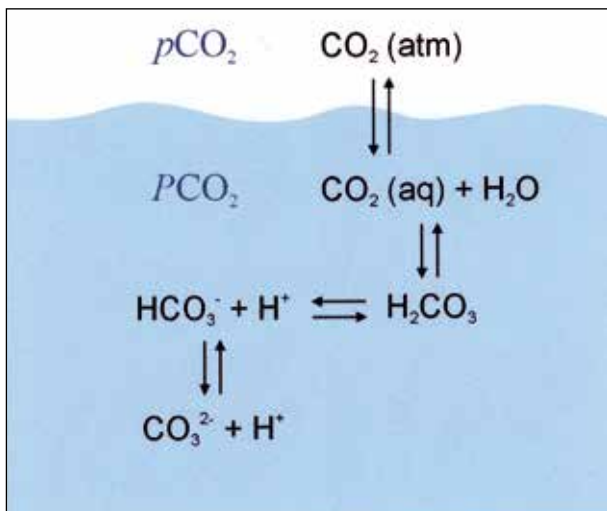


Oceaanverzuring – het minder bekende CO₂-probleem

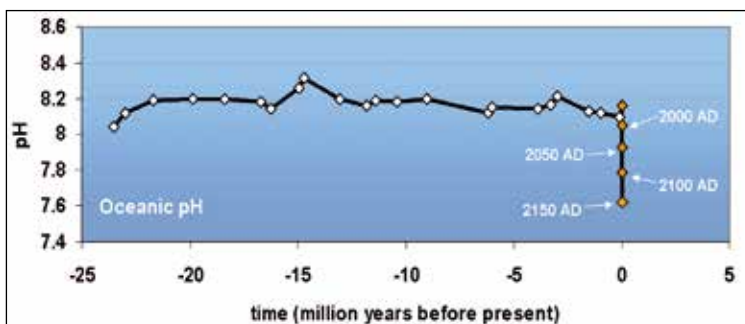
door Jelle Bijma en Svenja Ilinka Bijma
jelle.bijma@awi.de

Veranderingen in de koolstofkringloop (c.q. de CO₂-concentratie in de atmosfeer) veroorzaken niet alleen klimaatverandering, maar hebben op langere tijdschalen in de aardgeschiedenis ook belangrijke gevolgen voor de evolutie en biodiversiteit, zowel op land als in de zee. Plotselinge en sterke veranderingen in de koolstofkringloop zouden de aanleiding kunnen zijn geweest voor globale extincties uit de geologische geschiedenis. Een verhoging van de CO₂-concentratie in de atmosfeer leidt niet alleen tot *global warming* en *climate change*, maar tegelijkertijd ook tot een verzuring van de oceanen en in extreme gevallen zelfs tot zuurstofarme condities in de diepzee.



Afb. 1. Kooldioxide in de atmosfeer wordt geabsorbeerd door de oceanen. Het opgeloste CO₂ (CO₂aq) reageert met water en vormt het zeer instabiele (di)waterstofcarbonaat ('koolzuur': H₂CO₃). Dit staat een proton (H⁺) af en vormt het bicarbonaat-ion (HCO₃⁻). Dit staat wederom een proton af en vormt het carbonaat-ion (CO₃²⁻). De resulterende concentraties van CO₂aq, HCO₃⁻, CO₃²⁻ worden bepaald door de chemische evenwichtsconstantes (en temperatuur, zoutgehalte en druk); de vrijkomende protonen verzuren de oceaan.

In tegenstelling tot de dominante atmosferische gassen zuurstof (O₂) en stikstof (N₂) lost kooldioxide (CO₂) niet alleen in zeewater op, maar reageert het ook met water. De chemische veranderingen leiden tot een vermindering van de pH-waarde van het zeewater en de concentratie van carbonaat-ionen (afb. 1 en 2).



Afb. 2. De ontwikkelingen van de zuurgraad van de oceaan (pH) tijdens de afgelopen 25 miljoen jaren en een prognose tot 2050 (Turley et al., 2006).

Dit proces wordt in het algemeen oceaanverzuring genoemd. Het zuurgehalte van de oceaan in het geologisch verleden wordt bepaald met behulp van *proxies*: geochemische data afkomstig van de kalk van bijvoorbeeld foraminiferen (calcificerende protisten) en koralen.

