

Overzomereren in Finland?

Vrijkomend methaan als opwarmer van het wereldklimaat

door Dr. Bernd Andeweg

Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit
bernd.andeweg@falw.vu.nl

De afgelopen zomer overtrof in temperatuur alle toch ook niet kinderachtig warme zomers uit het laatste decennium. Behalve extreem warm was het ook erg droog. Rijn en Maas haalden een nieuw record in het laagtepeil, boten kunnen haast niet meer varen en koelwater voor de energiecentrales wordt schaars. Brak water dringt West-Nederland binnen, dijken beginnen spontaan te schuiven. Een voorbode van wat ons te wachten staat in de nabije toekomst? Hebben wij straks een vakantiehuisje aan de Finse Riviëra om wat afkoeling te zoeken in de zomer? Prof. Dick Kroon, paleoklimatoloog aan de Vrije Universiteit, waarschuwt ervoor dat klimaatverandering ons, maar zeker onze kinderen en kleinkinderen parten gaat spelen. "De verandering speelt op veel kortere tijdschaal dan mensen zich realiseren. En als we wereldwijd klimaatverandering op gang brengen, is er geen houden meer aan!". Waar haalt Kroon die stelligheid vandaan? Uit de bodem van de oceaan, waar 55 miljoen jaar geleden een plotselinge opwarming van de aarde zijn sporen duidelijk heeft nagelaten.

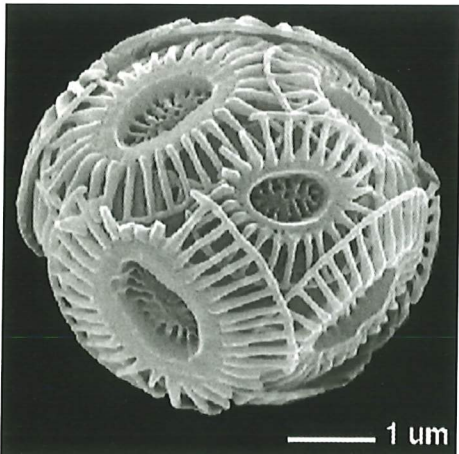
De oceaanbodem bestaat niet uit zand en klei. Rivieren voeren wel zand en klei naar zee, maar veel daarvan blijft in ondiepe wateren, zoals de Noordzee of Waddenzee achter. Slechts een klein deel bereikt de open oceaan. Ook ijsbergen en de wind

vervoeren sediment naar zee, maar uiteindelijk bestaat nog geen 20% van het sediment dat op de oceaanbodem terecht komt uit klei en zand. Nee, de oceaanbodem bestaat eerder uit een dikke laag kalkmodder, eigenlijk is het een enorm kerkhof van plankton. Of beter gezegd: van de kalkskeletjes van deze organismen. Het is meteen ook onze volledige documentatie van hoe in de geologische geschiedenis het klimaat op aarde varieerde voor de mens van invloed werd.

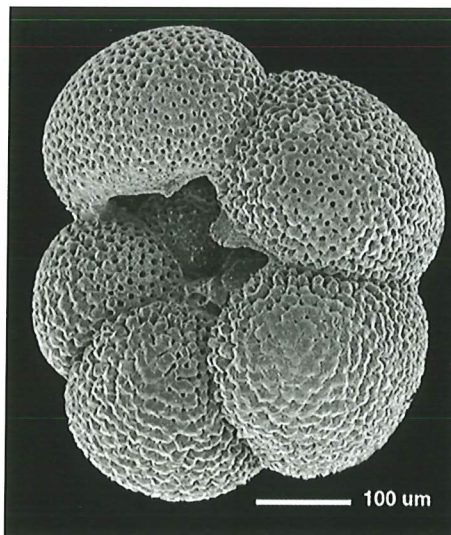
De oceanen zaten en zitten barstensvol minuscule levensvormen. Geologen en biologen maken onderscheid tussen leven op of nabij de oceaanbodem ('*benthisch*' leven) en '*planktonisch*' leven dat juist in de oceaan drijft en zich door de stroming laat verplaatsen. De planktonische organismen, kortweg plankton, worden weer onderverdeeld in een groep dierlijke organismen (zoöplankton) en een groep plantaardig plankton (fytoplankton, zoals diatomeeën, minuscule éencellige wieren, zie figuur 1).

