



Universiteit Utrecht

Faculteit Geowetenschappen



Oratie

Lang leve de zee

Caroline Slomp



Universiteit Utrecht

Lang leve de zee

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar in de Mariene Biogeochemie aan de Faculteit Geowetenschappen van de Universiteit Utrecht, op 16 september 2014 door Caroline Slomp

COLOFON

ISBN

978 90 6266 371 2

Uitgave

Universiteit Utrecht, 2014

Grafische verzorging

C&M (8539) – Faculteit Geowetenschappen – Universiteit Utrecht

Druk

Bergdrukkerij – Amersfoort

Omslag

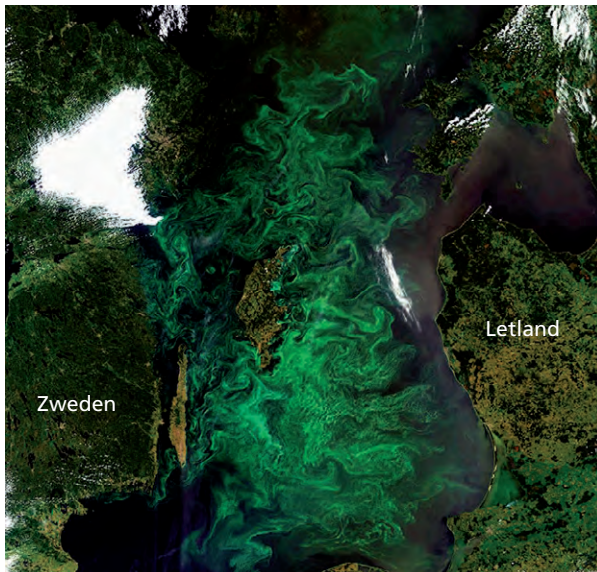
Het zeewater bij het Deense eiland Anholt in het Kattegat gefotografeerd door Nadine Quintana-Krupinski vanaf het schip de 'Manisha' op 28 september 2013 tijdens de IODP Baltic Sea Paleoenvironment Expedition 347.

Geachte Mijnheer de rector magnificus, beste vrienden, familie en collega's,

Inleiding

In het voor- en najaar ziet het water van de Oostzee, dat is de zee ten oosten van onze Noordzee, er schitterend uit. Prachtig blauw zeewater – als het niet zo koud was, zou je er zo in willen duiken. Maar zelfs in de zomer, als het zeewater iets warmer is kun je dat beter niet doen.

Dat komt omdat in de zomer een groot deel van de Oostzee verandert in een groene zee vol slierten en slijm (Figuur 1). De Oostzee heeft dan last van bloeien van cyanobacteriën, die ook wel blauwalgen worden genoemd. Bij direct contact kunnen die cyanobacteriën flinke gezondheidsproblemen veroorzaken, vooral als je wat zeewater binnenkrijgt. Dat is pech voor de bewoners van de vakantiehuisjes langs de kust van de Oostzee want

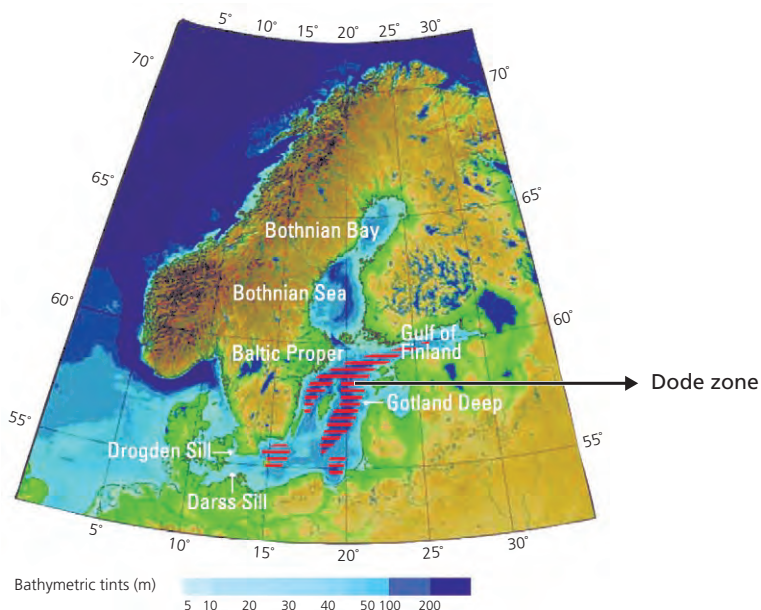


Figuur 1. Satelliet foto van een bloei van cyanobacteriën in de Oostzee in 2005 (Foto: European Space Agency)¹.

zwemmen is er dan niet meer bij. Nou èn, zou je dan wellicht zeggen, wel vervelend voor die Zweden en Finnen en voor wie daar verder ook woont, maar is dat zo'n halszaak?

Belangrijk is om te beseffen dat onder het wateroppervlak zich een nog veel groter, maar vrijwel onzichtbaar probleem kan ontwikkelen. Als algen dood gaan en naar de bodem zinken en gaan rotten wordt er zuurstof verbruikt. Als er dus heel veel algen naar de bodem zinken en de vraag naar zuurstof groter wordt dan de aanvoer van zuurstofrijk oppervlakte water via verticale menging, dan kan al het zuurstof opraken. En dan verdwijnt al het hoger leven, of anders gezegd, dan gaan de vissen, krabben en wormen die op en in de zeebodem leven dood.

In de Oostzee is de afgelopen eeuw zo een enorme 'dode zone' in het diepere water ontstaan met in de zomer een oppervlakte van anderhalf keer Nederland (Figuur 2). In die



Figuur 2. Kaart van de Oostzee met daarop met rode acering aangeven waar de 'dode zone' zich bevindt.

dode zone leeft, zoals gezegd, geen vis meer. Ook is het visbestand direct om de dode zone heen veranderd. Naast schade voor de ecologie en recreatie is er dus ook schade voor de visserij. En de Oostzee is niet de enige plek waar dit speelt: wereldwijd zijn de afgelopen eeuw meer dan 400 van dit soort zuurstofloze gebieden in zee ontstaan³.

Twee belangrijke vragen dringen zich op. Allereerst, waarom zijn die algenbloeien in de Oostzee en elders zo toegenomen? En ten tweede, wat kunnen we doen om te zorgen dat het water weer zuurstofrijk wordt tot aan de bodem?

Mariene Biogeochemie

Das zijn twee hele praktische vragen die je met kennis van mijn vakgebied, de Mariene Biogeochemie, kunt proberen te beantwoorden. Maar voordat ik dat doe, wil ik eerst iets meer over dat vakgebied vertellen. We bestuderen in de mariene biogeochemie de elementen die belangrijk zijn voor het leven in zee zoals koolstof, stikstof, fosfor, ijzer, silicium, zwavel en zuurstof. Naast uitgebreide kennis van de chemie en de niet-levende natuur, de geologie zeg maar, moet je als biogeochemicus ook inzicht hebben in wat levende organismen met die elementen doen, de biologie dus.