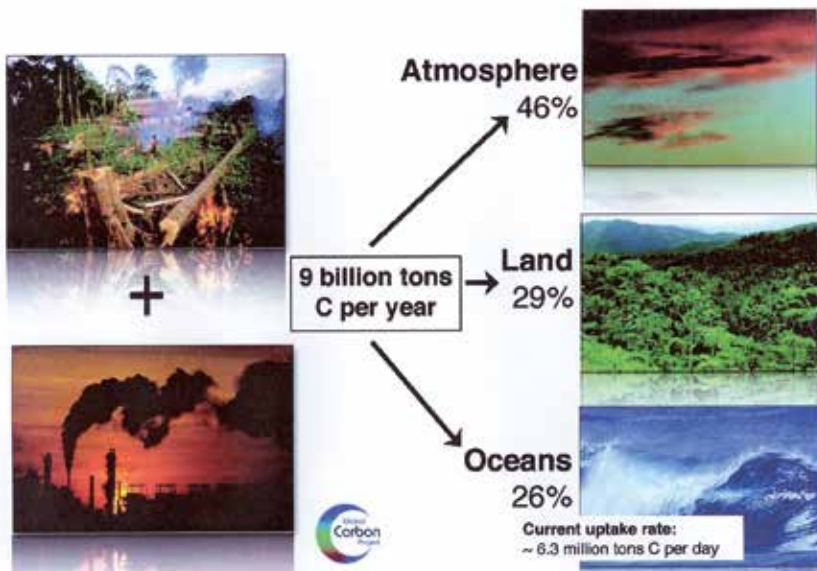
Carbonaat-ionen zijn de bouwstenen van skeletten en schelpen van een groot aantal zeeorganismen waaronder koralen, schelpdieren, crustaceën en kalkig fyto- en zoöplankton. Dit plankton vormt de basis van de mariene voedselketen en is dus de belangrijkste voedselbron voor hogere zeeorganismen. Ook niet-calcificerende organismen (organismen zonder kalkskelet) kunnen door de verzuring beïnvloed worden. De gevolgen van oceaanverzuring zijn tegenwoordig al duidelijk meetbaar en voortschrijdende verzuring in de komende decennia zal diepgaande gevolgen hebben voor sommige van de meest fundamentele biologische en geochemische processen in de oceaan. De vraag is niet óf, maar in hoeverre de biodiversiteit onder oceaanverzuring zal lijden en hoe de sociaaleconomische functies van het huidige voedselweb en ecosysteem aangetast zullen worden.¹⁾

CO₂-concentratie blijft toenemen

Vanaf het begin van de industriële revolutie is de concentratie van CO₂ in de atmosfeer door het gebruik van fossiele brandstoffen, de cementindustrie en ontbossing voor steeds intensievere landbouw en veeteelt gestegen van ca. 280 naar 387 ppm (afb. 3). De atmosferische CO₂-concentratie op aarde is tegenwoordig hoger dan tijdens de laatste 25 miljoen jaren. Verwacht wordt dat de toekomstige concentratie verder exponentieel zal toenemen (1990-1999 ca. 1% per jaar; 2000-2012 ca. 3,1% per jaar). Sinds het begin van de industriële revolutie heeft de oceaan al meer dan 430 miljard ton CO₂ uit de atmosfeer geabsorbeerd – dat is ongeveer een derde van de anthropocene (door mensen veroorzaakte) kooldioxide-emissies.²⁾ Per dag absorbeert de oceaan meer dan 6 miljoen ton CO₂ (vergelijkbaar met het gewicht van meer dan 12.000 Airbus 380 vliegtuigen).

Aanvankelijk werd aangenomen dat het absorberend vermogen van de oceaan een zegen was voor de mensheid omdat dit de hoeveelheid van het broeikasgas CO₂ in de atmosfeer aanzienlijk vermindert en de globale opwarming hierdoor dus ook zou afnemen. Het nadeel van het absorberend vermogen van de oceaan is echter dat de pH (zuurtegraad: zuurder betekent een lagere pH, afb. 4) van het oppervlaktewater in de oceaan sinds het begin van de industriële revolutie is gedaald van gemiddeld 8,2 naar gemiddeld 8,1 (Wolf-Gladrow et al., 1999).

