserij in de oceaan

Ook in de oceaan zijn er problemen met de visserij die extra lastig zijn omdat het internationale wateren betreft waar afspraken en regelingen moeilijker zijn te implementeren. Met grote netten en lange behaakte lijnen worden veel vissen en inktvissen gevangen. Voor sommige soorten zoals tonijnen, zwaardvissen en grote haaien heeft dit tot enorme afname in de populaties geleid. Ook wordt er meer en meer met trawls op de oceaانبodem gevestigd, tot grote diepte. Op diverse plaatsen op die bodem worden zogenaamde koudwaterkoralen gevonden (zie p 54). De trawlvisserij is funest voor deze fragiele organismen die er duizenden jaren over hebben gedaan om riffen te vormen. Ook halen vissers er soorten uit die heel oud kunnen worden, zoals de keizerbaars of de oranje zaagbuikvis, waarvan exemplaren bekend zijn van 149 jaar oud. Als we op dezelfde manier blijven vissen als nu zullen er weinig van deze oude soorten overblijven.

Inmiddels zijn er internationale verdragen waarin delen van de oceaانبodem worden beschermd via een verbod op het trawlen. Bekende voorbeelden zijn onderzeese bergen en vulkanen met een zeer rijk bodemleven vol koralen en sponsvelden. De bescherming wordt beter, maar is vaak moeilijk te controleren. Er zijn nog vele gebieden waar het beter kan en moet.

Duurzame visserij

De dalende visbestanden zijn al lange tijd aanleiding voor beschermingsmaatregelen. Zo zijn er quota en minimum aanlandingsmaten voor vele soorten. Op geregelde tijden, meestal jaarlijks, wordt door visserijbiologen vastgesteld hoe groot de populaties zijn en hoe die qua grootte en leeftijd zijn opgebouwd. Deze gegevens worden verwerkt tot een vangstadvisie dat door de internationale politiek in te vangen quota wordt omgezet. Tegenwoordig is daarbij het streven om zoveel mogelijk uit te gaan van de maximale duurzame opbrengst, de *Maximum Sustainable Yield*, MSY. Voor een aantal soorten, zoals schol in de Noordzee, lijkt dit nu

goed te werken. Toch wordt meer dan de helft van de commerciële soorten in de Noordzee nog niet volgens die MSY bevestigd. De schatting is dat wereldwijd nog steeds zeker een derde van de verhandelde vissoorten wordt overbevestigd.

Niet alleen de ondermaatse vis, ook de overmaatse vis moet je beschermen

Er zijn ook andere vormen van duurzame visserij, waarbij naast een minimum maat ook een maximum maat geldt. In de Verenigde Staten past men dit toe op de lijnvisserij op haaien. De vissers moeten zowel te kleine als te grote exemplaren terugzetten in zee. Op die manier houdt de populatie een meer natuurlijke leeftijdsopbouw.



Voor een écht duurzame visserij moet er ook iets gebeuren aan de neveneffecten, zoals bijvangst van vogels en zeezoogdieren, en schade aan het bodemsysteem. Bijvangst van bijvoorbeeld dolfijnen en bruinvissen in zogenoemde staande wanden kan deels worden voorkomen door het gebruik van ‘pingers’. Dat zijn apparaatjes die een voor deze dieren onaangenaam geluid maken, waardoor ze de netten mijden. Bijvangst van bijvoorbeeld albatrossen is een groot probleem in de lijnvisserij, bijvoorbeeld op inktvissen. Door te zorgen dat deze lijnen zo diep mogelijk blijven en loodrecht naar de boot worden gehaald zijn deze bijvangsten te beperken.

Trawlvisserij met sleepnetten veroorzaakt veel bodemschade. In de Noordzee heeft dit tot grote veranderingen in het bodemleven geleid. Neder-

Industriële visserij legt een grote druk op de visbestanden.

landse vissers werkten eerst ook met bodemtrawls maar sinds circa 1960 is de boomkor het belangrijkste vistuig. Bij die vorm van visserij wordt het sleepnet opgehouden door een ijzeren boom, terwijl voor het net kettingen over de bodem rollen om de tongen en schollen op te schrikken en in het net te jagen. Dit ploegt letterlijk de bodem om en vele hiervoor gevoelige soorten zijn uit het systeem verdwenen.

Sinds kort vissen boomkorvissers men de zogenoemde sumwing. Dat is een soort vliegtuigvleugel die over de bodem zweeft. Door dit te combineren met een pulskor die de vis niet met kettingen maar met stroomstoten opschrikt, wordt de bodemschade minder. Toch worden op de bodem levende dieren ook hiermee nog steeds verstoord en gedood. Om dat te voorkomen is het nodig mariene beschermde gebieden of zeereservaten in te richten, waar de visserij verboden is of op zijn minst zeer streng gereguleerd. In de Noordzee is een aantal van deze gebieden aangewezen, maar omdat die gebieden klein en versnipperd zijn en omdat sommige vormen van visserij wel worden toegestaan is de effectiviteit twijfelachtig.

Wat dat betreft kunnen we iets leren van Australië.

Australië als duurzaam voorbeeld

Rond het Groot Barrièrerif voor de oostkust van Australië is veel onderzoek gedaan waaruit we kunnen leren hoe mariene ecosystemen duurzaam geëxploiteerd en ook beschermd kunnen worden. Al sinds 1975 is dit een beschermd gebied. Het beschermen van alleen de koraalriffen leidde niet tot het beoogde ecosysteemdooel. Vanaf 2004 heeft Australië het beheerregime drastisch aangepakt en de beschermde gebieden vergroot. Nu is minimaal 20% van elk voorkomend habitatype beschermd en heeft elke zone op zee een breedte van op zijn minst twintig kilometer in het smalste deel. Dit heeft geleid tot snelle veranderingen in

voor visserij gesloten gebieden, de zogenoemde *no-take* zones. Daar komen nu hogere aantallen en biomassa's van belangrijke vissoorten voor. Ook zijn de vissen er groter. In de zones die niet alleen voor de visserij maar ook voor alle andere schepen gesloten zijn – de *no-entry* zones – zijn de vis aantallen nog groter zijn en vinden nog meer soorten bescherming. Mogelijk komt dit omdat de visserijdruk in de gesloten zones door stroperij eigenlijk nog steeds hoog is. Dit geeft aan dat goede controle noodzakelijk is. In zones waar simpelweg niemand mag komen is dat makkelijker.

Naast meer en grotere vissen blijkt dat in de volledig beschermde zones het voedselweb natuurlijker is met meer toppredatoren. Ook hebben de *no-take* zones een uitstralend effect naar andere gebieden, bijvoorbeeld omdat grotere vissen meer jongen voortbrengen. Het Groot Barrière-rif leert ook dat alleen *no-take* zones niet genoeg zijn en dat effectief nakomen en handhaving van de regelgeving noodzakelijk is voor échte bescherming van de biodiversiteit. Controle is cruciaal, rechte grenzen, *no-take* zones en *no-go* zones, vergroting van de gebieden, alle biologische kenmerken beschermen en grote aaneengesloten gebieden zijn hier de sleutelbegrippen.

Toekomst mét visserij?

Vis is lekker. Tenminste, dat vinden velen. Het is ontegenzeggelijk ook gezond. Toch zijn veel vormen van visserij nog steeds een vorm van jacht die niet meer van deze tijd is. We moeten over het hele front op een veel duurzamer manier gaan vissen. De visbestanden mogen alleen tot een bepaalde duurzame opbrengst worden bevestigd. We zullen moeten streven naar een natuurlijke opbouw van vispopulaties, inclusief oude en grote exemplaren. Daarvoor moeten we niet alleen minimale maar ook maximale aanlandlengtes vaststellen. We zullen altijd moeten kiezen voor de meest milieuvriendelijke methode van visserij en de echt

schadelijke vormen terugdringen of zelfs helemaal verbieden. Naar Australisch voorbeeld moeten we grote zeereservaten inrichten met zowel *no-take* als *no-go* zones. In die reservaten kan de natuur zich ontwikkelen zoals dat kan zonder een voortdurende visserijdruk op populaties of de leefomgeving.

Het visserijmanagement van de internationale gemeenschap moet uitgaan van een integrale ecosysteem benadering, dus niet alleen naar vissen kijken, maar naar het systeem als geheel. De EU werkt nu al met systeemindicatoren, zoals biodiversiteit, bodemintegriteit en voedselwebben. Hoewel dit nog moeilijk te hanteren begrippen zijn, zullen die wel de maat gaan worden waarlangs we de goede staat van instandhouding van onze zee gaan beoordelen. Dit zal bijdragen tot meer duurzaamheid in de visserij.

De wereldbevolking groeit nog snel en de vraag om gezond voedsel blijft toenemen. De wereldzeeën kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan voedselzekerheid mits de visbestanden duurzaam worden geëxploiteerd met visserijmethoden die een minimale negatieve invloed hebben op het ecosysteem. Mogelijk dat aquacultuur ook in open zee de toekomst wordt, al zitten ook daar nog veel ecologische haken en ogen aan. Op termijn is er een fosfaattekort voor onze voedselproductie. In de diepzee zit veel fosfaat en mogelijk kunnen we die mobiliseren door dit naar boven te halen en voor algen en visproductie te gebruiken.

Er ligt, kortom, een zee aan mogelijkheden, maar om tot echte duurzaamheid te komen is nog veel kennis nodig van het complexe functioneren van het mariene systeem en de invloed van de mens daarop. Ook het wetenschappelijk onderzoek kan daaraan bijdragen. En vervolgens is de uitdaging om het ecologisch wenselijke, juridisch mogelijke en politiek haalbare optimum te vinden.

De plastic soep

■ DR. JAN ANDRIES VAN FRANKEKER

Behalve als 'plastic soep', wordt aan de vervuiling van de wereldzeeën met ronddrijvend afval vaak ook gerefereerd als 'het plastic eiland'. Onder andere in een circulerende stroming in de Stille Oceaan, de *North Pacific Gyre*, zou zich een drijvende vuilnisbelt hebben verzameld ter grootte van meer dan dertig keer het oppervlak van Nederland. Ook in de vier andere grote circulaire stromingen die zich in de oceanen bevinden worden hoge concentraties plastic gevonden.