Vooral micro-organismen, spelen daarbij een belangrijke rol. Ze nemen elementen uit zeewater op om hun cellen te bouwen maar zorgen ook voor allerlei chemische omzettingen in hun leefmilieu in het zeewater en in de zeebodem. De grote uitdaging is om uit te zoeken welke processen dat precies zijn. Ook wil je weten hoe die processen gereguleerd worden, welke micro-organismen daarbij een rol spelen en hoe dit alles reageert op verstoringen. Dat kunnen natuurlijke verstoringen zijn, maar ook verstoringen die door mensen zijn veroorzaakt.

Daarbij wil je inzicht krijgen in de consequenties voor een regionale zee, zoals de Oostzee of Noordzee of een oceaan of zelfs de hele aarde. De bijbehorende tijdschalen kunnen variëren van uren of dagen tot miljoenen jaren. Daarbij moet je er rekening mee houden dat organismen in zee zich kunnen aanpassen aan een verandering in hun leefmilieu. Ook zijn er terugkoppelingen die veranderingen in zee kunnen versnellen of vertragen. En veel veranderingen zijn niet eenvoudig omkeerbaar: de weg terug naar de toestand vóór een verstoring kan zelfs afgesloten zijn. Hoe komt de zee van de toekomst er dan uit te zien?

Om dat allemaal te begrijpen gebruiken biogeochemici veldobservaties, experimenten en rekenmodellen. Die combinatie is essentieel. In veldobservaties zie je wat er werkelijk

buiten in de natuur gebeurt. Experimenten doe je om mechanismen te ontrafelen in omstandigheden die je zelf kunt manipuleren. En met rekenmodellen wil je alle kennis die je hebt integreren en je inzichten extrapoleren naar de schaal van een zee of oceaan. Met die rekenmodellen kan je ook kijken naar mogelijke scenarios voor de toekomst.

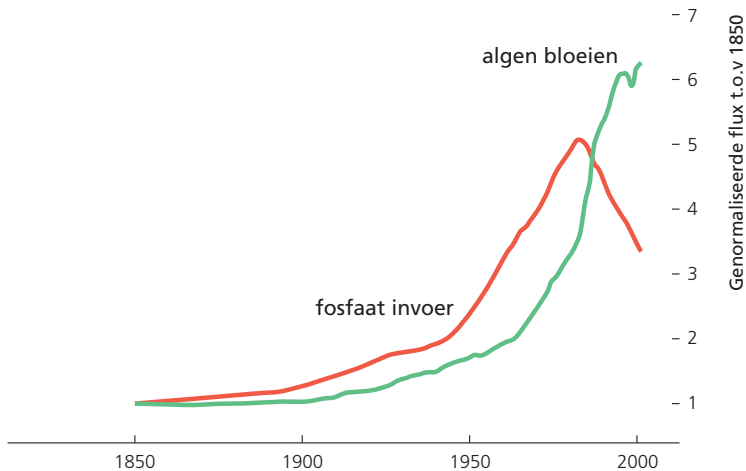
Wat metingen betreft profiteren we van recente innovaties in de chemie, fysica en microbiologie. Veel van de elementen waarin we geïnteresseerd zijn zijn maar in relatief lage concentraties in het zeewater en in de zeebodem aanwezig. Vroeger moest je daarom metingen doen aan relatief grote sediment- of watermonsters. Door de ontwikkeling van nieuwe meettechnieken kunnen we nu elementen in de zeebodem direct op microschaal meten en soms zelfs op nanoschaal, dat wil zeggen op een schaal van minder dan een tienduizendste millimeter. De apparatuur voor die metingen hebben we niet altijd zelf in huis. Zo reizen leden van mijn groep vaak af naar Grenoble, waar een speciale deeltjesversneller gebouwd is, de European Synchrotron Radiation Facility, afgekort ESRF. Daarmee kan röntgenstraling worden opgewekt die heel geschikt is voor onze chemische analyses⁴. Met dit soort onderzoek is een hele nieuwe wereld open gegaan.

Sommige mineralen in de zeebodem blijken in de cellen van bacteriën te vormen en niet als een neerslag in de poriën tussen sedimentkorrels⁵. Vanwege deze directe en sterke koppeling tussen microbiële processen en het gedrag van elementen in zee is het essentieel om beide tegelijk te onderzoeken. Op dat terrein is nog veel te ontdekken. Het vervolgens verwerken van die kennis in rekenmodellen is ook nog een echte uitdaging.

Het mooie is nu dat uit dit soort fundamenteel onderzoek eigenlijk als vanzelf ook antwoorden op maatschappelijk relevante vragen rollen. En ook al kun je niet altijd met de ontwikkelde kennis alle problemen oplossen, je kunt vaak wel de juiste oplossingsrichting aanwijzen of aangeven welke oplossingen zeker niet zullen werken.

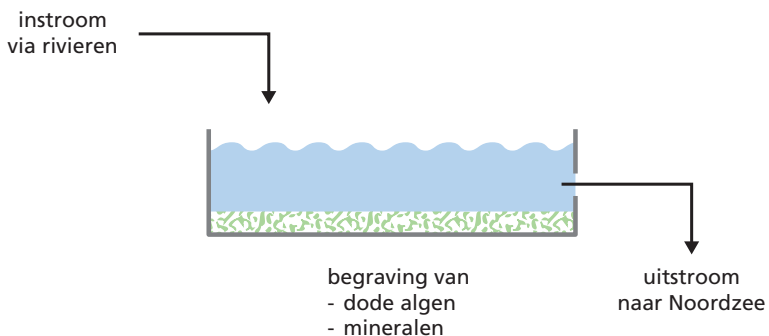
De fosfaatcyclus in de Oostzee

Laten we terugkeren naar dat voorbeeld van de Oostzee. Daarmee kan ik zowel onze onderzoeksaanpak als de praktische toepassing goed illustreren. We hadden daar een tweetal vragen geïdentificeerd. De eerste vraag was: waarom zijn die algenbloeien in de Oostzee de afgelopen eeuw zo toegenomen? Het antwoord is betrekkelijk simpel. Vanaf 1900, maar vooral sinds het einde van de Tweede Wereldoorlog lekken er wereldwijd steeds meer voedingsstoffen voor algen vanaf het land de zee in (Figuur 3).



Figuur 3. Rivierflux van fosfaat en algengroei in de Oostzee (genormaliseerd ten opzichte van 1850) zoals geschat voor 1850-2000⁶.

Het gaat dan om fosfaat en stikstof uit meststoffen en afvalwater. Algen hebben die twee stoffen nodig voor hun groei. In de Oostzee is vooral het fosfaat belangrijk omdat de cyanobacteriën, die daar iedere zomer waterkwaliteitsproblemen veroorzaken, zelf stikstof uit de lucht kunnen binden. Ze hebben dus alleen het fosfaat dat via de rivieren de zee in komt nodig. En die toegenomen instroom van fosfaat heeft geleid tot meer algengroei.