Foraminiferen

Foraminiferen, gekamerede éencellige organismen, bestaan zowel in planktonische als in benthische vorm. Klein tot een millimeter



Figuur 1. Diatomee, een minuscule éencellig wiertje. Diatomeeën worden door hun fijnmazige 'skeletje' veel als filtermateriaal gebruikt.



Figuur 2. Globigerina, een planktonische foraminifeer van ongeveer een halve millimeter groot. De kamertjes zijn duidelijk zichtbaar.

als plankton dat in zee zweeft (zie figuur 2), tot centimeters groot (grootforaminiferen) die op de (ondiepe) zeebodem leven. Voorbeelden zijn *Nummulieten* en *Alveolina*, die in de kalksteenblokken van de casco's van de piramiden van Gizeh met het blote oog goed te zien zijn! Hoewel een gemiddelde planktonische foram niet veel groter wordt dan een halve millimeter, zijn ze op

satellietbeelden (zie figuur 3) wel waar te nemen in grote 'bloeiwolken'. Dat geeft aan dat ze in immens hoeveelheden voorkomen. Op een vierkante meter oceaانبodem kunnen minstens 10.000 forams worden aangetroffen.

Het fijne hieraan is dat ze in elke boring van oceaansediment in groten getale voorkomen. Een klein beetje oceaansediment is dan ook genoeg om te zeggen hoe oud het is en hoe de omstandigheden waren toen het laagje sediment nog de bodem van de oceaan vormde.

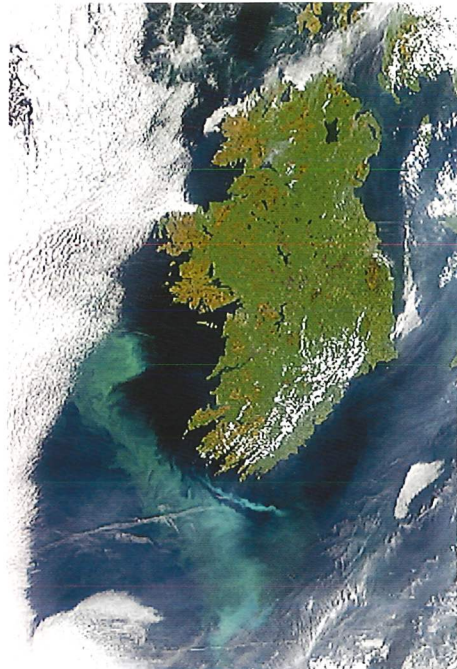
De planktonische soorten helpen bij het dateren van de oceaansedimenten. Foraminiferen maken

namelijk een snelle evolutie door, de vorm van het skeletje verandert rap. De foraminiferen die in de ene periode heel dominant en gewoon zijn, maken snel plaats voor nieuwe soorten met een andere vorm. De tijdsindeling van het Krijt en het Tertiair is zelfs voor een groot deel gebaseerd op de verschijningsvorm van de foraminiferen. Planktonische forams zijn daarentegen weer minder handig om de exacte omstandigheden van bepaalde plekken te reconstrueren: ze drijven met oceaanstromingen een eind mee. En ze komen uiteindelijk natuurlijk niet recht onder de plek waar ze in het water leefden op de oceaانبodem terecht. Gelukkig kunnen juist de benthische soorten meer vertellen over de toestand van de bodem waar ze op en in leefden. Behalve bijzonder handig, is de groep Foraminiferida (van *foramen*, gaatje en *ferre*, dragen, naar hun door openingen met elkaar in verbinding staande kamertjes) ook een bonte verzameling prachtige skeletjes. Een diepgaande beschrijving van foraminiferen is te vinden voor wie nog heel oude jaargangen van *Gea* in huis heeft: in het septembernummer van 1981 (vol. 14, nr 3) staat een uitgebreide inleiding!