Zowel 'soep' als 'eiland' doen de werkelijkheid geen recht. Buiten de concentraties van vervuiling op sommige kusten is de hoeveelheid plastic natuurlijk nergens zo dicht dat je erop kan lopen. En zelfs voor een soep is de concentratie op zijn best een heel slap bouillonnetje te noemen. Maar toch: alles is relatief. Amerikaanse onderzoekers

Op de Atol Midway sterven albatrossen met een met plastic gevulde maag.



die in 2001 watermonsters verzamelden in de *North Pacific Gyre* vonden op diverse plekken per oppervlakte-eenheid meer minuscule stukjes plastic dan dierlijk plankton. Zij schatten de hoeveelheid plastic toen op ruim 5 milligram per vierkante meter oceaanoppervlak.

Door de gigantische omvang van de wereldzeeën gaat de totale hoeveelheid plastic in het water hoe dan ook iedere voorstelling te boven. Er doen vele schattingen de ronde, variërend van ruim een miljoen kilo plastic dat ieder uur in het water zou verdwijnen, tot zelfs het tienvoudige daarvan. Wat daarvan de keiharde realiteit is ondervond de Amerikaanse fotograaf Chris Jordan in 2009, bij een expeditie naar de atol Midway, een groepje eilandjes midden in de Stille Oceaan. Daar, op bijna de verst denkbare afstand van alle omringende continenten, fotografeerde hij de lijken van albatrossen. De dieren waren vaak al in een ver gaande staat van ontbinding, waardoor één ding extra opviel: de massa onverteerbaar plastic in hun magen. Van minuscule korreltjes tot complete aanstekers of flessendoppen aan toe. De albatrossen zien rond-drijvend plastic waarschijnlijk direct voor voedsel aan, of krijgen het indirect binnen, via de door hen gevangen vissen. Ook eten ze strenge eieren die vliegende vissen afzetten op drijvend materiaal. Tegenwoordig is dat dus vaak plastic rommel. In de kolonie voeden ze hun jongen met alles wat in hun krop komt. De magen van de kuikens vullen zich daardoor langzaam met het onverteerbare plastic, dat zij soms niet meer uit kunnen braken. Veel kuikens sterven daardoor uiteindelijk met een volledig gevulde maag de hongerdood.

Sluipend probleem

De beelden van Chris Jordan op Midway zijn gruwelijke blikvangers. Net als de vele foto's en films van dolfijnen, walvissen, vogels of schildpadden die in resten van visnetten of ander plastic verstrikt zijn geraakt, zijn ze vermoede-

lijk effectief in het onder de aandacht brengen van het probleem van de vervuiling op zee. Toch raken zelfs die beelden, hoe gruwelijk ook, niet de kern van het probleem. Het probleem van de plasticvervuiling op zee is nog veel sluipender en gemener.

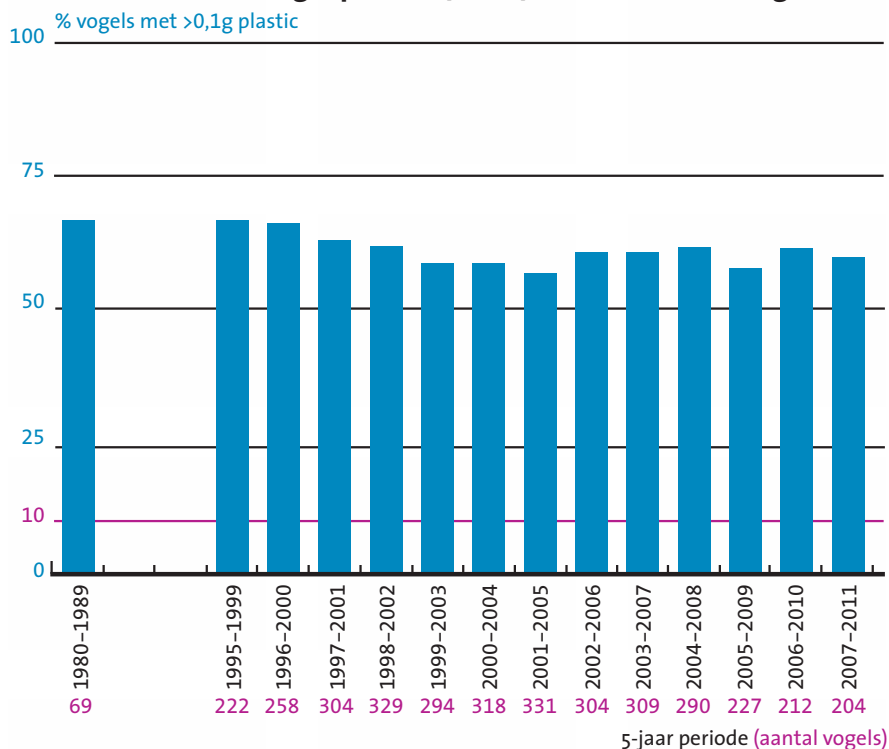
Al sinds 1980 wordt de vervuiling op zee onderzocht via een algemene zeevogel: de noordse stormvogel. Buiten de broedtijd leven noordse stormvogels vrijwel uitsluitend op open zee, waar ze zich voeden met vis en andere dierlijke prooien. Anders dan bijvoorbeeld meeuwen, braken stormvogels onverteerbare voedselresten niet uit. Daardoor verzamelt plastic dat ze opeten – per toeval of per vergissing – zich in hun maag. Pas als het plastic na lange tijd, onder invloed van het zuur en door vermaling in de spiermaag, klein genoeg is geworden kan het passeren naar de darm om te worden uitgepoept.

Waar de kuikens van de albatrossen op Midway een gruwelijke dood sterven, blijft het probleem bij vogels als de noordse stormvogel doorgaans onzichtbaar. Ze gaan er niet per se dood aan, maar hoe groter de hoeveelheid plastic in hun maag, hoe slechter hun conditie. Op die manier trekt de plasticvervuiling een sterke wissel op de conditie van de dieren en daarmee uiteindelijk van hele populaties.

Steekproef tegen wil en dank

Het opeten van plastic is een wijd verbreide vergissing onder zeevogels. Van alle noordse stormvogels op de Noordzee, die dus geen braakballen vormen, heeft zelfs 95% permanent plastic in de maag, gemiddeld 30 grotere of kleinere stukjes. Daarmee zijn noordse stormvogels tegen wil en dank bruikbare 'steekproeven' geworden voor de mate van vervuiling van hun leefgebied. Van jaar op jaar worden stormvogels die dood aanspoelen op de verschillende kusten of die sneuvelen in de netten van vissers verzameld. Vervolgens wordt de hoe-

In Nederland aangespoelde (dode) noordse stormvogels



De hoeveelheid plastic in de magen van noordse stormvogels: aanzienlijk meer dan de streefwaarde van 10%.

veelheid plastic die zich in de maag van de dieren heeft opgehoopt geteld en gewogen.

In de figuur hierboven is te zien dat in de jaren tussen 1980 en 2011 een schommelend percentage van maar liefst 55% tot bijna 70% van alle in Nederland gevonden dode stormvogels meer dan 0,1 gram plastic in de maag heeft. Een gemiddelde maaginhoud van een aangespoelde stormvogel bevat ruim 0,3 gram plastic. Dat lijkt misschien futiel, maar vertaald van een vogel van ongeveer 750 gram naar een mens van 75 kilo betekent dit 30 gram plastic: het gewicht van bijvoorbeeld 6 wegwerp plastic zakjes. Pas als je de verschillende hoeveelheden plastic op die manier vertaalt kun je je een indruk vormen van de ernst van de situatie.

Ecologische en economische schade

De miljoenen die worden besteed om het aangespoelde afval op de kusten op te ruimen, of om in afval vastgelopen scheepsschroeven weer te repareren zijn in principe nog wel te berekenen. De precieze omvang van de ecologische schade door ons plastic afval in de oceanen valt nauwelijks te kwantificeren. Toch hebben de zogenoemde OSPAR-landen rond de Noord-Oost Atlantische kust een concreet doel geformuleerd. Dat doel is gebaseerd op het onderzoek aan de noordse stormvogel: niet meer dan 10% van de dode stormvogels zou meer dan 0,1 gram plastic in hun maag mogen hebben, vinden de politici. De Europese Unie heeft deze meetmethode ook opgenomen in de zogenoemde Kaderrichtlijn Marien. In die richtlijn stelt de EU dat de zee vóór 2020 in een 'goede milieutoestand' moet komen. Of dat betekent dat ten hoogste 10% van de vogels de 0,1 gram plastic in de maag mag overschrijden is nog onderwerp van het politieke debat. Sommige landen vrezen dat zo'n doel te ambitieus is. Een blik op de grafiek op de vorige pagina zou ze daarin wel eens gelijk kunnen geven.

Ook vis en zeehond besmet

Niet alleen stormvogels hebben plastic in hun maag. Ook verschillende vissen nemen minuscule plasticdeeltjes in hun lichaam mee. Onderzoekers van IMARES inventariseerden zeven verschillende soorten vis die op verschillende plaatsen in de Noordzee werden gevangen. Daarbij bleken vijf van de zeven soorten plastic in hun maag te hebben. Bijna 3% van de individuele dieren bevatte plastic. Het zwaarst vervuild waren kabeljauwen die rond het Kanaal waren gevangen. Een derde deel van die vissen bevatte één of meerdere stukjes plastic. Een vergelijkbaar onderzoek onder dode gewone zeehonden liet zien dat 11% van die dieren meetbare hoeveelheden plastic in hun maag had en 1% in de darmen.

Het plastic strand

Wordt de plastic soep in de Stille Oceaan nog comfortabel aan het oog onttrokken, op de Nederlandse stranden is de vervuiling dag in dag uit zichtbaar. Bij een opruimactie op het strand van Texel verzamelde een leger vrijwilligers op het Noordzeestrand maar liefst 30 ton afval, meer dan duizend kilo voor

iedere kilometer strand. De twee grote fracties van die afvalberg waren hout en afval van de visserij, zoals touwen, netten, kratten en jerrycans. In de weken na de grote schoonmaak was goed bij te houden hoeveel vers afval er dagelijks op het strand werd aangevoerd: 6 tot 8 kilogram per kilometer strand per dag!