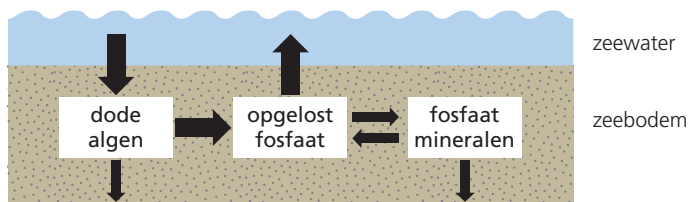
Figuur 4. Schematische voorstelling van de fosfaatbalans in de Oostzee.

Wel is het zo dat de instroom van fosfaat vanaf 1980 al sterk is afgenomen. Dat komt omdat het probleem in de 70-er jaren is onderkend. Vooral in Zweden en Finland is het afvalwater vanaf die tijd steeds beter gezuiverd van fosfaat. Maar in plaats van een afname in algenbloeien zien we nog steeds een toename. Wat is er aan de hand?

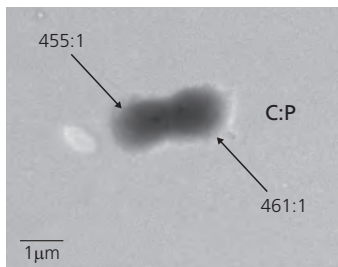
Om dat te verklaren moet je het lot van het fosfaat in de Oostzee begrijpen. Je kunt de zee voorstellen als een hele grote bak met water waar fosfaat via de rivieren in stroomt (Figuur 4). Er is ook een uitstroom van water met fosfaat naar de Noordzee, maar die uitstroom is voor de fosfaatbalans niet erg belangrijk, dus die negeren we hier verder. Wat vooral belangrijk is is de begraving in de zeebodem, op de bodem van de bak, zeg maar.

Fosfaat wordt daar begraven in de vorm van organisch materiaal – dat zijn de resten van dode algen en bacteriën, en in de vorm van fosfaatmineralen (Figuur 5). Bij de vorming van die mineralen gaat het fosfaat dat vrij komt uit algen een binding aan met andere elementen zoals calcium, mangaan en ijzer. Maar een probleem is dat de begraving van fosfaat geen gelijke tred houdt met de instroom van het fosfaat. De begraving is veel langzamer. Dat komt onder meer omdat de begraving van fosfaat gevoelig is voor de zuurstofconcentratie in het zeewater. Als de zuurstofconcentratie daalt wordt de begraving van fosfaat steeds minder efficiënt. Dat betekent dat het fosfaat niet in de zeebodem verdwijnt maar steeds opnieuw door algen hergebruikt kan worden.

Maar hoe werkt die afhankelijkheid van de begraving van fosfaat in dode algen als functie van de zuurstofconcentratie nou precies? Dankzij een beurs van de Zweedse stichting Baltic Sea 2020, opgericht door een Zweedse miljonaire met hart voor de waterkwaliteit in de Oostzee, kreeg ik zowel in 2007 als in 2008 voor 8 dagen de beschikking over het Zweedse onderzoeksschip de Skagerak. Dat gaf mij de kans de dynamiek van fosfaat in de zeebodem in de Oostzee te bestuderen. Van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek, afgekort NWO, had ik ook net een Vidi beurs gekregen. Dit



Figuur 5. De dynamiek van fosfaat in de zeebodem.

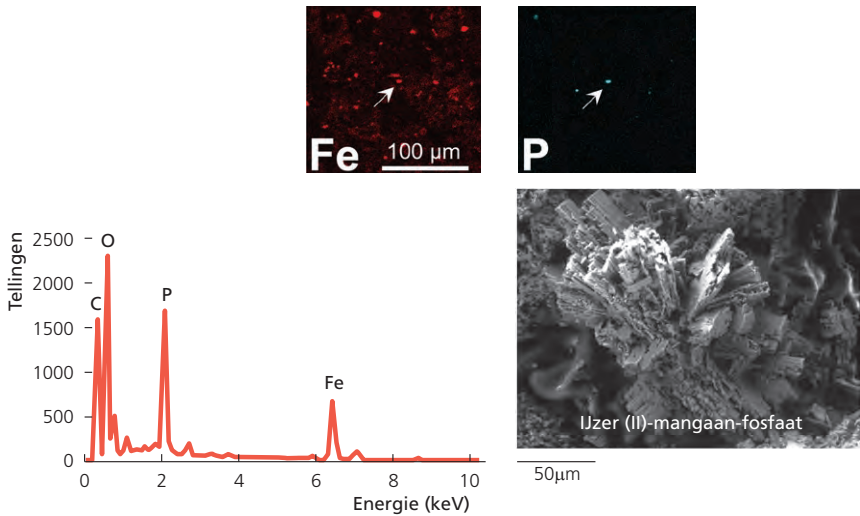


Figuur 6. *Delende microbiële cellen zoals te zien met röntgen-microanalyse en de bijbehorende gemeten verhouding van koolstof en fosfaat⁷.*

vornde het startpunt van een uitgebreid onderzoeksprogramma naar de biogeochemie van zuurstofloze gebieden in zee in samenwerking met andere onderzoekers in binnen- en buitenland.

Onze resultaten waren verrassend! We ontdekten bijvoorbeeld waarom fosfaat in een zuurstofloze zee uit dood algenmateriaal wegloopt. Dat komt omdat de micro-organismen die verantwoordelijk zijn voor de afbraak van de dode algen maar een deel van het fosfaat gebruiken. Bij algen is de gemiddelde verhouding van koolstof ten opzichte van fosfor gelijk aan 106, dat wil zeggen dat er per 106 koolstof atomen maar 1 fosfor atoom in een cel zit. Bacteriën bleken een veel hogere koolstof-fosfor verhouding te hebben van boven de 400⁷ (Figuur 6). Bacteriën hebben al het fosfaat dat in algen zit dus niet nodig. Sterker nog, het fosfaat zit in de weg als de bacteriën bij het koolstof in de dode algen willen komen. Ze proberen daarom het fosfaat actief kwijt te raken door enzymen uit te scheiden die het fosfaat vrijmaken uit het dode algen materiaal⁸.

Ook ontdekten we, door oude en nieuwe chemische onderzoekstechnieken, te combineren, dat er minder en andere fosfaatmineralen in de zeebodem vormen dan verwacht (Figuur 7). Zo vonden we bijvoorbeeld dat in de zuurstofloze sedimenten veel fosfaat geassocieerd was met gereduceerd ijzer en mangaan. Ook zagen we dat de vorming van deze mineralen in de zeebodem in de diepere delen van de Oostzee de afgelopen decennia is afgenomen. Wij vermoeden dat de afname een direct gevolg is van de uitbreiding van de zuurstofloosheid⁹. In het zeewater van de Oostzee vind je namelijk als gevolg van de zuurstofloosheid steeds meer waterstofsulfide. Dat is een heel giftig gas dat naar rotte eieren ruikt. Sulfide reageert met ijzer en vormt dan ijzersulfidemineralen.