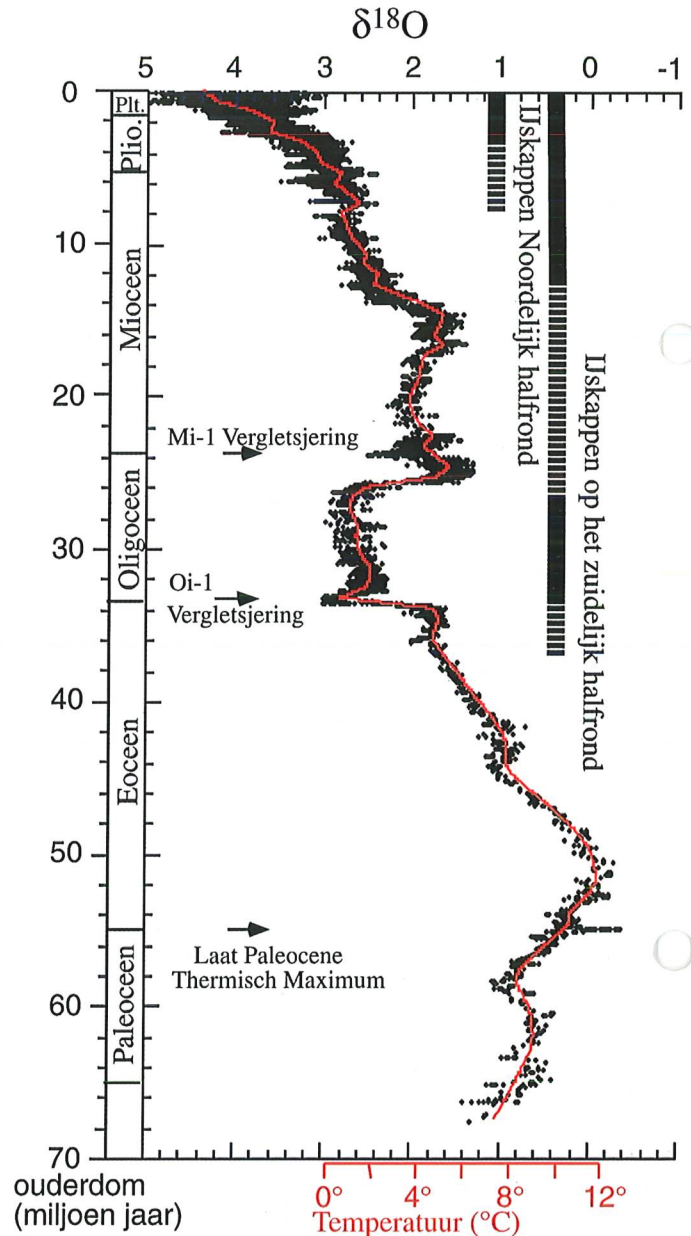
Voor dit verhaal is het belangrijkste wat de foraminiferen ons kunnen vertellen over variaties in het klimaat. Of ze nu een planktonische of benthische levenswijze hebben (of soms zelfs allebei, afhankelijk van de ouderdom van het beestje), foraminiferen hebben in ieder geval gemeen dat ze een skeletje bouwen. Er zijn soorten die een schaalje maken van aan elkaar gekitte zandkorrels, maar veruit de meerderheid bouwt een kalkskeletje (CaCO_3).

Koolstof (C) en zuurstof (O), de bouwelementen van dit skeletje, halen de forams uit het water waarin ze leven. En daarmee leggen ze omstandigheden vast van het water waar ze in leefden. Van koolstof en zuurstof bestaan namelijk verschillende isotopen, die afhankelijk van de temperatuur van het water in andere verhoudingen voorkomen. Het woord *isotoop* is afkomstig uit

het Grieks en betekent "gelijke plaats", om aan te geven dat isotopen een gelijke plaats innemen in het periodiek systeem der elementen. De kern van een atoom is opgebouwd uit protonen en neutronen. Het aantal protonen bepaalt tot welk element een atoom behoort en dus wat de plaats is in het periodiek systeem, terwijl het aantal neutronen het isotoop van dat element bepaalt. Isotopen zijn dus atomen van hetzelfde element met verschillende aantallen neutronen. Zo heeft het zuurstofatoom per definitie acht protonen en kan het acht, negen of tien neutronen hebben, zodat er drie isotopen van zuurstof voorkomen: ^{16}O , ^{17}O en ^{18}O .



Figuur 3. Een enorme 'kudde' plankton voor de zuidwest-kust van Ierland is zelfs op satellietbeelden waar te nemen.