Statiegeld

Uit het onderzoek aan de gevangen vis in de Noordzee blijkt dat de hoeveelheid plastic afneemt naarmate de vissen verder noordelijk op de Noordzee werden gevangen. Ook een vergelijking van 'noordelijke' en 'zuidelijke' noordse stormvogels vertoont die trend. Bijvoorbeeld rond IJsland hebben de vogels meetbaar minder plastic in hun maag dan op de Noordzee, en in het Canadese poolgebied benaderen de vogels zelfs bijna de streefwaarde van minder dan 10% van de vogels met meer dan 0,1 gram plastic in de maag.

Maatregelen en bewustwording bij zeegebonden activiteiten, zoals scheepvaart, visserij, aquacultuur en offshore industrie kunnen in het Noordzeegebied al een groot verschil maken. Maar in

Stel je voor dat je als mens met zes plastic tasjes in je maag loopt ...

meer algemene zin en op de lange termijn kan alleen een drastische beperking van de hoeveelheid eenmalig gebruikspastic, gecombineerd met een strenge statiegeldheffing soelaas bieden. Zogenaemde *biobased plastics* uit plantaardig

materiaal zijn weliswaar nuttig om het gebruik van fossiele brandstoffen te beperken, maar bieden geen oplossing voor het afvalprobleem. Ook afbreekbare plastics, of die nu uit plantaardige of fossiele grondstoffen worden gemaakt, bieden geen oplossing. Als plastic écht goed biologisch afbreekbaar wordt gemaakt verliest het ook meteen de eigenschappen waar we het om zijn gaan waarderen: licht in gewicht maar toch sterk en duurzaam. En de campagnes met die oranje

plastic poppetjes, de ‘plastic hero’s’, zijn misschien goed voor bewustwording maar gaan eenmalig gebruik en verspilling niet tegen. Bovendien pak je daarmee maar een beperkt deel van het plastic-probleem aan. Want wat doe je bijvoorbeeld met de plastic doppen in een kartonnen melkpak? Over dat soort producten zou de producent eigenlijk een stevige heffing moeten betalen om de maatschappelijke kosten van het afvalprobleem te kunnen vergoeden. Verder zou de overheid met hoge statiegelden de verpakkingindustrie moeten dwingen in de richting van retourneren, hergebruik, en na hergebruik een hoge kwaliteit recycling.

Giftige soep

De vervuiling van de oceanen en zeeën met plastic mag dan misschien niet tot een stevige soep leiden, laat staan tot een eiland, er is toch alle reden om het probleem zeer serieus te nemen. Nog even los van de morele kant van de zaak – wie zijn wij om de zeeën zo te vervuilen? – is er ook wel degelijk een kans dat we de vervuilde soep uiteindelijk op ons eigen bord krijgen. De plastic deeltjes in de magen van vissen zullen ons bord misschien niet direct bereiken en die in de magen van de noordse

The Ocean Cleanup

Veel mensen breken hun hoofd over de mogelijkheden om al het rond-drijvende afval uit de oceanen op te ruimen. De oplossingen variëren van symbolisch, zoals een plastic ‘actiesloep’ die in 2014 werd gebouwd van omgesmolten plastic uit de grachten van Amsterdam, tot een gigantisch

verzamelstation dat op de oceaan kan drijven. Dat laatste idee komt van de Delftse ingenieur Boyan Slat. Inmiddels werkt hij met een groot team aan een haalbaarheidstudie voor zo’n drijvend afvalstation. Met behulp van twee lange armen op het oppervlak van de zee of

oceaan moet zijn ‘Ocean Cleanup’ al het drijvend afval kunnen verzamelen, terwijl het zeeleven vanzelf onder de armen door zweeft. Daarmee is meteen een van de achilleshielen van het project bekend: alleen drijvend afval kan in theorie van het wateroppervlak worden geschrapt. De

praktijk laat evenwel zien dat heel veel plastic op verschillende diepten onder het oppervlak zweeft. Andere uitdagingen voor Slat en collega’s staan beschreven op <http://marinedebris.info/open-ocean-cleanup-guidelines>

stormvogels al helemaal niet, maar ronddrijvend plastic gedraagt zich wél als een spons voor vervuillende stoffen als pcb's of pesticiden. Ook bevatten de plastics zelf schadelijke stoffen, zoals bijvoorbeeld weekmakers en brandvertragers. Terwijl de maag van een stormvogel het plastic langzaam vermaalt worden die stoffen ook in de voedselketen opgenomen.

Vogels met plastic in hun maag fungeren ook als een soort 'afvalverwerkers'. Wanneer de dieren in een gebied komen waar ze nauwelijks nieuw plastic kunnen opeten, zoals rond de Zuidpool, blijkt uit metingen dat hun spiermaag ongeveer driekwart van het plastic vermaalt tot minuscule deeltjes die vervolgens worden uitgepoept. Ook die deeltjes vinden hun weg in de voedselketen. Op die manier krijgen we de plastic soep uiteindelijk toch ook op ons eigen bord. En voor wie dat sluipende gevaar niet proeft, of niet wil zien, zijn er altijd nog de aangrijpende beelden van Chris Jordan van de atol Midway.

Diepzee mijnbouw

■ DR. HENKO DE STIGTER & PROFESSOR GERT-JAN REICHART

In het rijtje potentiële bedreigingen van het oceaanmilieu is diepzeemijnbouw een relatieve nieuwkomer. De bodem van de diepe oceaanbekkens, aan het zicht onttrokken door kilometers oceaanwater, is tot op heden een vrijwel ongerept natuurgebied dat zich van pool tot pool over alle oceanen uitstrekt. De diepzeebodem ligt buiten het technische werkbereik van visserij en offshore olie- en gaswinning, en is daarom ook niet economisch interessant voor deze bedrijfstakken. Afgezien van het nodige zwerfafval, scheepswrakken, intercontinentale telecommunicatiekabels, en sporen van wetenschappelijke bemonstering is de fysieke impact van menselijke activiteit in dit gebied tot nu toe gering. Dit beeld zal mogelijk ingrijpend veranderen nu de mijnbouwindustrie in hard tempo aan het warmlopen is voor ontginning van verschillende delfstoffen uit de diepzee.

Verkenning van de oceaanbodem

Al zolang mensen de oceanen bevaren hebben zij gespeculeerd over de schatten die ver buiten hun bereik op de bodem van de oceaan liggen. Volgens oude zeekaarten werden die schatten bewaakt door watergeesten en zeemonsters. Het was pas in de eeuw van het rationalisme en de opkomende industrialisatie dat koloniale grootmachten wetenschappelijke expedities uitstuurden om ook de bodem van de oceanen te verkennen.

Tijdens de al vaker vermelde Challengerexpeditie (1874-1876) kwamen de eerste aanwijzingen naar boven voor centimeters grote bruinzwarte knollen op de diepe zeebodem. Die bleken opgebouwd uit flinterdunne concentrische laagjes mangaanhydroxide. Deze mangaanknollen waren gevormd door het neerslaan van in het diepzeewater opgelost mangaan. Het zou nog bijna een eeuw duren voordat met behulp van diepzeefotografie



Grote delen van de oceaانبodem zijn bedekt met mangaanknollen (de zwarte bollen op de foto).

– voor militaire doeleinden ontwikkeld tijdens de Tweede Wereldoorlog – vastgesteld kon worden dat miljoenen vierkante kilometers oceaانبodem, met name in Stille Oceaan, bezaaid liggen met deze mangaanknollen. Mangaan is interessant voor gebruik in onder andere accu's, batterijen en in glas. Chemische analyse toonde aan dat de knollen naast mangaan ook andere metalen bevatten zoals nikkel, koper en kobalt.

Met name die andere metalen, die verpakt in knollen letterlijk voor het oprapen liggen op de oceaانبodem, wekten de interesse van mijnbouwbedrijven. In 1970 werden in de Atlantische Oceaan nabij Florida de eerste experimenten uitgevoerd met het mechanisch 'oogsten' van deze knollen vanaf een Amerikaans schip. Vijf jaar later volgden experimenten in de Stille Oceaan, uitgevoerd door een Japans consortium. Hoewel technisch in principe mogelijk, bleken de kosten van winning van mangaanknollen veel hoger dan de te verwachten opbrengst bij de toen geldende marktprijzen voor delfstoffen. De grootse plannen voor industriële delfstofwinning op de zeebodem verdwenen voor jaren in de kast.

Schaarste en monopolies op de delfstoffenmarkt

Door een almaar toenemende vraag naar minerale delfstoffen vanuit de industrie, en gestaag afnemende reserves van winbare voorraden op land, zijn delfstofprijzen in de afgelopen decennia sterk gestegen. Dit geldt in het bijzonder voor een heel scala van relatief zeldzame metalen die worden toegepast in computers, mobiele telefoons of gps-toestellen; stuk voor stuk apparaten die niet meer zijn weg te denken uit het dagelijkse leven. Bovendien zijn verschillende essentiële grondstoffen voor de elektronische industrie niet alleen schaars, maar ook nog eens voor een groot deel in handen van een zeer beperkt aantal landen. Met name China heeft op zijn grondgebied een onevenredig groot deel van de beschikbare reserves van deze schaarse delfstoffen. China kan vanuit een bijna-monopoliepositie de marktprijs van deze grondstoffen naar zijn hand zetten.

Aangezet door stijgende delfstofprijzen en door de potentiële dreiging van monopolies in bepaalde essentiële grondstoffen, hebben grote industrielanden als Rusland, China, Japan, Duitsland, Frankrijk en Groot-Brittannië, in de laatste decennia aanvragen ingediend bij de Internationale Zeebodemautoriteit (ISA) voor exploratief onderzoek naar minerale delfstoffen in delen van de oceaانبodem. De ISA is een internationale organisatie die in 1994 in het leven is geroepen onder het VN Zeerechtverdrag voor het reguleren van winning van delfstoffen uit internationale wateren. Volgens dit verdrag zijn deze delfstoffen het gemeenschappelijk bezit van de wereldbevolking. De ISA heeft de bevoegdheid gekregen om licenties uit te geven voor het winnen van delfstoffen uit de oceaانبodem, onder voorwaarden die door juristen en wetenschappers van de ISA zijn vastgesteld.