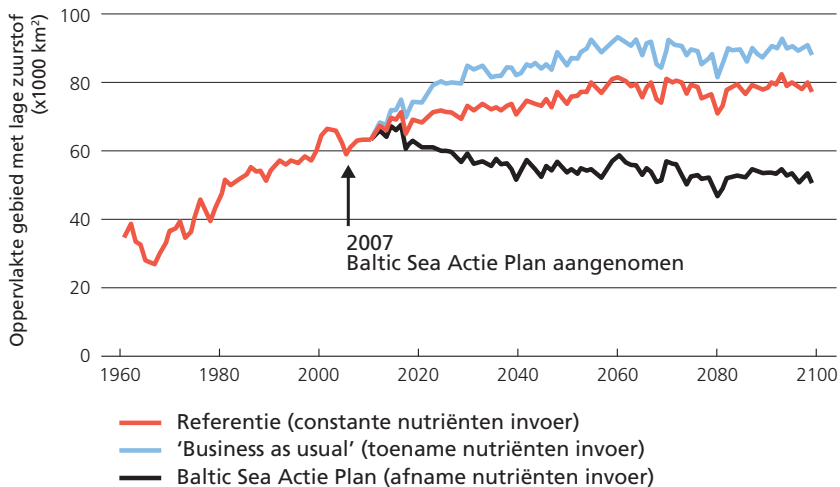


Figuur 7. (Links en boven) Aanrijkingen van ijzer en fosfor in sulfide-rijke Oostzee sedimenten zoals gemeten met een electron microprobe-EDS⁹. (Rechts) IJzer(II)-mangaan-fosfaat uit de Oostzee zoals te zien met een electronen microscoop (Opname: Nikki Dijkstra).

En als al het ijzer opgesloten zit in ijzersulfidemineralen kan het ijzer niet meer met fosfaat ijzerfosfaatmineralen vormen.

We weten dus nu waarom de begraving van fosfaat in algen afneemt met lage zuurstof en hoe het komt dat het resterende fosfaat maar heel langzaam in mineralen begraven wordt. En daar zitten we dan met een zee zonder zuurstof maar tjokvol fosfaat en vervelende algenbloeien. Wat kunnen we nu doen om te zorgen dat het water weer zuurstofrijk wordt?

In Zweden wordt daar veel onderzoek naar gedaan. Er is bijvoorbeeld geopperd om de Oostzee te beluchten met door windmolens aangedreven pompen. Ook is er een serieus voorstel om chemicaliën aan de zee toe te voegen om het fosfaat neer te laten slaan op de zeebodem. Aan alle voorgestelde methoden tot dus ver kleven grote bezwaren. Een belangrijk bezwaar is de schaal: je hebt bijvoorbeeld enorm veel pompen en chemicaliën nodig en het is dus erg duur. Daarnaast zijn er grote onzekerheden voor wat betreft de overige milieueffecten¹⁰. De simpelste en beste oplossing is om de instroom van



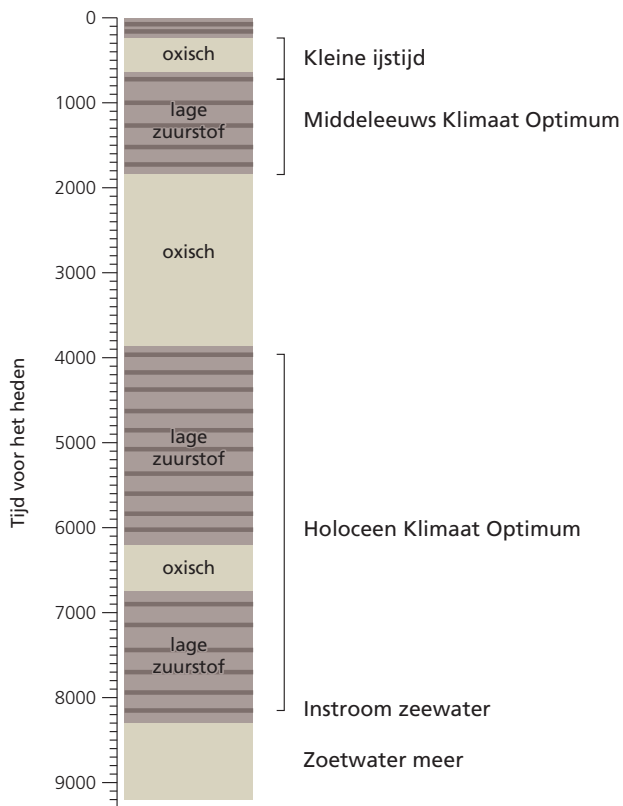
Figuur 8. Oppervlakte van het gebied in de Oostzee met lage zuurstof voor drie mogelijke toekomstscenarios zoals berekend met modellen¹¹.

fosfaat van het land verder te beperken en dan te wachten tot het fosfaat helemaal in de zeebodem verdwenen is. Maar ja, hoe lang duurt het dan voordat je van het fosfaat en die zuurstofloosheid af bent?

Mijn collega's in Zweden hebben dat met biogeochemische modellen voor de Oostzee uit proberen te rekenen voor de periode van 1960 tot 2100 (Figuur 8)¹¹. Ze zijn daarbij uitgegaan van drie verschillende scenarios voor wat betreft de instroom van fosfaat van het land. Het vervalende is dat zelfs bij het meest gunstige scenario het deel van de zee dat last heeft van lage zuurstofconcentraties en zuurstofloosheid nog heel groot blijft. In alle modelberekeningen is ook meegenomen dat de aarde warmer aan het worden is. Dat vergroot het probleem van zuurstofloosheid, want warm water drijft op koud water en dan mengt het water dus niet goed. Ook lost zuurstof in warm water minder goed op dan in koud water. Het ziet er niet goed uit: het lijkt erop dat we over ruim 80 jaar nog niet uit de problemen zijn.

Wel zijn er nog grote onzekerheden in deze voorspellingen. Modellen maken gebruik van een versimpelde en schematische kwantitatieve synthese van onze kennis op een bepaald

moment. Je moet ze eigenlijk altijd heel uitgebreid toetsen aan veldgegevens. Maar in de Oostzee zijn de benodigde gegevens pas vanaf 1960 systematisch verzameld. Gelukkig is er ook een andere bron van informatie. Dat is de zeebodem oftewel het sediment archief.



Figuur 9. Eerdere perioden met lage zuurstof in de Oostzee en de bijbehorende veranderingen in het klimaat over de afgelopen 8000 jaar².