Figuur 4. Gegevens uit honderden boringen van het ODP zijn samengevat in deze grafiek van de $\delta^{18}\text{O}$ -waarden van foraminiferen. De grafiek beslaat het hele Kenozoïcum ('het nieuwe leven'), de periode van 65 miljoen jaar geleden (toen de dinosauriërs door een meteorietinslag om het leven kwamen) tot nu. Onder de grafiek staat de $\delta^{18}\text{O}$ -waarde 'vertaald' naar de gemiddelde temperatuur van het oceaanwater. De vergletsjeringen van het Zuidelijk en Noordelijk Halfrond, die op verschillende momenten in de tijd begonnen, zijn terug te vinden door een 'sprong' naar links, een hogere $\delta^{18}\text{O}$ -waarde. Dit komt omdat er in koudere tijden meer uit de oceanen verdampte ^{16}O in de ijskappen opgeslagen wordt. In de huidige opwarming, waarin het ijs van gletsjers en de noordelijke ijskap harder afsmelt dan aangevuld wordt, komt weer veel van dat ^{16}O terug in de oceaan.

Verreweg de meeste zuurstof komt voor als ^{16}O : 99,76%! Maar juist het kleine beetje ^{18}O kan ons een hoop vertellen.

^{18}O heeft dus twee neutronen meer dan ^{16}O en is daardoor een beetje zwaarder. Dat heeft twee gevolgen:

1. Zwaardere isotopen moleculen (H_2^{18}O in geval van water) hebben een lagere mobiliteit. Dat betekent dat zwaardere moleculen een lagere diffusiesnelheid hebben en minder vaak botsen met andere moleculen. Juist die botsing is de primaire conditie voor een chemische reactie: hierdoor reageren de lichtere moleculen eerder. Kortom: plankton bouwt makkelijker ^{16}O in het skelet. En hoe warmer, des te groter de voorkeur voor ^{16}O .
2. Zwaardere moleculen hebben hogere bindingsenergieën. Om deze bindingsenergieën te verbreken is meer energie nodig. Er verdampst dus altijd meer ^{16}O uit de oceanen dan ^{18}O .

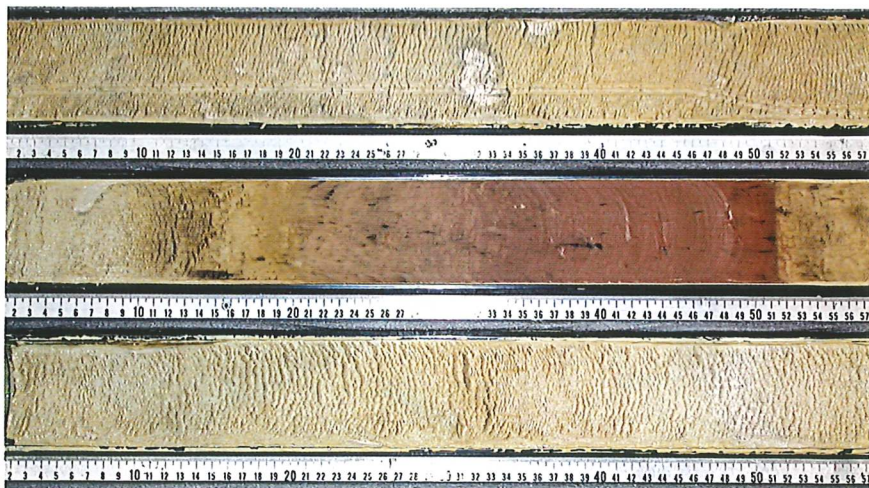
In koude perioden blijft veel ^{16}O achter in ijskappen rond de polen. Dus is er bij koud klimaat relatief meer ^{18}O in de oceaan. Bovendien: bij kou is de voorkeur voor ^{16}O inbouwen in het skeletje minder groot.

Als het plankton dood gaat, zinkt het skeletje naar de oceaانبodem en komt daar terecht op eerdere generaties. Daarmee neemt het een signaal van het klimaat 'mee in het graf'. Door de genoemde oorzaken geeft een relatief hoog gehalte ^{18}O namelijk aan dat het beestje in kouder water heeft geleefd dan het vandaag de dag is, bij een relatief lagere verhouding is dat precies andersom. Elk skeletje is dus eigenlijk een (paleo)thermometertje!