Nieuwe targets van diepzeemijnbouw

De belangstelling van mijnbouwbedrijven is intus-

sen lang niet meer alleen gericht op mangaanknollen op de uitgestrekte diepzeevlaktes. Ook gebieden met actief onderzees vulkanisme lijken rijk aan metaalertsen. Dat vulkanisme komt met name voor langs de grote breuklijnen waarlangs aardplaten uiteendrijven en waar nieuwe korst gevormd wordt uit gloeiend magma dat langs de breuklijnen opwelt. Zeewater dat langs scheuren in de versgevormde oceaankorst dringt wordt door het contact met het hete vulkanische gesteente opgewarmd tot honderden graden. Het neemt daarbij allerlei mineralen in oplossing mee. Waar het hete water onder hoge druk weer uit de zeebodem omhoog komt in zogenoemde hydrothermale bronnen, slaat door de plotselinge afkoeling en drukafname een deel van de opgeloste stoffen neer in vaste vorm. De grillige, soms meters hoge schoorstenen van massief metaalsulfide die zich rond de hydrothermale bronnen vormen, en die zwarte wolken metaalsulfide uitstoten, zijn bekend geworden onder de naam 'black smokers'.

De schoorstenen en het fijnkorrelige metaalsulfide dat uit de zwarte suspensiewolk over de omgeving neerdaalt en soms metersdikke afzettingen vormt, zijn rijk aan koper, lood en zink. Ze bevatten daarnaast ook relatief hoge concentraties goud en zilver en een hele reeks andere metalen als kobalt, tin, barium, seleen, mangaan, cadmium, indium, bismuth, telluur, gallium en germanium. De mijnen met koper-, lood- en zinkerts zoals die nu op land worden ontgonnen zijn in het geologisch verleden ook ontstaan rond soortgelijke onderzeese hydrothermale bronnen. De mijnen op land raken gaandeweg uitgeput en zijn niet zelden de inzet van jarenlange politiek en etnische conflicten, zoals in Congo. Straks bieden de tienduizenden kilometers lange vulkanische bergketens in de diepzee misschien perspectieven op uitgebreide en stabiele nieuwe voorraden.

Ook niet-metallische delfstoffen hebben de interesse van de zich ontwikkelende diepzee-

De schaarste
maakt
winning van
delfstoffen
uit de diepzee
uiteindelijk
rendabel

mijnbouw. Met name fosforiet lijkt interessant. Het is een grondstof voor kunstmest waarnaar wereldwijd grote vraag is vanuit de intensiverende landbouw, maar waarvan het einde in de mijnen op land in zicht lijkt. Fosforiet wordt op bepaalde plaatsen langs de onderzeese randen van de continenten als korsten en knollen op de zeebodem afgezet. Het is een vaste neerslag uit in zeewater opgelost calcium en fosfaat. Op land wordt het bijna uitsluitend in Marokko en de Spaanse Sahara gewonnen. De kostbare delfstof vormt de inzet van een al decennialang smeulend territoriaal conflict tussen deze twee landen. De laatste jaren mengen zich ook nog islamistische strijders in het conflict, die het voorzien hebben op de productiecentra van deze strategische delfstof.

Anticiperend op wereldwijde schaarste, tekende het Nieuwzeelandse mijnbouwbedrijf Chatham Rock Phosphate in 2011 een overeenkomst met het Nederlandse baggerbedrijf Boskalis voor het maken van een ontginningsplan voor onderzeese fosforietafzettingen op 300 tot 400 meter waterdiepte in de territoriale wateren van Nieuw Zeeland.

Protest tegen diepzeemijnbouw

Voor het Canadese mijnbouwbedrijf Nautilus Minerals verliepen de zaken minder gunstig. Het bedrijf rekende in 2010 op een primeur met de start van diepzeemijnbouw rond een onderzees vulkaancomplex in de Bismarck Zee bij Nieuw-Guinea. Terwijl het bedrijf al een licentieovereenkomst had getekend met de regering van Papoea Nieuw-Guinea, liep de bevolking van de nabijgelegen eilanden te hoop tegen wat zij zagen als een onverantwoord ecologisch experiment waarin zij de proefkonijnen waren. Onder die maatschappelijke druk, en na zeer kritische milieueffectrapporten door externe experts, zette Nautilus Minerals de ontwikkeling van het multimiljoenen project tijdelijk in de ijskast. Milieuorganisaties

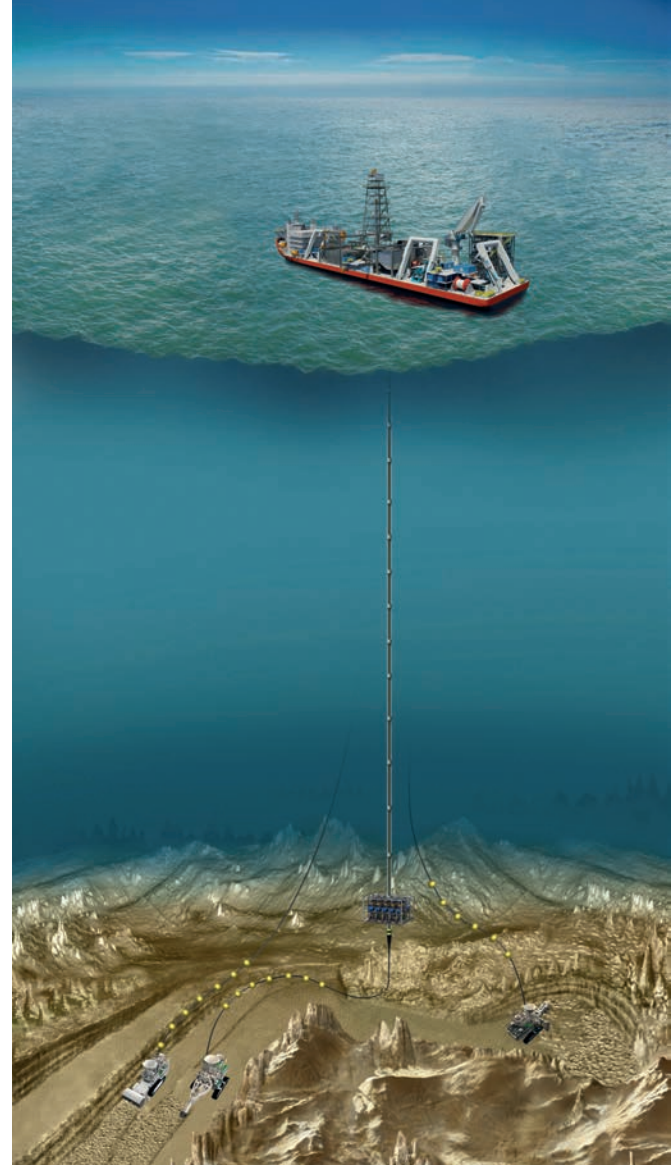
vierden hun eerste overwinning in de strijd tegen de diepzeemijnbouw.

Wie de enorme gaten ziet die door zogeheten dagbouw ('open pit') mijnbouw in het landoppervlak worden uitgegraven, en de nog grotere gebieden die bedekt worden onder hopen mijnpuin en stof, die kan zich enigszins een voorstelling maken van de aanslag die op de zeebodem te verwachten is van diepzeemijnbouw. Mijnbouwbedrijven stellen als remedie voor om kwetsbare en zeldzame bodemfauna met onderliggende bodem en al te verplaatsen buiten het af te graven gebied, om die na beëindiging van de activiteiten weer terug te zetten. Het is een remedie zoals die ook wordt toegepast bij dagbouw op land, waar niet alleen planten en dieren worden verplaatst, maar zelfs hele dorpen worden afgebroken en op andere plaatsen weer worden opgebouwd. Het is echter maar zeer de vraag of dit technisch uitvoerbaar is onder de extreme omstandigheden van de diepzee, en of de winst uit de winning van delfstoffen niet geheel opgaat aan de exorbitante kosten van herstel van het bodemlandschap.

Het lijkt daarom logischer om te onderzoeken of bodemleven dat door het afgraven van de bodem wordt weggevaagd, zich op termijn weer kan herstellen vanuit aangrenzende, niet aangetaste gebieden. Biologisch onderzoek naar effecten van diepzeemijnbouw richt zich daarom onder andere op verspreidingsmechanismen van diepzeefauna. Veel van de typische diepzeefauna, ook aan de bodem vastgehechte groepen als sponzen, koralen, zeelilies, kennen een vrijzwemmend of zwevend larvestadium. Deze larven zouden in principe ook de afgegraven stukken zeebodem weer kunnen koloniseren. Of ze dit ook daadwerkelijk zullen doen hangt af van de mate waarin de zeebodem zich fysiek herstelt.

De winning van mangaanknollen lijkt het minst destructieve type diepzeemijnbouw: de knollen hoeven 'alleen maar' van het oppervlak van de

Versillende bedrijven ontwikkelen ideeën om mangaan mangaan en andere delfstoffen van de oceaanbodem te oogsten.



zeebodem verzameld te worden zonder afgraven van diepere lagen. Toch zal ook die relatief eenvoudige vorm van mijnbouw grote oppervlakken oceaanbodem voor vele duizenden jaren veranderen. Radiometrische ouderdomsbepaling laat zien dat mangaanknollen extreem langzaam groeien. Ze zijn in tienduizenden of zelfs miljoenen jaren ontstaan. Na het oogsten van de knollen zal het herstel van de bodem in een 100% oorspronkelijke staat

dan ook tienduizenden tot miljoenen jaren duren. In hoeverre de mangaanknollen een regulerende rol hebben in de chemie en biologie van de diepe oceaan is feitelijk nog onbekend.

Verstikkende stofwolken

Ook de ruimere omgeving rondom een diepzee-mijnbouwlocatie zal mogelijk ingrijpend worden aangetast. Sediment zal zich verspreiden en gesteentegruis dat door het afgraven in suspensie wordt gebracht, wordt door bodemstromingen meegevoerd. Daarbij komen ook nog eens de afgewerkte restanten van delfstoffen, de zogenoemde *tailings*. Volgens de huidige scenario's zullen die na een eerste verwerking aan boord van een mijnbouwschip terug worden gestort op of nabij de plaats van afgraven. In de direct aangrenzende gebieden loopt bodemfauna, en dan vooral groepen die in de bodem ingegraven of vastgehecht op het oppervlak leven, gevaar om begraven te raken onder mijngruis en die *tailings*. Ook op grotere afstand, mogelijk tientallen kilometers benedenstrooms van de plaats van afgraving, kunnen organismen die hun voedsel uit het water filteren hinder ondervinden van verstopping van hun filter- en ademhalingsapparaat. Daar komt nog bij dat fijnkorrelig sulfidegruis, dat wordt verspreid tijdens het afgraven van sulfidische ertsen, zal reageren met het zuurstofhoudende water boven de zeebodem. Daardoor wordt zuurstof onttrokken aan het water en gaan zware metalen die mogelijk giftig zijn voor het bodemleven in oplossing.