De zeebodem als archief

De zeebodem registreert namelijk wat er in het bovenstaande zeewater gebeurt. (Figuur 9) In zeewater zweven allerlei deeltjes. Een deel daarvan bezinkt op de zeebodem. Zo groeit de zeebodem ieder jaar een klein beetje aan. In de Oostzee zijn er zo over de afgelopen 8000 jaar op sommige plekken zelfs tientallen meters sediment afgezet. Door die sedimenten in detail te analyseren kun je aflezen hoe de Oostzee er vroeger uit zag. Als we op die manier terugkijken in de tijd zien we dat er al twee keer eerder langere perioden van zuurstofloosheid in de Oostzee geweest zijn.

De eerste periode begon zo'n 8000 jaar geleden, toen de Oostzee in zijn huidige vorm ontstond. De Oostzee was namelijk eerst helemaal geen zee. Twintig duizend jaar geleden was de Oostzee zelfs vrijwel helemaal bedekt door een grote ijskap die tot in Nederland reikte. Toen de ijskap smolt ontstond eerst een zoetwater meer. Het smeltende ijs zorgde er ook voor dat de zeespiegel rees. En zo'n 8000 jaar geleden stroomde bij Denemarken zeewater de Oostzee in en werd het water voor het eerst brak. Omdat zoutwater zwaarder is dan zoetwater was de Oostzee direct een sterk gelaagde, slecht gemengde zee. Direct na de ijstijd werd het klimaat ook nog eens erg warm en dat zorgde ook voor minder menging van het water. Op basis van de fossiele samenstelling en chemie van de sedimenten kunnen we nu zeggen dat het zeewater in de diepere bekkens van de zee, op korte onderbrekingen na, bijna vierduizend jaar lang zuurstofloos was^{12, 13}. Ook waren er veel cyanobacteriën, diezelfde algensoort die nu ook zoveel waterkwaliteitsproblemen veroorzaakt¹⁴ en werd het fosfaat in het zeewater heel efficiënt hergebruikt¹³.

Vierduizend jaar geleden veranderde dat: de zuurstofloosheid verdween vrij plotseling. We vermoeden dat dat kwam omdat het klimaat toen kouder werd. Zoals eerder gezegd: als water kouder is lost er meer zuurstof in op. Ook mengt het beter. Belangrijk was dat de Oostzee ook minder zout werd. Dat kwam omdat de verbinding tussen de Oostzee en Noordzee geleidelijk ondieper werd. Daardoor stroomde er steeds minder zoutwater de Oostzee in. Minder zoutwater betekent dat het water gemakkelijker mengt en dus ook dat het bodemwater zuurstoffrijker wordt.

Maar rond de Middeleeuwen kwam de zuurstofloosheid weer terug. We denken dat dit ook weer samenhang met een tijdelijk warmer klimaat^{12, 15}. Deze warme periode, die het 'Middeleeuws Klimaatoptimum' genoemd wordt, en duurde tot ca. 1300, maakte wijnbouw mogelijk in wat nu Nederland is. Ook zorgde het voor een sterke uitbreiding van de landbouw in de gebieden rondom de Oostzee. Bossen werden gekapt en omgezet in akkers en weilanden. Een nog onbewezen hypothese van Zweedse onderzoekers is dat

de intensieve landbouw leidde tot afspoeling van fosfaatrijke bodemdeeltjes van het land naar de zee. Deze middeleeuwse nutriënten-instroom zou in deze theorie een belangrijke oorzaak zijn van de bloeien van cyanobacteriën die ook nu optraden en de daarmee samenhangende zuurstofloosheid¹⁶.

Uit de sedimenten kunnen we aflezen dat de zuurstofloosheid in de Oostzee ook nu snel verdween, mogelijk zelfs binnen slechts enkele tientallen jaren^{12, 13}. Voor dat herstel na de Middeleeuwen zijn ook weer meerdere theoriën. Bijvoorbeeld, rond die tijd brak in Europa de pest uit. De bevolking in Zweden nam sterk af. Veel landbouwgebieden rondom de Oostzee werden verlaten en veranderden weer in bosgebieden¹⁶. Tegelijkertijd werd het klimaat ook weer kouder. Deze koudere periode, die duurde van de 15de tot de 19e eeuw staat ook wel bekend als de kleine ijstijd¹⁷.

We zien dus twee eerdere perioden van zuurstofloosheid die enkele verschillen maar ook veel overeenkomsten vertonen met de moderne periode van zuurstofloosheid. Belangrijke overeenkomsten zijn dat in alle perioden efficiënt hergebruik van fosfaat en een relatief warm klimaat bijdroegen aan grote bloeien van cyanobacteriën. Deze cyanobacteriën spelen iedere keer weer een hoofdrol bij de ontwikkeling van de zuurstofloosheid. Een verschil is dat de zuurstofloosheid zich nu veel sneller heeft ontwikkeld dan in het verleden. Verder valt op dat herstel van de zuurstofloosheid in het verleden altijd samen ging met het kouder worden van het klimaat. Ons klimaat zal in de nabije toekomst waarschijnlijk alleen maar warmer worden.

Maar er zijn nog veel vragen te beantwoorden. Om daaraan bij te dragen ben ik vorig jaar twee maanden meegevoerd op een expeditie naar de Oostzee in het kader van het International Ocean Discovery Program, afgekort, IODP¹⁸. Met deelnemers uit de hele wereld hebben we op 7 locaties in de Oostzee sedimentkernen genomen met een maximale lengte van zo'n 220 meter. Met het unieke materiaal van deze expeditie hoop ik met mijn groep de komende jaren verder bij te dragen aan een beter begrip van de condities die leiden tot zuurstofloosheid in de Oostzee.

Met die nieuwe veldgegevens willen we, samen met Zweedse collega's, de biogeochemische modellen voor de Oostzee toepassen op de eerdere periodes van zuurstofloosheid. Ons einddoel is om de biogeochemische geschiedenis van de Oostzee over de afgelopen 8000 jaar kwantitatief te beschrijven. Het mooie is dat de daarbij verkregen kennis niet alleen helpt bij het inschatten van hoe lang de Oostzee nu nog zuurstofloos blijft. Zoals ik eerder aangaf is zuurstofloosheid een algemeen probleem

in heel veel kustgebieden wereldwijd. Wat wij ontdekken heeft dus een veel breder wetenschappelijk en praktisch belang.

De zee in het verdere verleden

Zuurstofloosheid in zee is ook niet uniek als je nog verder terug gaat in de tijd. Dat weten we door ook nog oudere afzettingen uit zee chemisch te onderzoeken. Die afzettingen kun je vinden als je nog dieper de zeebodem in boort dan we in de Oostzee gedaan hebben. Je kunt hele oude zeebodems ook op het land vinden en met een hamer en handboor bemonsteren (Figuur 10).