Halverwege de 21^{ste} eeuw bereikt, naar verwachting, de CO₂-concentratie in de atmosfeer een waarde van meer dan 500 ppm en rond 2100 zal de waarde volgens het IPCC-scenario B2 (uit 2007) meer dan 800 ppm bedragen. Deze hoge atmosferische concentratie zou leiden tot een verdere reductie van de gemiddelde pH-waarde van het oppervlaktewater van ca. 0,3-0,4 pH-eenheden tot 2100 (afb. 2). In dat geval zou de oceaan ongeveer 100-



Afb. 3. Circa een derde van de CO₂-emissies wordt door de oceanen opgenomen en leidt tot oceaanzuivering. Bron: www.globalcarbonproject.org/carbon-budget/07/index.htm

biologische kettingreacties. De invloed op calcificerende organismen is het meest onderzochte proces. Schaaldieren en koraalriffen lijden bijvoorbeeld direct als gevolg van gereduceerde calcificatie en hebben dus een verminderde bescherming tegen predatoren of (bio)erosie. Over de invloed op niet-calcificerende organismen en levensgemeenschappen of ecosystemen is veel minder bekend. Het begrijpen van deze processen is belangrijk om het volledige spectrum van de gevolgen door oceaanzuivering te begrijpen.

Ook de mate waarin de diverse organismen worden getroffen kan verschillen. Voor volwassen vissen bijvoorbeeld, zouden directe gevolgen van de oceaanzuivering beperkt kunnen zijn, maar verschillende vissoorten ervaren al een enorme druk door overbevis-

sing. Aan de andere kant zijn (in)directe invloeden van oceaanzuivering op de vruchtbaarheid of op vroege ontwikkelingsstadia van vissen en andere zeeorganismen nog onvoldoende onderzocht.

Omdat verzuring optreedt *in combinatie met* wereldwijde opwarming, zou deze interactie tussen oceaanzuivering en temperatuurtolerantie de verspreiding (biogeografie) van veel vissoorten ook kunnen veranderen. De geobserveerde migratie van Atlantische soorten naar (sub-)polaire gebieden (*atlantificatie*) verhoogt de concurrentiedruk en zou negatieve gevolgen kunnen hebben voor het hooggespecialiseerde (sub-)polaire ecosysteem.

Tot nu toe is er weinig bekend over het vermogen van mariene organismen om zich fysiologisch of zelfs genetisch aan te passen aan een zuurder milieu. Daarom is het momenteel nog niet mogelijk om kritieke drempelwaarden voor een acceptabele pH-daling op het niveau van de organismen te definiëren. Het is al helemaal onmogelijk om het verloop van de veranderingen van levensgemeenschappen en ecosystemen te voorspellen indien drempelwaarden overschreden worden. Samenvattend valt te zeggen dat onze huidige kennis over de gevolgen van oceaanzuivering op mariene levensgemeenschappen grotendeels bestaat uit beperkte experimenten met slechts enkele soorten die voor korte tijd zijn blootgesteld aan abrupte en extreme pH-veranderingen (Collins en Bell, 2004; Müller et al., 2009).

Biogeochemische kringlopen

Oceaanzuivering en *global warming* zijn symptomen van dezelfde ziekte: een snelle en heftige verandering van de koolstofkringloop. De koolstofkringloop op aarde verbindt de verschillende koolstofreservoirs (atmosfeer, oceaan en landbiosfeer) door de uitwisseling van koolstofhoudende verbindingen. De snelheid van deze uitwisseling wordt bepaald door biogeochemische processen en speelt zich voor de diverse reservoirs op zeer verschillende tijdschalen af. De toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer door humane emissies vindt plaats zonder vertraging en leidt tot globale opwarming. De opname van alle 'extra' CO₂ uit de atmosfeer in de oceaan gaat echter veel minder snel. Door deze onbalans gaat het proces van verzuring door tot er een nieuw evenwicht bereikt is, ook al vinden er geen verdere CO₂-emissies meer plaats.

De opname van koolstof door de oceaan wordt bepaald door de oplosbaarheid van CO₂ en door de 'biologische pomp' (afb. 5).