Hoeveel en hoever mijngruis verspreid gaat worden door bodemstromingen, en in hoeverre het reactief is in contact met bodemwater, zijn belangrijke vragen binnen het wetenschappelijk onderzoek naar de impact van diepzee-mijnbouw. Eind jaren tachtig van de vorige eeuw werden door Franse, Duitse en Japanse onderzoeksteams experimenten uitgevoerd in de Stille Oceaan. De stofwolken die geproduceerd zullen worden tijdens de

oogst van mangaanknollen werden nagebootst en hun verspreiding in de omgeving werd gevolgd. Zelfs twintig tot dertig jaar na deze experimenten zijn de sporen nog altijd duidelijk zichtbaar op de zeebodem. De aanwezige bodemfauna lijkt nog lang niet hersteld.

Toekomstperspectief

De lastigste vraag om te beantwoorden is of de verstoring van het diepzeemilieu enig merkbaar effect zal hebben op het functioneren van het oceanische ecosysteem als geheel, en welke nadelige gevolgen het op langere termijn kan hebben voor de mens. Vanuit de mijnbouwindustrie wordt aangevoerd dat de verstoring bij het afgraven van delfstoffen rond onderzeese vulkanen in geen verhouding staat tot het vulkanische geweld dat daar van nature aanwezig is. Het daar aanwezige ecosysteem zou van nature aangepast zijn aan een extreem milieu dat door periodieke vulkanische erupties sowieso al heftig wordt verstoord. In hoeverre de mijnbouw zelf zich in dit extreme milieu zal weten te handhaven moet je nog maar afwachten. De onderzoeksafdelingen binnen de mijnbouwindustrie denken al hard na over technologische oplossingen om aan deze extreme condities het hoofd te bieden.

Het valt op dat de mijnbouwbedrijven niet alleen oog hebben voor de technische uitdagingen, maar dat zij ook bereid zijn om met mariene wetenschappers actief na te denken over de mogelijke milieugevolgen van hun activiteiten en over methoden om schade te beperken. Uiteraard is dit deels een tegemoetkoming aan maatschappelijke bezwaren tegen diepzee-mijnbouw en aan de eisen die de wereldgemeenschap bij monde van de ISA stelt. Het is ook een teken van een groeiend bewustzijn vanuit de industrie voor het welzijn van planeet Aarde.

Gesleep met organismen over de we

■ DR. JAN BOON

DAG IN dag uit worden enorme hoeveelheden ballastwater per schip over de wereld vervoerd, inclusief alle opgeloste stoffen, wat restjes sediment en ook organismen zoals plankton of schelpdierlarven. Dat gesleep met ballastwater is essentieel voor de stabiliteit en bestuurbaarheid van grote zeeschepen die hun lading al hebben gelost. Het water wordt tijdens het lossen in speciale ballasttanks gepompt, compleet met alles wat erin zit. De ballastcapaciteit van een schip is meestal ongeveer een derde van de ladingcapaciteit. Dit gaat dus om niet misselijkte hoeveelheden water.

Eenmaal op de plek van bestemming wordt het water inclusief de meeliftende organismen weer geloosd. De lifters die de reis in de ballast-tank hebben overleefd komen terecht in een gebied waar nieuwkomers zich niet altijd netjes invoegen in het ecosysteem. Als de nieuwe soort niet wordt aangepakt door natuurlijke vijanden of de natuurlijke omstandigheden, kan deze zich soms ongebreideld vermenigvuldigen. Zo kan het nieuwe organisme een plaag vormen ten koste van de al aanwezige soorten. Dit kan zelfs een gevaar vormen voor de menselijke gezondheid en het kan de lokale economie, bijvoorbeeld via de visserij, nadelig beïnvloeden.

Bekende voorbeelden van negatieve gevolgen voor ecologie en economie van grote gebieden zijn de introductie van de Europese driehoeksmossel (*Dreissena polymorpha*) in de Grote Meren op de grens van de VS en Canada en de introductie van de Amerikaanse langlob ribkwal (*Mnemiopsis leidyi*) in de Zwarte Zee, de Zee van Azov en de Kaspische Zee.

Deze ribkwal vinden we tegenwoordig ook in grote aantallen in de Waddenzee en zelfs in het IJ.

Zwaardschede

Het probleem met invasieve soorten wordt gezien als één van de grote bedreigingen voor de zee. Toch is moeilijk te voorspellen welke exoot invasief zal worden en welke niet. Het risico neemt uiteraard toe met de scheepvaartintensiteit tussen twee havens. Zo komen de nieuwe soorten in onze kustgebieden vooral van de Amerikaanse Oostkust. Voorbeelden zijn het muiltje, een schelp die in de jaren dertig van de vorige eeuw is overgebracht, en de Amerikaanse zwaardschede. Die laatste was tot de jaren zeventig van de vorige eeuw onbekend in onze omgeving, maar is nu een heel algemene schelp langs onze kusten. Ook de Aziatische penseelkrab is hier geïntroduceerd via ballastwater.

Vanwege de invasie van de driehoeksmossel in de zoete Grote Meren op de Amerikaans-Canadese grens, hebben de Amerikaanse en Canadese autoriteiten verplicht om het water in ballasttanks op volle zee te verversen. Het idee hierachter is dat organismen uit het zoete of brakke water van de vertrekhaven niet groeien op volle zee, waar het zoutgehalte hoog is en de concentraties aan de belangrijkste voedingsstoffen stikstof en fosfaat juist laag. De zoutwaterorganismen die vervolgens op volle zee worden ingenomen zullen het in de zoete Grote Meren juist weer slecht doen. Vanuit biologisch oogpunt is dit een logische en slimme methode, al zullen de kapitein en de stuurman van een zeeschip er niet altijd blij mee zijn. Het

De Amerikaanse langlob ribkwal heeft zich via ballastwater over de wereld verspreid.



wisselen van ballastwater tijdens zwaar weer of 'hoge zeegang' is riskant voor de stabiliteit en de structuur (torsie) van het schip. Bovendien is het effectief spoelen van de onregelmatig gevormde ballasttanks niet altijd goed te doen.

Conventie

Om de kans op verspreiding van invasieve soorten via ballastwater in de toekomst sterk te verminderen heeft de Internationale Maritieme Organisatie (IMO) van de VN al in 2004 het Ballastwaterverdrag aangenomen. In deze Conventie staat dat de meerderheid van de wereldhandelsvloot, geschat op 50-70.000 schepen, in de periode tussen 2009 en 2016 een ballastwater behandelingssysteem aan boord moeten hebben geïnstalleerd. Na behandeling mogen er in het geloosde ballastwater per milliliter nog maar 10 organismen met een grootte tussen de 10 en 50 micrometer zitten en per kuub hooguit 10 organismen groter dan 50 micrometer.

Een effectief systeem bestaat meestal uit twee delen: als eerste trap een filter voor de grotere organismen en een dodelijke tweede trap voor de kleintjes. Dit doden van organismen gebeurt ofwel door bestraling met UV-licht ofwel door toevoeging van chemicaliën. Omdat deze chemicaliën bij lozing natuurlijk niet het ontvangende ecosysteem mogen vergiftigen, moeten dit stoffen zijn die onmiddellijk na toediening zeer giftig zijn, maar daarna weer zeer snel worden afgebroken. Veel gebruikte stoffen zijn het sterk oxiderende actief chloor of ozon. Als de restgiftigheid bij lozing van het ballastwater nog te groot is, kan deze worden



De Amerikaanse zwaard-schede: inmiddels de meest algemene schelp op het Nederlandse strand.

weggenomen door het toevoegen van een neutraliserende stof.

Op dit moment is de conventie rond ballastwater nog niet van kracht. Dit zal pas gebeuren wanneer minimaal 30 landen, die tenminste 35% van het wereldwijde scheepstonnage vertegenwoordigen, de conventie daadwerkelijk hebben ondertekend. Op dit moment (2014) hebben weliswaar meer dan 30 landen de Conventie ondertekend, maar het vereiste tonnage is nog niet gehaald. Het is de hoop en de verwachting dat die grens in de loop van 2014 gehaald zal worden. Alle afgesproken maatregelen worden dan precies een jaar na die datum verplicht. De kustwacht van de Verenigde Staten wilde daar niet op wachten. Die heeft inmiddels eigen maatregelen genomen die per 1 december 2013 van kracht zijn geworden.

Verstekelingen via vliegtuig en sche

■ DR. ARJAN GITTENBERGER

EXOTEN REIZEN niet alleen met het ballastwater van zeeschepen mee (zie voorgaande box). Voor een ander deel hechten ze zich ook aan de huid van schepen. Een ander deel reist zelfs door de lucht. Verreweg de meeste exoten die zich in de Nederlandse wateren hebben gevestigd komen uit de noordwestelijke Stille Oceaan. Met name in de jaren zeventig en tachtig zijn grote hoeveelheden Japanse oesters uit de wateren rondom Japan per vliegtuig naar Europa gehaald. Met die oesters zijn ook veel andere soorten meegelift die zich nu aan beide kanten van de Noord-Atlantische Oceaan hebben gevestigd. Volgens de beperkte wetenschappelijke

De Japanse oester doet het bij ons stukken beter dan de importeurs hadden voorzien.



kennis van die tijd werd het risico van zowel de oesters als de andere verstekelingen onderschat. Men dacht bijvoorbeeld dat de Japanse oester zich niet in Europese wateren zou voortplanten. Het tegendeel bleek waar. Sinds twintig jaar zijn deze oestertransporten dan ook verboden. Schelpdiertransporten zijn nu alleen nog binnen Europa toegestaan.