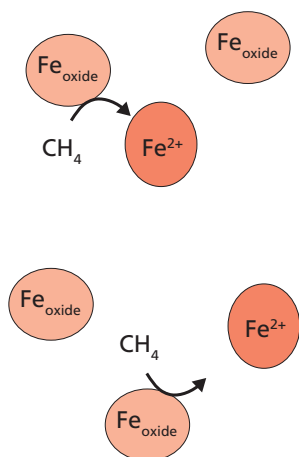
Op basis van de chemie van dat soort afzettingen weten we dat er meerdere perioden zijn geweest waarin grote delen van de oceaan zuurstofloos waren. Zo was 94 miljoen jaar geleden, in de geologische periode die we het Krijt noemen, een groot deel van de Atlantische oceaan enkele honderdduizenden jaren zuurstofloos¹⁹. En hoewel de ruimtelijke schaal en duur van de zuurstofloosheid niet te vergelijken zijn met die van



Figuur 10. De zeebodem van het Krijt, zoals te zien bij Furlo, Italië (Foto: Niels van Helmond).

de huidige Oostzee, en het klimaat in het Krijt veel warmer was dan nu, zijn er verder verrassend veel parallellen. Zo hebben mijn Utrechtse collega's van organische geochemie op meerdere plaatsen in de Atlantische oceaan indicator-moleculen gevonden voor stikstofbindende cyanobacteriën²⁰. Ook weten we dat het fosfaat net als in de Oostzee zeer efficiënt hergebruikt werd en vermoeden we dat dit bijdroeg aan de zuurstofloosheid^{20, 21, 22}.

Maar anders dan in de Oostzee is er veel discussie over de mate waarin het zeewater vertikaal werd gemengd. Sommige onderzoekers denken dat die menging heel sterk was. Anderen menen dat dat niet samen kan gaan met zuurstofloosheid omdat een sterke menging ook zal zorgen voor een betere beluchting. Met mijn groep heb ik de afgelopen jaren daar met rekenmodellen meer inzicht in proberen te krijgen. Ons werk suggereert dat intensieve verticale menging van het zeewater en uitgebreide zuurstofloosheid bij de zeebodem elkaar uitsluiten^{22, 23}. Kortgezegd, een relatief slechte menging van het water was ook in het Krijt een vereiste voor de ontwikkeling van zuurstofloosheid.



Figuur 11. (Links) Schematische voorstelling van de reactie van methaan met ijzeroxiden in de zeebodem en de vorming van opgelost ijzer. (Rechts) Deel van een sediment kern uit de Oostzee (Foto: IODP¹⁸).

Veranderingen in het sedimentarchief

Bij het onderzoek aan dit soort oude sedimentmonsters, moet je altijd de vraag stellen of de chemische signalen die je ziet wel echte signalen zijn. Soms zijn de echte signalen namelijk gewist. Dat kan tijdens de begraving in de zeebodem gebeuren maar ook tijdens het nemen van de monsters of in de monsteropslag. Als je daar verder niet op let, kan het gebeuren dat je totaal verkeerde conclusies trekt.

Vooral het element ijzer is heel gevoelig voor verandering. Zuurstofrijke sedimenten zijn vaak bruin of roestbruin. Het ijzer is daar aanwezig in de vorm van ijzeroxiden. Diep in de zeebodem wordt vaak uit langzaam rottend organisch materiaal methaangas gevormd. Dat methaan kan zich via diffusie verplaatsen en zo in contact komen met andere sedimentlagen waar ijzeroxiden in zitten (Figuur 11). Sinds kort weten we dat dat methaan direct met die ijzeroxiden kan reageren^{24,25}. Daarbij verdwijnen zowel de ijzeroxiden als het methaan en kunnen allerlei nieuwe mineralen in de zeebodem ontstaan. Uitzoeken hoe dat precies werkt is een belangrijk doel in mijn door de Europese Unie gefinancierde ‘ERC Starting Grant’.

Het ijzer in de zeebodem is ook heel gevoelig voor de wijze waarop je de monsters bewaart. Zuurstofloze sedimenten zijn vaak zwart. Dat is de kleur van ijzersulfides. Als je monsters van de zeebodem uit een zuurstofloosgebied in het laboratorium blootstelt aan de lucht zullen de ijzer-sulfides reageren met zuurstof en omvormen tot ijzer-oxiden. Omdat daarbij zuur vrij komt, kunnen ook allerlei andere mineralen gemakkelijk in oplossing gaan, zoals kalk en het calciumfosfaatmineraal apatiet²⁶.

Deze verandering van monsters na monsternamen is geen triviaal probleem. Voor onderzoek aan de zeebodem van het verleden probeer je waar mogelijk monsters die al beschikbaar zijn te gebruiken, want onderzoek op zee is duur. Je hebt vaak grote schepen nodig en je moet diep in de zeebodem kunnen boren. Helaas zijn vrijwel alle monsters die de afgelopen vijftig jaar door het eerder genoemde IODP genomen zijn tijdens de opslag blootgesteld aan de lucht. Voor veel gedetailleerd chemisch werk aan elementendynamiek zijn die monsters niet langer geschikt.

Voor mijn onderzoek kan ik daarom niet zonder nieuwe monsternamen op zee. In mijn door NWO eerder dit jaar toegekende Vici voorstel is daarom ook budget gereserveerd voor twee expedities met het Nederlandse onderzoeksschip de Pelagia. Dat werk zal zich specifiek richten op de dynamiek van ijzer in het zeewater en de zeebodem van de Zwarte Zee en Oostzee.



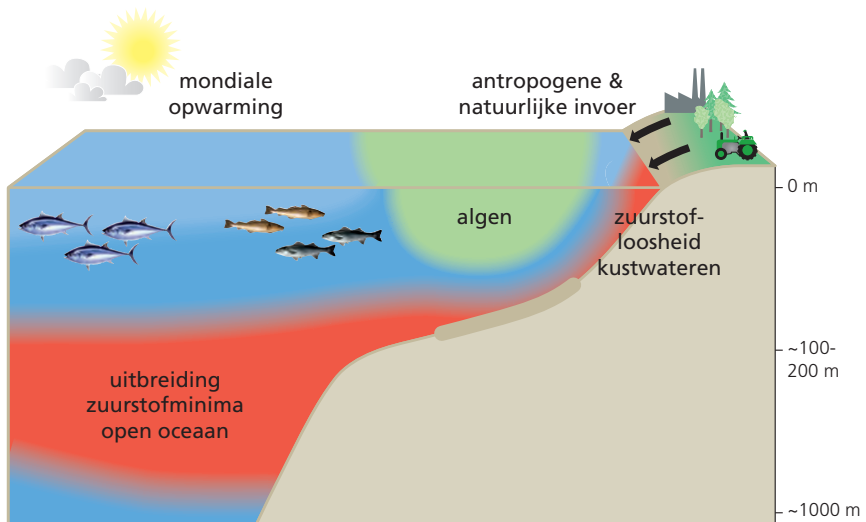
Fig. 12. *De Pelagia bij het Scheepvaartmuseum in Amsterdam (Foto: Freddy Hiemstra).*

Eerder dit jaar lag de Pelagia bij het Scheepvaartmuseum in Amsterdam. Het lag naast een replica van het VOC schip de Amsterdam en je kon, als je dat wilde, beide schepen op dezelfde dag bezoeken en bewonderen (Figuur 12). Het VOC schip ligt daar permanent aan de kade en is een mooie herinnering aan een periode van overzeese handel door Nederlanders. De Pelagia lag daar tijdelijk voor anderhalve week, en vertrok kort daarna voor onderzoek naar de Noorse zee.