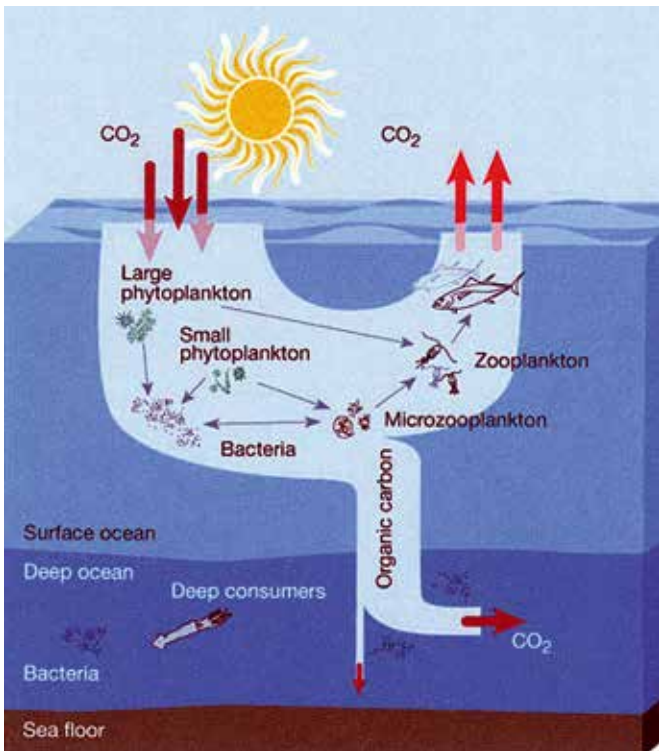
150% zuurder zijn vergeleken met het begin van de industriële revolutie, maar ook zuurder dan ooit eerder in de laatste 25 miljoen jaren!

Effecten op mariene organismen

Oceaanzuivering vormt een bedreiging voor reproductie, groei en overleving van vele mariene organismen en leidt tot een verlies van de biodiversiteit in de oceaan. Nog belangrijker is dat een zuurder milieu kan leiden tot fundamentele ecologische verschuivingen. Tot nu toe is weinig bekend over deze

Concentrations of Hydrogen ions compared to distilled water (pH)		Examples of solutions and their respective pH
10,000,000	0	Battery Acid
1,000,000	1	Hydrochloric Acid
100,000	2	Lemon Juice, Vinegar
10,000	3	Orange Juice, Soda
1,000	4	Tomato Juice
100	5	Black Coffee, Acid Rain
10	6	Urine, Saliva
1	7	"Pure" Water
1/10	8	Sea Water
1/100	9	Baking Soda, Toothpaste
1/1,000	10	Milk of Magnesium
1/10,000	11	Household Ammonia
1/100,000	12	Soapy Water
1/1,000,000	13	Bleach, Oven Cleaner
1/10,000,000	14	Liquid Drain Cleaner

Afb. 4. De pH-schaal van 0 tot 14 is logaritmisch, dat wil zeggen dat een pH-verandering van -0,1 eenheid overeenkomt met een verzuring van 26 procent; een pH-verandering van -0,3 eenheden komt overeen met een verdubbeling van de verzuring (afbeelding aangepast en met vriendelijke toestemming van J.P. Gattuso).



Afb. 5. De biologische koolstofpomp is verreweg de belangrijkste 'CO₂-pomp'. Microscopisch kleine algen (fytoplankton) nemen via fotosynthese CO₂ op in de fotische zone van de oceaan (daar waar zonlicht doordringt). De plantaardige biomassa wordt vervolgens door dierlijk plankton (zoöplankton) geconsumeerd en de excrementen zinken naar de diepzee. Ook de afgestorven algen zinken naar de diepzee. Tijdens het transport en op de oceanbodem wordt deze organische substantie door bacteriën weer in CO₂ omgezet. Het door fotosynthese gebonden koolstof wordt zo aan de atmosferische kringloop onttrokken. Nu kan het oppervlaktewater opnieuw CO₂ uit de lucht opnemen. De biologische koolstofpomp zorgt er dus voor dat het verschil in CO₂-concentratie tussen het oceaanwater aan de oppervlakte en in de diepzee in stand gehouden wordt. Zonder die pomp zou de CO₂-concentratie in de atmosfeer dubbel zo hoog zijn.