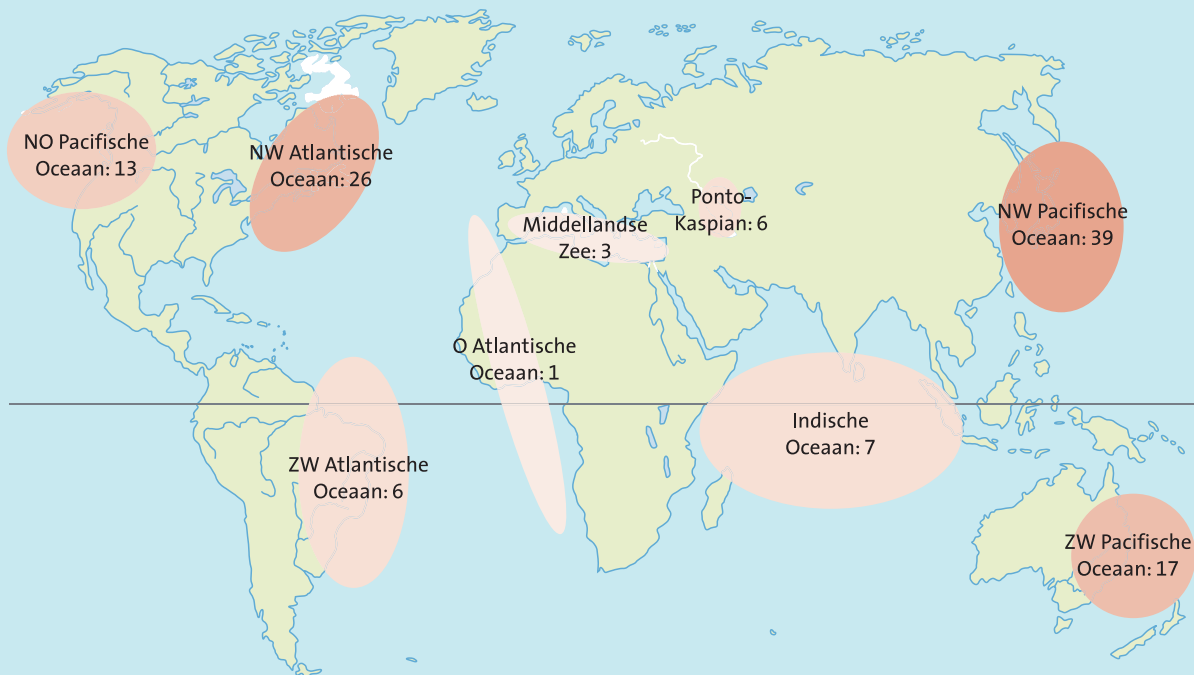
De Japanse oester heeft veel effecten in zijn nieuwe leefgebied. De grote schelpdieren filteren veel voedsel uit het water en zijn daarmee concurrenten voor lokale schelpdieren. Aan de andere kant maken ze op zandige bodems ook grote oesterriffen waar andere dieren, zoals anemonen, sponzen en ook andere schelpdieren zich op kunnen vestigen. De oesters hebben ook slachtoffers gemaakt onder zwimmers, surfers en duikers, die hun voeten openhaalden aan de vlijmscherpe schelpen.

Jachthaven

Schelpdiertransport gebeurt vandaag de dag onder strenge voorwaarden, met een verplicht exoten-monitoringsprogramma in zowel de export- als de importgebieden. Op die manier moet de secundaire verspreiding van exoten binnen Europa worden tegengegaan. Deze secundaire verspreiding van exoten, die eerder vanuit andere continenten zijn ingevoerd, gebeurt voor een deel ook op spontane wijze, via de zeestromingen en via 'menselijk transport' dat lastig te controleren is. Zo blijken zeiljachten en motorboten binnen Europa een zeer belangrijke rol bij de verspreiding te vormen. Exoten hechten zich aan boten en gebruiken ook de

Aantallen exoten die zich langs de Nederlandse kust gevestigd hebben en hun oorsprong

De oorsprong van de belangrijkste exoten langs onze kust.



drijvende steigers in de jachthavens als stapstenen voor hun verspreiding langs de kust.

Verreweg de grootste diversiteit van exoten kun je vinden in jachthavens. De verspreiding via de veelal particuliere boten en bootjes blijkt moeilijk te controleren. De grote, professionele scheepvaart is wat dat betreft al een stuk beter gecontroleerd. Er gelden niet alleen strenge regels rond ballastwater (zie voorgaande pagina's) maar ook rond het gebruik van aangroeiwerende verf op de scheepshuid.

Met de huidige wetenschappelijke technieken en kennis zal het steeds duidelijker worden welke exoten zich invasief kunnen gedragen en hoe zij zich verspreiden. Daarbij zal de controle en het management van deze exoten ook steeds beter mogelijk worden. Met een groeiende wereldbevolking en daarbij een toename van het aantal transporten van goederen over de wereldzeeën, is de exotenproblematiek voorlopig echter nog lang geen gelopen race.

Epiloog: Het Wilde Westen is dichterbij dan je denkt

■ PROFESSOR ALEX OUDE ELFERINK

DE SUBTITEL van dit cahier, het Wilde Westen onder water, zou je de indruk kunnen geven dat het recht geen rol speelt in de oceanen. Het Wilde Westen staat immers synoniem voor wetteloosheid. Het enige recht dat in het Wilde Westen geldt, is het recht van de sterkste.

Staten en juristen hebben evenwel een heel andere visie op de oceanen. Het Verdrag van de Verenigde Naties inzake het recht van de zee, het Zeerechtverdrag uit 1982, legt de rechten en plichten van staten op zee vast. Het wordt ook wel de grondwet voor de oceanen genoemd. Verder is er een uitgebreid netwerk van internationale verdragen dat alle activiteiten in de oceanen reguleert. Ook zijn de Verenigde Naties en vele tientallen mondiale en regionale intergouvernementele organisaties betrokken bij het beheer van de oceanen. Maar hoe zit het nu werkelijk met het recht en de oceanen? Om een antwoord te geven op deze vraag moet je eerst het juridische regime van de oceanen begrijpen, net als de aard van de bedreigingen van de oceanen.

Het juridische regime van de oceanen

In de tweede helft van de twintigste eeuw hebben kuststaten hun rechten over de oceanen tot ver uit hun kusten uitgebreid. Deze rechten zijn vastgelegd in het Zeerechtverdrag. Buiten de zogenoemde twaalfmijlszone (de territoriale zee tot 22,224 kilometer buiten de basislijn, die tot het 'grondgebied' van een land behoren) hebben kuststaten bijvoorbeeld de exclusieve bevoegdheid over visbestanden tot 200 zeemijl – ongeveer 370 kilometer – uit

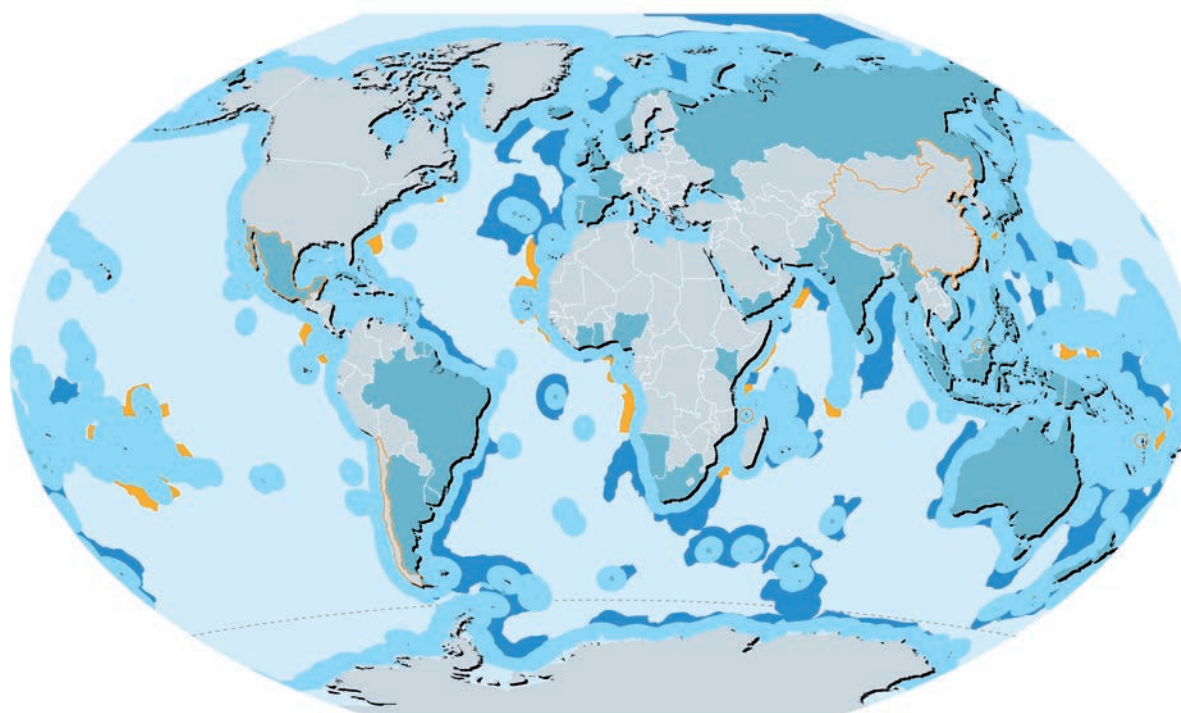
hun kust: de zogenoemde exclusieve economische zone. Voor mineralen in de bodem van de zee geldt hetzelfde en in dit geval kunnen deze rechten zich in bepaalde gevallen nog veel verder uitstrekken.

Het bestaan van deze zones zou kunnen suggereren dat deze onderwerpen goed geregeld zijn. Tot op zekere hoogte is dit waar, zeker in vergelijking met gebieden voorbij nationale rechtsmacht. Maar er bestaan ook de nodige problemen. Veel staten hebben onvoldoende middelen en kennis om hun maritieme zones goed te kunnen beheren. Voor de visserij geldt verder dat visbestanden in het algemeen door de zones trekken van verschillende staten en vaak ook voorbij deze zones. Dit maakt het beheer van deze bestanden uitermate complex. Ook kunnen socio-economische factoren, zoals lokale belangen van vissers, ertoe leiden dat bij het beheer van visbestanden even wat minder rekening wordt gehouden met de regels zoals die zijn vastgelegd in het Zeerechtverdrag en andere verdragen.

Kuststaten hebben minder te vertellen over bijvoorbeeld scheepvaart. Hier zijn zij aangewezen op het tot stand brengen van regelgeving in met name de Internationale Maritieme Organisatie. Ook het voorkómen en bestrijden van vervuiling van het zeemilieu vraagt internationale samenwerking. Rondrijvende vervuiling houdt, net als zwemmende vissen, geen rekening met de juridische grenzen die op zee zijn getrokken.