De beschikbaarheid van dit enige Nederlandse schip voor oceaanonderzoek wordt helaas bedreigd door een gebrek aan structurele overheidsfinanciering. Eerder dit jaar was in een Nederlandse krant te lezen dat voor de financiering van het schip samenwerking met bedrijven wordt gezocht²⁷. Commerciële verhuur klinkt als een goed idee maar zal de beschikbaarheid van het schip voor door de overheid gefinancierd wetenschappelijk onderzoek beperken. Als de Pelagia, noodgedwongen, zo feitelijk een handelsschip wordt of wellicht zelfs op de langere termijn een permanent museumstuk dan heeft dat verstreckende gevolgen voor het zeeonderzoek in Nederland. We horen nu als zeeonderzoekers bij de wereldtop maar, zonder toegang tot eigen zeegaande onderzoeksfaciliteiten is er een groot risico dat wij onze leidende rol zullen inwisselen voor een plek in de achterhoede. Dat is een positie die een zeevarende natie als Nederland onwaardig is.

De toekomst van de oceaan

In mijn rede heb ik geschetst hoe door toedoen van de mens de chemie van de zee en in het bijzonder de zuurstofconcentratie in het zeewater sterk aan het veranderen is. Ik heb het vooral gehad over kustwateren, maar de veranderingen blijven daar niet toe beperkt. Zo weten we sinds kort dat zuurstofconcentraties in de oceaan ook aan het dalen zijn. Van nature komen daar zuurstofminima voor, dat zijn gebieden met een lage zuurstofconcentratie in het zeewater. Dat heeft vooral te maken met de stromingspatronen van het zeewater: de zuurstofaanvoer is daardoor van nature onvoldoende om het zuurstofverbruik volledig te compenseren. Systematische metingen vanaf 1960 laten zien dat de zuurstofconcentraties in de zuurstofminima van de Atlantische en Stille Oceaan aan het dalen zijn. Ook is het volume van het zeewater waarin de zuurstofconcentratie laag is aan het toenemen²⁸. De verwachting is dat verdere opwarming van de aarde dit zal versterken. Resultaten van oceaanmodellen suggereren dat de daling in zuurstofconcentraties die nu is ingezet nog duizenden jaren zal doorgaan²⁹.



Figuur 13. Schematische voorstelling van de uitbreiding van zuurstofminima in de kustzone en open oceaan²⁸.

Hoewel we waarschijnlijk niet naar dezelfde extreme situatie toegaan als in de Atlantische Oceaan in het Krijt, lijkt het erop dat de oceaan van de toekomst veel minder zuurstof zal bevatten dan de huidige oceaan. Minder zuurstof in het zeewater zal verregaande consequenties hebben voor het leven in zee²⁸.

Dankwoord

Wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de geowetenschappen doe je nooit alleen; het is een gezamenlijke ontdekkingsreis in teams bestaande uit studenten, analisten en jonge en ervaren onderzoekers uit meerdere disciplines en vele landen, steeds in een wisselende samenstelling. Wat ons verbindt is een gedeelde fascinatie en gezamenlijk doel: begrijpen hoe de aarde werkt.

Werken aan een universiteit is daarbij een groot voorrecht. Het is iedere dag weer een groot plezier om direct betrokken te zijn bij de opleiding van nieuwe lichten aardwetenschappers. En ik hoop altijd dat de studenten dan even enthousiast over het vak worden als ik. Vanaf dit komend collegejaar starten we met de Master Mariene Wetenschappen. Hiermee is er voor het eerst een opleiding in Nederland waarin studenten met alle aspecten van het zeeonderzoek kennis maken. Dat is essentieel omdat veel ontdekkingen in de aardwetenschappen plaatsvinden op grensvlakken van disciplines. Belangrijk is dat studenten tijdens de opleiding hun eigen specifieke niche zien te vinden maar ook dat ze een brede blik ontwikkelen en leren samenwerken.

Ik sta hier vandaag ook dankzij twintig jaar succesvolle samenwerking met promovendi, postdocs en andere collega's in binnen- en buitenland. Voor die samenwerking ben ik allen zeer dankbaar. Het is voor mij onmogelijk om iedereen te noemen, maar één persoon kan ik niet onbenoemd laten. Dat is mijn co-promotor, Wim van Raaphorst. Dankzij Wim trad ik in 1991 als onderzoeker-in-opleiding in dienst van het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee, kortgezegd, het NIOZ op Texel. Als student Bodemkunde aan Wageningen Universiteit was ik in mijn laatste studiejaar gefascineerd geraakt door het boek 'Early diagenesis' van de Amerikaanse geochemicus Robert Berner. Dat zeer leesbare boek laat zien hoe je de chemie van sedimenten in simpele wiskundige vergelijkingen kunt beschrijven. Met mijn aanstelling op het NIOZ ging mijn wens in vervulling om praktisch geochemisch onderzoek met het ontwikkelen en toepassen van modellen te combineren. Ook maakte ik voor het eerst mee hoe geweldig zeegaand onderzoek is. Voor mijn ontwikkeling als zelfstandig onderzoeker was die periode van vier jaar in de groep

van Wim cruciaal. Met een klein team en met vrij beperkte middelen, wisten wij, ook naar de huidige maatstaven, onderzoek van hoog niveau te doen.

Ik dank de bestuurders van de Universiteit Utrecht voor het vertrouwen dat zij, met deze benoeming, in mij stellen. Voor wat betreft de toekomst zie ik uit naar de verdere samenwerking met mijn Utrechtse collega's bij Aardwetenschappen, mijn collega's in Nijmegen, op Texel, in Zweden en elders. Mijn ouders wil ik bedanken voor de steun en het voorbeeld dat ze mij met hun keuzes in het leven altijd gegeven hebben. Ik dank mijn man Luc en zoon Huub voor hun liefde en steun. Ik dank u voor uw aandacht.

Ik heb gezegd.