Beide processen beïnvloeden de oceanverzuring. Aan de ene kant wordt de chemische buffercapaciteit van de oceaan gereduceerd door de constante opname van kooldioxide. Daardoor kan niet alleen minder CO₂ worden opgenomen (en blijft er meer in de atmosfeer, waardoor de globale opwarming versterkt wordt), maar wordt ook de verzuring versneld. In het IPCC *business-as-usual-scenario* voor de CO₂-emissies betekent dit dat de opnamecapaciteit voor kooldioxide omstreeks het jaar 2100 60% lager zal zijn dan op dit moment het geval is.

De efficiëntie van de biologische pomp hangt af van de verhouding tussen organisch koolstof (door fotosynthese) en kalk (geproduceerd door calcificerend plankton) dat naar de bodem van de diepzee wordt getransporteerd en uiteindelijk in het sediment begraven wordt. Een hogere CO₂-concentratie in de atmosfeer kan in principe leiden tot een hogere organische koolstofproductie en dus tot een efficiëntere koolstofpomp. De mariene fotosynthese is echter meestal niet gelimiteerd door de beschikbaarheid van CO₂ in het zeewater, maar door de beperkte beschikbaarheid van andere noodzakelijke voedingsstoffen zoals nitraat, fosfaat en sporenelementen, zoals ijzer. De relatief zware schelpjes en kalkskeletjes van dode planktonische organismen spelen een belangrijke rol om het afgestorven en veel lichtere organische materiaal van niet-calcificerende of silificerende organismen naar de oceanbodem te transporteren. Het organisch materiaal is plakkerig en vormt vlokken ('marine snow') die door de verzuring met kalkige en silicatische resten naar de zeebodem 'regenen'. Een gereduceerde kalkproductie door mariene organismen (meer CO₂ betekent *minder*

CO₃²⁻) vermindert dus het koolstoftransport in de diepzee door verminderde ballast waardoor de biologische pomp minder effectief wordt.

Microscopisch kleine organismen (archae-)bacteriën, virussen en protisten zijn de hoofdacteurs van de belangrijkste biogeochemische kringlopen (koolstof, stikstof, fosfaat, silicaat). Tot op heden is het echter niet duidelijk hoe de microbiële cyclus op oceanverzuring reageert. Het lijkt erop dat een stijgend CO₂-gehalte de stikstofbinding verhoogt (Hutchins et al., 2007) en de natuurlijke soortensamenstelling van planktongemeenschappen verandert. Helaas zijn er nog te veel onbekende factoren die potentiële veranderingen in de biogeochemische kringlopen mede bepalen. Dit is één van de redenen waarom mogelijke bijkomende gevolgen op ons toekomstig klimaat niet te voorspellen zijn. Veranderingen in globale stofkringlopen werken op verschillende tijdschalen, zoals hierboven reeds aangegeven. Opname en transport van CO₂ in de diepzee is een proces dat snel verloopt, in orde van grootte van enkele weken tot maanden. Het effect van versterkte carbonaatoplossing in sedimenten, als gevolg van zuurder water, werkt op langere tijdschalen in orde van grootte van duizenden jaren. Dit proces compenseert de verzuring. Voor het uiteindelijke chemische herstel van de oceaan is tevens versterkte verwerking van gesteentes op het land noodzakelijk, een proces in orde van grootte van honderdduizenden jaren.

Lessen uit het verleden

Historische data, zoals de metingen van oceanische 'meetstations' in de buurt van de Canarische eilanden, Hawaii en Bermuda, alsook regelmatige metingen langs oceanroutes met onderzoeksschepen, bevestigen een verzuring van 0,02 pH-eenheden tijdens het laatste decennium en corresponderende veranderingen in de oplosbaarheid van carbonaten (Feely et al., 2008; Turley et al., 2006). Sinds het begin van de industriële revolutie is de pH-waarde met 0.1 eenheden gedaald.