Hoe komen we nou bij die beestjes op de oceaانبodem? In ruim 1200 boringen die het internationale Ocean Drilling Program (ODP) tot nu toe uitvoerde in de bodems van onder andere de Stille, Indische en Atlantische Oceaan, werden dikke pakketten kalkskeletjes omhoog gehaald. Daarmee is een nauwkeurige reconstructie gemaakt van de verhouding van de zuurstof-isotopen (uitgedrukt als ^{18}O om de afwijking in promille van de normale verhouding weer te geven) en daarmee de temperatuur op aarde de afgelopen 65 miljoen jaar (zie figuur 4). Wat al snel opviel was een plotselinge snelle stijging, 55 miljoen jaar geleden. Deze stijging is ook goed te zien in figuur 4: een duidelijke uitslag naar rechts van de gecombineerde gegevens. Als die gegevens nou van een plek zouden komen, dan zou dat een lokaal effect kunnen zijn. Maar nee, de gegevens komen van oceanen over de hele wereld! Er was wereldwijd dus wat aan de hand.

De Walvis Rug

Om te ontdekken wat er precies gebeurde, voer het boorschip Joides Resolution van het ODP (zie figuur 5) voor boorcampagne



Figuur 6. De boorkern is doormidden gesneden en laat de Paleoceen-Eoceen overgang (55 miljoen jaar geleden) in zijn volle glorie zien!

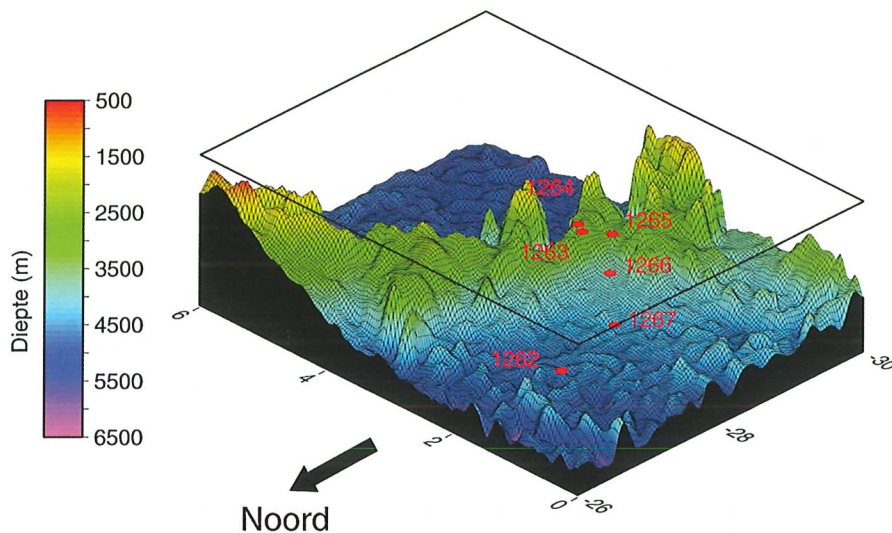
nummer 208 onder leiding van Kroon naar de Walvis Rug, een onderwaterberg voor de zuidwestkust van Zuid-Afrika. Van maart tot mei werden in de oceaانبodem boringen nummer 1262 tot en met 1267 gedaan. "Stel je het maar voor: een schip op een woelige zee die een kilometer of vier, vijf onderwater een paar honderd meter in de oceaانبodem boort en al die boorkernen weer omhoog haalt. Een technisch hoogstandje, elke boring opnieuw. Het mooiste is altijd als de kernen worden opgesneden en zo hun geheimen prijsgeven." (zie figuur 6).