Referenties

1. European Space Agency (ESA). <https://earth.esa.int/web/guest/home>
2. Conley, D. Bonsdorff E., Carstensen J., Destouni G, Gustafsson B.G., Hansson L-A., Rabalais N.N., Voss M., Zillen, L. (2009) Tackling hypoxia in the Baltic Sea: Is engineering a solution? *Environmental Science & Technology* 43: 3407-3411.
3. Diaz R.J., Rosenberg R. (2008) Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321: 926-929.
4. Diaz J., Ingall E., Benitez-Nelson C., Paterson D., de Jonge M.D., McNulty I. and Brandes J.A. (2008) Marine polyphosphate: a key player in geologic phosphorus sequestration. *Science* 320: 652-655.
5. Milucka J., Ferdelman T.G., Polerecky L., Franzke D., Wegener G., Schmid M., Lieberwirth I., Wagner M., Widdel F and Kuypers M.M.M. (2012) Zero-valent sulphur is a key intermediate in marine methane oxidation. *Nature* 491: 541-546.
6. Gustafsson, B.G., Schenk, F., Blenckner, T., Eilola, K., Meier, H.E.M., Mueller-Karulis, B., Neumann, T., Ruoho-Airola, T., Savchuk, O.P., Zorita, E. (2012) Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850 – 2006. *Ambio* 41: 534-548.
7. Steenbergh A.K., Bodelier P.L.E., Haldal M., Slomp C.P., Laanbroek H.J. (2013) Does microbial stoichiometry modulate eutrophication of aquatic systems? *Environmental Microbiology* 15: 1572-1579.
8. Steenbergh A.K., Bodelier P.L.E., Hoogveld H.L., Slomp C.P., Laanbroek H.J. (2011) Phosphatases relieve carbon limitation of microbial activity in Baltic Sea sediments along a redox-gradient. *Limnology and Oceanography* 56: 2018-2026.
9. Jilbert, T., Slomp, C.P. (2013) Iron and manganese shuttles control the formation of authigenic phosphorus minerals in the euxinic basins of the Baltic Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 107: 155-169.
10. Conley, D.J. (2012) Save the Baltic Sea. *Nature* 7404: 463-464.
11. Meier, H.E.M., Andersson, H.C., Eilola, K., Gustafsson, B.G., Kuznetsov, I., Muller-Karulis, B., Neumann, T., Savchuk, O.P. (2011) Hypoxia in future climates: A model ensemble study for the Baltic Sea. *Geophysical Research Letters* 38: L24608.
12. Zillen, L., Conley, D.J., Andren, T., Andren, E. Bjork, S. (2008) Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth Science Reviews* 91: 77-92.
13. Jilbert, T., Slomp, C.P. (2013) Rapid high-amplitude variability in Baltic Sea hypoxia during the Holocene. *Geology* 41: 1183-1186.
14. Funkey, C. P., Conley, D. J., Reuss, N. S., Humborg, C., Jilbert, T., Slomp, C. P., 2014, Hypoxia Sustains Cyanobacteria Blooms in the Baltic Sea: *Environmental Science & Technology* 48: 2598-2602.

15. Kabel, K., Moros, M., Porsche, C., Neumann, T., Adolphi, F., Andersen, T.J., Siegel, H., Gerth, M., Leipe, T., Jansen, E., Damste, J.S.S. (2012) Impact of climate change on the Baltic Sea ecosystem over the past 1,000 years. *Nature Climate Change* 2: 871-874.
16. Zillen L., Conley, D.J. (2010) Hypoxia and cyanobacteria blooms – are they really natural features of the late Holocene history of the Baltic Sea? *Biogeosciences* 7: 2567-2580.
17. Ruddiman, W.F. (2014) *Earth's Climate. Past and Future*. 3rd edition. WH Freeman Company. 445p.
18. <http://www.iodp.org/>
19. Schlanger, S.O., Jenkyns, H.C. (1976) Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, 55: 179-184.
20. Kuypers, M.M.M., van Breugel, Y., Schouten, S., Erba, E., Damsté, J.S.S. (2004b), N₂-fixing cyanobacteria supplied nutrient N for Cretaceous oceanic anoxic events. *Geology*, 32, 853-856.
21. Mort, H.P., Adatte, T., Föllmi, K.B., Keller, G., Steinmann, P., Matera, V., Berner, Z., Stuben, D. (2007) Phosphorus and the roles of productivity and nutrient recycling during oceanic anoxic event 2. *Geology* 35: 483-486.
22. Tsandev I., Slomp, C.P. (2009) Modeling phosphorus cycling and carbon burial during Cretaceous Oceanic Anoxic Events. *Earth and Planetary Science Letters* 286: 71-79.
23. Ruvalcaba Baroni I., Topper, R.P.M., van Helmond, N.A.G.M., Brinkhuis, H., Slomp, C.P. (2014) Biogeochemistry of the North Atlantic during oceanic anoxic event 2: role of changes in ocean circulation and phosphorus input. *Biogeosciences* 11: 977-993.
24. Beal, E.J., House, C.H., Orphan, V.J. (2009) Manganese- and iron-dependent marine methane oxidation. *Science* 325: 184-187.
25. Slomp C.P., Mort, H.P., Jilbert, T., Reed, D.C., Gustafsson, B.G., Wolthers, M. (2013) Coupled dynamics of iron and phosphorus in sediments of an oligotrophic coastal basin and the impact of anaerobic oxidation of methane: *PLoS ONE*, 8, p. e62386.
26. Kraal P., Slomp C.P., Forster A., Kuypers M.M.M., Sluijs A. (2009) Pyrite oxidation during sample storage determines phosphorus fractionation in carbonate-poor anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: 3277-3290.
27. NRC Handelsblad 26 juni 2014. Onderzoeksschip naast 'Amsterdam'.
28. Stramma, L., Schmidtko, S., Levin, L.A., Johnson, G.C. (2010) Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Research I* 57: 587-595.
29. Shaffer, G., Olsen, S.M., Perdersen, J.O.P. (2009) Long term oxygen depletion in response to carbon dioxide emissions from fossil fuels. *Nature* 2: 105-108.



Prof. dr. ir. Caroline Slomp (1967) werd geboren in Khairagali, Pakistan. Zij studeerde bodemkunde aan Wageningen Universiteit waar zij in 1997 ook promoveerde. Haar promotie-onderzoek aan de chemie van de Noordzee-bodem deed zij bij het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) op Texel. Na een korte periode als postdoc aan Wageningen Universiteit, trad zij in 1998 als postdoc in dienst bij de Universiteit Utrecht (UU). In 2004 en 2006 volgden aanstellingen aan de UU als universitair docent en universitair hoofddocent. Voor haar onderzoek aan elementencycli in grondwater en de zee ontving zij diverse persoonlijke beurzen (o.a. KNAW Akademie onderzoeker, ERC Starting grant, NWO Vidi, NWO Vici).

Per 1 maart 2013 is zij benoemd als hoogleraar Mariene Biogeochemie bij de Faculteit Geowetenschappen van Universiteit Utrecht. In het vakgebied van de mariene biogeochemie wordt kennis uit de biologie, geologie en chemie gecombineerd. De aandacht gaat daarbij uit naar elementen die belangrijk zijn voor het leven in zee.

In haar oratie 'Lang leve de zee' bespreekt Caroline Slomp recente veranderingen in de chemie van de zee en plaatst deze in een geologisch perspectief. Als voorbeeld beschrijft zij de situatie in de Oostzee waar de afgelopen eeuw een enorme zuurstofloze zone in het diepere water is ontstaan. Ze laat zien dat zuurstofloosheid in zee niet uniek is voor onze tijd en bespreekt wat de oorzaken zijn van dit soort 'dode zones' in zee en wat je eraan zou kunnen doen.