Op langere tijdschalen, zoals die van de (inter-)glacialen (cycli met een tijdspanne van ca. 100.000 jaren) kunnen veranderingen van het atmosferische pCO₂ (de CO₂-partiaaldruk (ppm)), direct gemeten worden in, tot 800.000 jaar oude, Antarctische ijskernen. De gemeten veranderingen worden bijvoorbeeld gereflecteerd in het gewicht van foraminiferen. Tijdens glacialen is de atmosferische CO₂-concentratie ca. 190 ppm en zijn de schaaltes van foraminiferen dikker (zwaarder) dan tijdens de interglacialen (met een gemiddelde atmosferische CO₂-concentratie van 280 ppm). Dit laat duidelijk een direct verband zien tussen atmosferisch CO₂, het oceanische carbonaatsysteem en de (onproblematische) biologische reacties van deze calcificerende organismen, zolang de veranderingen in de koolstofcyclus langzaam en gematigd verlopen.

De extreme oceanverzuring die ca. 55 miljoen jaar geleden, tijdens de overgang van Paleoceen naar Eoceen (het Paleocene-Eocene Thermal Maximum, ofwel PETM) plaatsvond, liet een heel ander beeld zien. Warme diepzeestromingen destabiliseerden gashydraten in de sedimenten langs de continentale randen. Hierdoor kwam plotseling veel methaan vrij, met wereldwijde gevolgen voor de koolstofkringloop. Het vrijgekomen methaan oxideerde razendsnel tot CO₂. Dit leidde misschien wel tot de belangrijkste oceanverzuring uit de geschiedenis van de aarde. Hoewel deze verstoring van de koolstofcyclus aanzienlijk langzamer was dan tegenwoordig (Zachos et al., 2005), zijn tijdens het PETM vele benthische (op de zeebodem levende, red.) foraminiferen uitgestorven.

Numerieke modellen van de koolstofkringloop in de oceaan en data van sedimenten laten zien dat het herstel van dit soort gebeurtenissen tienduizenden tot wel honderdduizenden jaren in beslag neemt. Het biologisch herstel van een grote extinctie kan zelfs miljoenen jaren duren (Knoll et al., 2007). De CO₂-verstoring tijdens het PETM was in dezelfde orde van grootte als tegenwoordig, maar speelde zich af op een tijdsinterval van

ca. 10.000 jaren (Zachos et al., 2005). Daarmee biedt het PETM de beste vergelijkingsmogelijkheid met de huidige oceaanzuivering. Een belangrijk verschil is echter dat de huidige CO₂-emissies hoogstwaarschijnlijk vele malen sneller plaatsvinden.

De verzuring zoals berekend voor het jaar 2100 is sterker dan zich tijdens de laatste 25 miljoen jaren heeft voorgedaan; de pH-verandering is misschien wel honderd maal sneller dan op elk ander moment tijdens deze periode (Zachos et al., 2005). Als de CO₂-emissies in de loop van deze eeuw verder zullen toenemen in de mate waarin dat nu gebeurt - en de verwachte veranderingen in de chemie van het zeewater plaatsvinden - dan zullen tegen het einde van deze eeuw vele mariene organismen condities ervaren die zij tijdens hun hele evolutiegeschiedenis nog niet eerder hebben meegemaakt. Het onbekende verloop van dit 'anthropocene experiment' doet een beroep op het zogenaamde *voorzorgsprincipe* én aan een langetermijn-wereldpolitiek.

Sociaaleconomische gevolgen

Eén van de gevolgen van de oceaanzuivering die beter wordt begrepen is de verminderde calcificering van schelpen en kalkskeletten van verschillende zeeorganismen, waaronder economisch waardevolle schaaldieren, kreeften en koralen. De economische waarde van koraalriffen hangt vooral samen met hun functie als leef- en paaigebied voor commerciële visbestanden. Ook spelen zij een belangrijke rol in natuurlijke kustbescherming en toerisme. Uitgaande van een voorzichtige schatting van de waarde van koraalriffen van 100.000 US\$ per km² per jaar, komt de wereldwijde economische waarde neer op een bedrag van 30 miljard US\$/jaar. Oceaanzuivering zal naar verwachting nog deze eeuw een groot deel van de riffen aantasten. Het ligt daarom voor de hand dat oceaanzuivering jaarlijks tot een verlies van meerdere tientallen miljarden Amerikaanse dollars zal leiden.