De Walvis Rug werd expres uitgekozen, omdat deze onderwaterberg oprijst van de oceaانبodem op ruim 5000 meter diepte tot 'slechts' 2700 meter beneden zeeniveau (zie figuur 7). Kroon wilde namelijk meer weten over de Calciet Compensatie Diepte (CCD) van 55 miljoen jaar geleden. Hier moeten we weer even wat uitleggen. In warm water wordt kalk als calciet vastgelegd, maar er lost in water ook altijd wat calciet op. Ook dit heeft weer te maken met een evenwicht. Hoe hoger de druk en hoe lager de temperatuur, hoe minder kalk zich vormt en hoe meer kalk er juist oplost. De CCD is de diepte in het oceaانبodem waar de vorming en het oplossen van kalk juist in evenwicht zijn. Diep in de oceanen ligt dit niveau waaronder kalk 'netto' oplost op dit moment op ruim 4200 meter. Als we even alleen de planktonische foraminiferen beschouwen, dan is de CCD een beetje te vergelijken met de sneeuwgrens. Vanuit het oceaانبodem daalt een 'sneeuwvui' aan kalkskeletjes neer. Als de oceaانبodem daar dieper is dan de CCD, lost kalk op voor het de oceaانبodem bereikt heeft. Op die plek bereikt dan alleen klei de bodem. De hoogte van die CCD kan veranderen door temperatuurfluctuaties van het water maar ook door een verandering in de zuurgraad. Dat zuur kalk oplost, dat weten we allemaal (al was het maar van het doorspoelen van het koffiezetapparaat!).

En nu komen de foraminiferen weer terug in het verhaal: als hun skeletjes de bodem wél bereiken, zetten bacteriën een deel van het organische materiaal om in aardgas, voornamelijk methaan-gas (CH_4).

Figuur 5. Onderzoekschip JOIDES Resolution, 470 voet lang en 70 voet breed. De boorinstallatie op het schip torent 202 voet boven het water uit. Een computergestuurd positioneringssysteem met maar liefst 12 motoren houdt het schip op zijn plek tijdens boringen in de oceaانبodem tot maximaal 9 kilometer onder water.





Figuur 7. Een drie-dimensionaal beeld van de topografie van de oceaanbodem (bathymetrie) van de Walvis Ridge voor de zuidwestkust van Zuid-Afrika. De rode stippen met nummers geven de positie van de boringen weer. Het zwarte vierkant geeft het oceaanooppervlak aan.

Omdat het water op de diepte van een paar kilometer rond het vriespunt is, raakt het methaangas opgesloten in ijskristallen. Dat is de normale situatie, maar 60 miljoen jaar geleden was een van de warmste perioden in de aardgeschiedenis (zie ook figuur 4). Door vulkanische uitbarstingen van onder andere de Deccan Traps in India, een van de grootste vulkanische lichamen ter wereld, was de aarde al in een 'broeikas-stand': er waren geen ijskappen aan de polen.

Dat lijkt een normale situatie, maar de aardgeschiedenis kent meerdere perioden van vergletsjering. Belangrijke perioden waarin het kouder was, waren het Laat Proterozoïcum (tussen 800 en 600 miljoen jaar geleden), het Ordovicium en Siluur (tussen ongeveer 460 en 430 miljoen jaar geleden), het Perm (tussen

ongeveer 290 en 250 miljoen jaar geleden), en de huidige afwisseling van ijstijden en minder koude periodes vanaf het Laat Neogeen tot en met het Kwartair (de laatste 4 miljoen jaar).