Hier zijn we dan meteen bij een wezenskenmerk van het beheer van de oceanen. Effectief beheer is alleen mogelijk met de samenwerking en betrokkenheid van alle belanghebbende staten. Deze zijn

Wereldwijde omvang van het continentale plat



- Staten die gegevens hebben ingediend bij de Commissie inzake de buitengrenzen van het continentaal plat
- Staten die voorlopige gegevens indienden zonder een buitengrens aan te geven
- Exclusieve economische zone
- Omvang van het continentaal plat volgens ingediende gegevens
- Omvang van het continentaal plat volgens voorlopige gegevens.

Bron: DOALOS/CLCS

niet altijd bereid om internationaal overeengekomen afspraken te onderschrijven. Een voorbeeld is het Ballastwaterverdrag dat een aantal jaren geleden tot stand is gekomen. Het is bedoeld om de introductie van exotische flora en fauna in kustwateren te voorkomen, maar het is nog niet in werking getreden (zie ook p. 72).

Deze benadering is direct gekoppeld aan een ander wezenskenmerk van het internationale recht. Dit gaat uit van de zogenoemde soevereine

gelijkheid van staten. Elke staat heeft zelf het recht om vast te stellen welke nieuwe regels hij wenst te accepteren. Aan de ene kant hebben alle staten een belang bij deze benadering omdat dit betekent dat zij niet tegen hun wil aan regels gebonden kunnen worden. Aan de andere kant betekent het dat internationale overeenkomsten vaak slechts tot stand kunnen komen door ver gaande compromissen te sluiten. Dit zal dus niet tot het meest effectieve regime leiden. Maar zo'n 'meest effectief regime'

Ondanks het feit dat de rechtsmacht van kuststaten zich over een groot deel van de oceanen heeft uitgebreid beslaan de gebieden voorbij nationale rechtsmacht nog steeds het grootste gedeelte van de oceanen.



Tonijnvisserij in de zones van kuststaten en op de volle zee vraagt om internationale samenwerking, maar de meeste organisaties voor tonijnvisserij functioneren niet goed met als gevolg overbevissing en teruggang van vangsten.

zou weer niet kunnen rekenen op de steun van alle betrokken staten.

De vrijheid van de volle zee

Waar internationale samenwerking van kuststaten al noodzakelijk is voor een aantal specifieke onderwerpen, is internationale samenwerking helemaal essentieel voor de gebieden voorbij nationale rechtsmacht. Dit zijn de volle zee en het internationale zeebodemgebied. Ondanks het feit dat de rechtsmacht van kuststaten zich over een groot deel van de oceanen heeft uitgebreid beslaan deze gebieden voorbij nationale rechtsmacht nog steeds het grootste gedeelte van de oceanen.

Voor het internationale zeebodemgebied bestaat een internationaal beheersregime voor mijnbouw dat is vastgelegd in het Zeerechtverdrag. Er is een internationale organisatie, de Internationale Zeebodemautoriteit, en staten kunnen in principe alleen opereren als zij de regels van deze autoriteit accepteren. Hierbij moet je dan wel weer aantekenen dat het de staten zelf zijn die als leden van de autoriteit dit beleid vormgeven. De effectiviteit van

dit regime zal zich in de toekomst, wanneer het daadwerkelijk tot mijnbouw zal komen, dienen te bewijzen.

Voor vrijwel alle andere activiteiten op en in de oceanen voorbij nationale rechtsmacht geldt in principe de vrijheid van de volle zee. Dit regime van vrijheid van de volle zee houdt in dat alle staten in principe op voet van gelijkheid toegang hebben. Een tweede kenmerk van het regime van de volle zee is dat in principe alleen de staat waarin een schip is geregistreerd – de zogenoemde vlaggenstaat – rechtsmacht kan uitoefenen over dit schip. Deze twee kenmerken van het regime van de volle zee, die wederom het gevolg zijn van de soevereine gelijkheid van staten, maken het moeilijk om tot een effectief regime te komen.

Afspraken die tot stand zijn gekomen tussen een aantal staten kunnen worden ondergraven door andere staten die zich niet bij deze afspraken wensen aan te sluiten. Ook is er bijvoorbeeld in de visserij op de volle zee sprake van zogenaamde gelegenhedsvlaggen. Dit zijn staten die hun register openstellen voor schepen van buitenlandse eigenaren, vanwege de inkomsten die deze registratie oplevert. Daarbij zorgen ze niet per se voor effectieve handhaving van internationaal overeengekomen afspraken. Vanwege de vrijwel exclusieve bevoegdheid van de vlaggenstaat is het niet mogelijk voor andere staten om op volle zee op te treden tegen schepen die zich weinig gelegen laten liggen aan het recht.

Overigens zijn er wel mogelijkheden om op te treden tegen dergelijke schepen, bijvoorbeeld door de vlaggenstaat aan te spreken of maatregelen te nemen als een schip in een haven van een andere staat is, maar het kan kostbaar en complex zijn om dergelijke maatregelen uit te voeren.

De laatste jaren wordt er onder andere binnen de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties gewerkt om te komen tot een effectiever regime voor het beheer van gebieden voorbij nationale

rechtsmacht. Dit zou onder andere dienen te leiden tot het verplicht stellen van milieueffectrapportage voor alle activiteiten in deze gebieden en de aanwijzing van beschermde gebieden. Tot nu toe verlopen deze onderhandelingen uiterst moeizaam en het zal nog vele jaren duren voor dit effectievere regime zijn beslag zal krijgen.

Export van problemen

Verschillende bedreigingen van de oceanen zijn het gevolg van activiteiten op zee. Overbevissing, zoals beschreven op p. 58 is hiervan ongetwijfeld het meest duidelijke voorbeeld. Een oplossing van dergelijke problemen dient vooral gezocht te worden in het recht van de zee. Voor een aantal van de meest ernstige bedreigingen van de oceanen is dit echter niet het geval. Zo is 80 tot 90% van

de vervuiling van de oceanen afkomstig van land. De plastic soep die wordt opgediend op p. 63 vormt hierop geen uitzondering. Ook de opwarming en verzuring (p. 14) van de oceanen is met name het gevolg van men-

selijke activiteiten die zich op land afspelen. Met andere woorden: of het nu het Wilde Westen is op de oceanen, of juist een toonbeeld van rechtsstaatelijkheid, het zal niets uitmaken voor het aanpakken van deze problemen.

Een bijkomend probleem is dat veel van deze 'exportproblemen' niet aan één specifieke bron of staat te koppelen zijn. Alle staten dragen bij aan de opwarming van de aarde en de verzuring van de oceanen. De moeizame onderhandelingen over het regime voor klimaatverandering illustreren de eerder aangehaalde problemen die bestaan bij de totstandkoming van internationale afspraken. Daar komt nog bij dat in deze onderhandelingen

tot nu toe relatief weinig aandacht is geweest voor de gevolgen voor de oceanen. Voor gezonde oceanen is het van wezenlijk belang dat hierin verandering komt.

Samenwerken, ter land en ter zee

Het recht speelt een belangrijke rol in het beheer van de oceanen en het netwerk van internationale regelgeving en samenwerking verdicht zich nog steeds. Tegelijkertijd zijn er ernstige bedreigingen van de oceanen en hun hulpbronnen. In plaats van te spreken van het Wilde Westen zou het echter meer voor de hand liggen om te zeggen 'het gaat ter zee eigenlijk net zoals ter land'. De belangrijkste belemmeringen om te komen tot een effectief regime voor de oceanen zijn het gevolg van hoe de internationale gemeenschap is georganiseerd. Samenwerking met betrekking tot grensoverschrijdende problemen op land verloopt in het algemeen niet wezenlijk anders. Daarnaast is het essentieel om te bedenken dat de belangrijkste bedreigingen voor gezonde oceanen door menselijke activiteiten op land worden veroorzaakt. Ofwel, het Wilde Westen ligt veel dichterbij huis dan op het midden van de oceanen.

Effectief beheer is alleen mogelijk in samenwerking

Nabeschouwing

OKEANOS, ÉÉN van de Titanen uit de Griekse mythologie, was de god van de zee. Met zijn onderlijf, dat de vorm had van een slang, omcirkelde hij de hele aardschijf en hij regelde en passant ook de opkomst en ondergang van de hemellichamen. De almachtige invloed die de Grieken toekenden aan Okeanos geeft goed weer hoe belangrijk de oceanen zijn voor het leven op aarde.

De vijf oceanen op de wereld, de Stille Oceaan, de Atlantische Oceaan, de Indische Oceaan, de Zuidelijke Oceaan en de Noordelijke IJszee beslaan met elkaar meer dan 70% van het oppervlak van de aarde. Alleen al vanwege hun enorme uitbreidheid is het logisch dat alles wat gebeurt in de oceanen een grote invloed heeft op het landklimaat. Als de Warme Golfstroom niet een aftakking zou hebben die langs Ierland naar Noorwegen stroomt zou het in Nederland een stuk kouder zijn. Het periodiek verschijnen van warm water voor de westkust van Zuid Amerika (El Niño) heeft zelfs een mondiale invloed op het klimaat. Tegelijkertijd is de oceaan een systeem op zich met planten en dieren die we alleen daar tegenkomen, zoals coccolithophoren, pyrosomen en reuzeninktvis.

Toch weten we nog weinig van de oceanen, blijkt uit dit cahier. Onze kennis betreft vooral het oppervlak en de kustlijnen. Wat er in de diepte gebeurt, hoe daar golven ontstaan en golfstromingen die zich over de hele aarde verspreiden, de extreme verschijnselen die zich afspelen op grote diepte waar het oceaانwater contact maakt met gloeiend hete gassen en magma uit het binnenste van de aarde, de ontzagwekkende biodiversiteit

van het plankton en de bacteriën in de oceaan, en de raadselachtige lange afstandsmigraties van zeeschildpadden en walvissen, het zijn allemaal fascinerende verschijnselen die nog vele vragen oproepen.