Kort geleden werd de te verwachten economische schade aan koraalriffen door oceaanzuivering opnieuw geschat (Brander et al., 2009). De te verwachten verliezen waren in de orde van grootte van 0,18 procent van het globale bruto binnenlands product (bbp) voor het jaar 2100. Dit is weliswaar een factor tien minder dan de geschatte kosten voor de gevolgen van klimaatverandering, maar desondanks is deze economische schade niet verwaarloosbaar. Bovendien is niet alle schade in geld uit te drukken.

Om de raming van de schade verder te nuanceren, zou de analyse verder moeten gaan dan alleen koraalriffen en uitgebreid moeten worden met andere potentieel getroffen *marine resources*. Het zal duidelijk zijn dat deze vele malen hoger zal uitvallen.

Een belangrijk aspect bij het inschatten van de potentiële schade van oceaanzuivering is de verdeling daarvan over de verschillende populaties, regio's en landen. De te verwachten economische schade door oceaanzuivering valt, zoals vele andere negatieve gevolgen van klimaatverandering, proportioneel hoger uit voor de ontwikkelingslanden. Vis levert meer dan 20% van de proteïne voor meer dan 2,6 miljard mensen (volgens een schatting van de FAO in 2007). Oceaanzuivering heeft grotere

gevolgen in de ontwikkelingslanden waar de mensen afhankelijk zijn van rivisserij en het verzamelen van schelp- en schaaldieren. Koraalriffen liggen grotendeels in ontwikkelingslanden en zijn vaak bepalend voor het ecosysteem in arme kustgemeenschappen.

Op de wereldwijde economie zal het effect van oceaanzuivering afhankelijk zijn van zowel de aanpassingen van het mariene ecosysteem als van de menselijke aanpassingsstrategieën. Beide zijn moeilijk te voorspellen, waardoor het lastig wordt de economische gevolgen te berekenen. Een samenwerking van de natuurwetenschappen en de sociale wetenschappen is noodzakelijk om het potentieel van aanpassingen in het ecosysteem, het menselijke systeem en hun samenspel te onderzoeken. De totale financiële kosten voor de aanpassing aan de oceaanzuivering moeten geschat worden om de politiek te mobiliseren.

Slotopmerking

In Europa en wereldwijd zou een bindende reductie van de globale koolstofemissies en een aanpassingspolitiek afgesproken moeten worden. Een beter begrip van de risico's en de gevolgen van oceaanzuivering en tevens het inzicht dat zowel oceaanzuivering als globale opwarming door antropogene CO₂-emissies veroorzaakt worden, zou daarbij helpen. Oceaanzuivering is al duidelijk meetbaar en zal, als gevolg van de continuering van de uitstoot van CO₂, verder intensiveren. Aangezien de potentiële bedreiging van het mariene ecosysteem en de daaruit resulterende gevolgen voor de maatschappij en de economie significant is en op korte termijn ook onomkeerbaar, is onmiddellijke actie nodig. De *'double trouble'* van klimaatverandering en oceaanzuivering is waarschijnlijk het meest overheersende milieuthema waarmee mensen in de nabije toekomst geconfronteerd zullen worden. Ondanks het feit dat oceaanzuivering wereldwijd merkbaar is en toeneemt, is het één van de minst begrepen fenomenen van alle veranderingen die wereldwijd plaatsvinden.

Dit artikel is eerder gepubliceerd in de Geographische Rundschau, nummer 2010/5

Voetnoten

1) Zie ook:

-Royal Society Report, via de link: <http://royalsociety.org/displaypagedoc.asp?id=13314>

-Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer, via de link: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf

-ESF sciencepolicybriefing 37: Impacts of Ocean Acidification, via de link: <http://www.esf.org/publications/policy-briefings.html>

-Monaco declaration, via de link: <http://ioc3.unesco.org/oanet/Symposium2008/MonacoDeclaration.pdf>

2) Het 'Anthropoceen' is een term die in het jaar 2000 door de Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen is geïntroduceerd voor de periode vanaf de late 18de eeuw, toen de industriële revolutie en andere menselijke activiteiten een significante impact op het globale klimaat en de ecosystemen begonnen te krijgen.