Om de oceanen te begrijpen moet je van alle markten thuis zijn. Wetenschappen als mariene biologie, geochemie en oceanografie werken samen om onze kennis te vergroten. Eén ding is in ieder geval duidelijk: de oceaan is behalve een titaan die het leven op aarde bepaalt ook een kwetsbaar wezen omdat al het niet afbreekbaar afval en een hele bende persistente chemicaliën van het land uiteindelijk in de oceaan bijeen worden gedreven. Daar accumuleren ze in het vetweefsel en de magen van oceanische dieren. Wij hopen dat met dit cahier ook het besef vergroot wordt dat we voorzichtig moeten omgaan met die machtige massa water op aarde, de oceaan.

De redactie

Nadere informatie

Bij de inleiding

De meest recente grote, internationale expeditie was de Census of Marine Life, COML. De project-site is te vinden op <http://www.coml.org>, met geweldig beeldmateriaal op <http://www.coml.org/image-gallery>.

Het World Ocean Circulation Experiment dat van 1990 tot 2002 werd gehouden is te vinden op <http://www.nodc.noaa.gov/woce/>.

Het programma Global Ocean Ecosystem Dynamics, actief tot 2010, is te vinden op <http://www.globec.org>.

Over de Siboga-expeditie verscheen het boek: Een jaar aan boord van H. M. Siboga, A. Weber-van Bosse, 1903. Boekhandel en Drukkerij E. J. Brill, Leiden, heruitgave 2000: Uitgeverij Atlas, Amsterdam.

Hoofdstuk 1

De jaarlijkse variatie in de hoeveelheid chlorofyl op aarde is mooi te zien in deze animatie: <http://tinyurl.com/43rvry6>

Hoofdstuk 2

Op www.expeditiebroeikaswereld.nl is een onderwijsplugin te vinden over over het broeikaseffect, de koolstofcyclus, geologische tijdschalen en het paleoklimaatonderzoek.

In zijn oratie 'Mare incognitum' beschrijft professor Leo Maas ook de stand van de kennis omtrent onderwatergolven en oceaanstromingen: <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/35931>.

Hoofdstuk 3

Actuele informatie over expedities op zee is te vinden op <http://www.naturalis.nl/nl/kennis/blogs-en-expedities/>.

Hoofdstuk 4

De film die de Amerikaanse fotograaf Chris Jordan maakte van de vervuiling rond het atol Midway is te vinden op YouTube via <http://tinyurl.com/lzw4gq3>.

Foto's van hetzelfde project zijn te vinden via www.chrisjordan.com.

De rapporten over het plastic in de magen van noordse stormvogels zijn te vinden via www.wageningenur.nl/plastics-fulmars en via www.zeevogelgroep.nl.

Behalve de wetenschap zijn er diverse actiegroepen die zich buigen over de 'plastic soep', zoals de <http://plasticsoupfoundation.org>.

Details over het 'opruimidee' van de Delftse ingenieur Boyan Slat zijn te vinden op zijn website: www.boianslat.com.

Auteursinformatie

Dr. Annelies Pierrot-Bults, (Inleiding) is gastonderzoeker aan het Naturalis Biodiversity Center in Leiden en tevens aan de Universiteit van Amsterdam.

Professor Jef Huisman (Hoofdstuk 1, Primaire productie en BOX: Creatief met primaire producenten) is hoogleraar aquatische microbiologie aan de Universiteit van Amsterdam.

Professor Hein de Baar (Hoofdstuk 1, De C in de zee) is hoogleraar oceanografie aan de Rijksuniversiteit in Groningen en senior onderzoeker aan het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Dr. Hendrik van Aken, (Hoofdstuk 2, Grootschalige oceaanstroming) is oud-medewerker van de afdeling fysische oceanografie van het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Professor Leo Maas (Hoofdstuk 2, Golven in de diepzee) is bijzonder hoogleraar Golfdynamica in de oceaan aan de Universiteit Utrecht, tevens Senior onderzoeker van de afdeling Fysische oceanografie van het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ, Texel).

Professor Appy Sluijs, (BOX: Dode bodem, bron van kennis) is hoogleraar paleoceanografie aan de Universiteit Utrecht.

Dr. Bert Hoeksema (Hoofdstuk 3, Koraaldriehoek) is hoofd van de afdeling Mariene Zoölogie binnen de sector Onderzoek en Onderwijs van Naturalis Biodiversity Center in Leiden.

Dr. Marc Lavaleye (Hoofdstuk 3, Extreme habitats) is onderzoeker aan de afdeling Mariene Ecologie van het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Professor Corina Brussaard (Hoofdstuk 3, Mariene virussen) is hoogleraar virale ecologie aan de Universiteit van Amsterdam en Senior Onderzoekster op de afdeling Biologische Oceanografie van het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Dr. Furu Mienis (BOX: Oases in de diepzee) is onderzoekster bij de afdeling Mariene Geologie en Chemische Oceanografie van het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Professor Han Lindeboom (Hoofdstuk 4, Visserij) is buitengewoon hoogleraar Mariene Ecologie bij de Universiteit van Wageningen en Directeur Wetenschap van het Institute for Marine Resources and Ecosystem Studies, IMARES.

Dr. Jan Andries van Franeker (Hoofdstuk 4, Plastic soep) is onderzoeker bij Institute for Marine Resources and Ecosystem Studies, IMARES.

Professor Gertjan Reichart & dr. Henko de Stigter (Hoofdstuk 4, Mijnbouw) zijn beiden onderzoekers aan de afdeling Mariene Geologie en Chemische Oceanografie van het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Dr. Jan Boon (BOX: Gesleep met organismen) is onderzoeker aan het Koninklijke Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

Dr. Arjan Gittenberger (BOX: Verstekelingen via vliegtuig en scheepshuid) is directeur van de mariene consultancy GiMaRIS, universitair docent bij het Instituut voor Biologie Leiden van Leiden Universiteit, gastmedewerker bij het Naturalis Biodiversity Center, en coördinator van het duikers-monitoringsproject MOO van Stichting ANEMOON.

Professor Alex Oude Elferink (Epiloog: Het Wilde Westen) is directeur van het Nederlands Instituut voor Zeerecht, NILOS, in Utrecht.

Redactie

Professor Herman Ridderinkhof is adjunct-directeur van het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee en buitengewoon hoogleraar Fysische Oceanografie aan de Universiteit Utrecht.

Professor Nico van Straalen is hoogleraar Dier-ecologie aan de Vrije Universiteit Amsterdam en bestuurslid van de Stichting Biowetenschappen en Maatschappij.

Ir. Rob Buiten is freelance wetenschapsjournalist.

Foto omslag: Shutterstock

Shutterstock: p. 4, 26, 40, 42, 61, 73, 78

Wikimedia Commons: p. 5, 14 o, 15, 30, 48, 52, 59, 68

NOAA: p. 6, 45

Imageselect, Wassenaar: p. 8, 11, 12, 16, 56

NASA: p. 10, 27

Elisa Carolus, Stroud: p. 13, 58

Rob Buiten, Heemstede: p. 14 b

Theo Pasveer BNO Cartographics, Deventer: p. 17 b, o, 22, 23, 29, 31, 38, 64, 75, 77

Kees Veth: p. 18

istock: p. 20

Hendrik van Aken: p. 24, 25

ANP Photo, Rijswijk: p. 28, 47, 63

Leo Maas: p. 32 (3x)

Appy Sluijs: p. 35

NIOZ, Texel: p. 49, 55

Corbis: p. 36

Coll. Artis Bibliotheek, UvA: p. 39

Bert Hoeksema: p. 41

Hollandse Hoogte, Amsterdam: p. 44

J. Craig Venter Institute: p. 50

Corina Brussaard: p. 51

Jan Andries van Franeker: p. 65

Nautilus Minerals: : p. 70

Lodewijk van Walraven: p. 72

Arjan Gittenberger: p. 74

bio

WETENSCHAP+
MAATSCHAPPIJ

www.biomaatschappij.nl

50% korting
op de normale
verkoopprijs



4X BWM-cahiers
voor maar € 22,-

Cadeautje!

Wilt u uw klanten informeren? Uw collega's verrassen? Denk eens aan een cahier! Neem contact op met BWM via 070-3440792 of bestellingen@biomaatschappij.nl. Bij afname van grote aantallen kan de prijs daarop worden afgestemd.



Ontdek met BWM de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van biowetenschappen. Van diabetes tot biograndstoffen en van hersenen tot evolutie. De cahiers zijn geschreven door topwetenschappers: objectief, scherpzinnig en verrassend.

Met BWM weet je meer!

Cahiers in 2014

- > Genen en gezondheid
- > Oceanen
- > Nierdonatie
- > Synthetische biologie

Gratis lesmateriaal

BWM maakt ook lesmateriaal bij de cahiers. Voor havo en vwo bovenbouw. U kunt dit gratis downloaden via www.biomaatschappij.nl/lesmateriaaloverzicht/

Stichting Biowetenschappen en Maatschappij
werkt samen met:

Dit cahier is mede tot stand gekomen door:

kennislink.nl
maakt nieuwsgierig



In dit nummer:

- **Geschiedenis van de oceanografie**
- **De verdeling van voedsel over de oceanen**
- **Relaties tussen algen, vissen en walvissen**
- **Monsterlijke dieren en reuzevirussen**
- **De rijkste visgronden en de grootste vuilnisbelten**
- **Verder dan 20 mijl: het recht van de volle zee**

Redactie

Professor Nico van Straalen

Professor Herman Ridderinkhof

Rob Buiters (eindredactie)

Met een voorwoord van solozeiler Henk de Velde

Oceanen zijn goeddeels *Terra incognita*. Gooi een net uit in de diepste diepzee en goede kans dat je nog onontdekte organismen omhoog haalt. De oceanen zijn vooral ook heel groot. Die omvang en onbekendheid lijken ook roekeloos te maken. Wat je niet kent bescherm je niet en wordt dus onderworpen aan plannen voor diepzee mijnbouw, bijvoorbeeld op zoek naar mangaanknollen, of aan ongebreidelde visserij.

Tegelijk is de oceaan ook een sleutelfactor in het bufferen van een dynamisch klimaat. Het belangrijkste broeikasgas CO₂ en ook thermische energie worden in de oceaan opgeslagen zodat al te grote schommelingen in de atmosfeer worden opgevangen.

Dit cahier zoekt antwoorden op een aantal belangrijke vragen: Wat weten we nu van de oceanen, wat is de rol van oceanen in ecosystemen en klimaat en wat zijn de bedreigingen van de oceanen?

**Biowetenschappen
en Maatschappij**