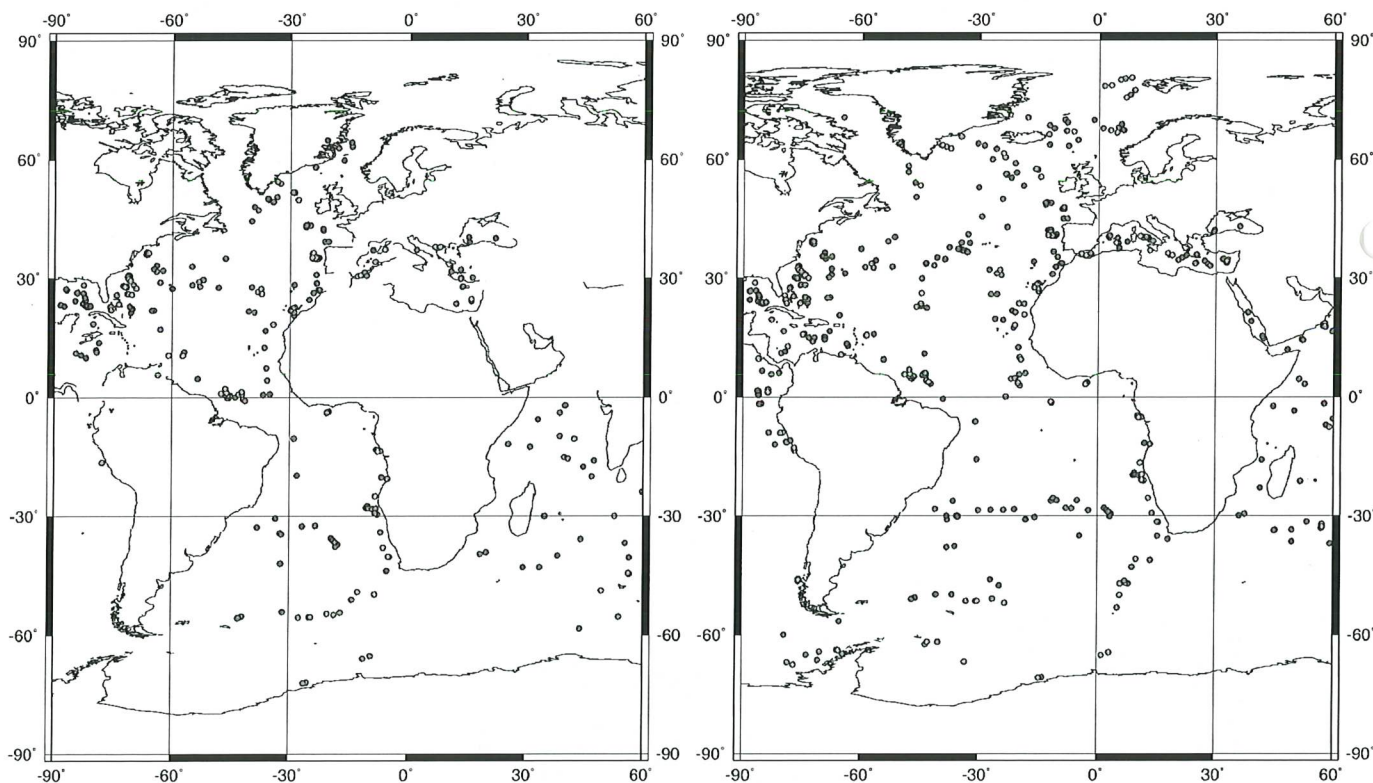
De ijskappen die we toen en nu op de polen hebben, zorgen er op dit moment voor dat oceaanwater, dat opwarmt in de tropen en met golfstromen naar de polen beweegt, weer afkoelt.

Het oceaanwater wordt daardoor zwaarder en zinkt naar de oceaanbodem. Vandaar beweegt het zich als een "Koude Golfstroom" op een paar kilometer diepte over de bodem van de oceanen weer in de richting van de tropen. Het systeem werkt net als een radiator van de verwarming in een kamer. Het water welt weer op aan de tropen en wordt daar weer opnieuw opgewarmd.

Maar 55 miljoen jaar geleden waren er juist geen ijskappen en was het verder moeilijk watermassa's tot bij de Noord-

pool te krijgen om het te laten afkoelen: de Noord Atlantische Oceaan begon zich toen pas te openen tussen Groenland en Schotland (zie figuur 8). Dat zorgde ook nog eens voor enorme basalt-uitvloeiingen en grote hoeveelheden CO₂ en andere broeikasgassen die vrij kwamen. De gemiddelde temperatuur op aarde liep daardoor snel op. Zelfs het diepe oceaanwater warmde in een rap tempo wel vijf graden op. Hierdoor smolten de ijskristallen in het diepe oceaanwater en kwam alle vastgelegde methaan vrij. Dit zorgt altijd voor de nodige hilariteit aan boord van een boorschip: als dit methaan-hydraat (methaan in ijs) wordt opgeboord, kan het aan dek worden aangestoken en in de hand worden vastgehouden zonder je handen te verbranden (zie figuur 9).

Als het methaan vrijkomt in het oceaanwater, oxideert het in



Figuur 8. A (links). Reconstructie van 55 miljoen jaar geleden: de Atlantische Oceaan is zich aan het openen tussen Groenland en Schotland. Reconstructie gemaakt met behulp van www.odsn.de. Cirkels geven boringen aan op basis waarvan deze reconstructies gemaakt zijn. B (rechts). Ter vergelijking de huidige configuratie.



Figuur 9. Methaan-hydraat (aardgas in ijskristallen) wordt aan boord van het boorschip in brand gestoken.

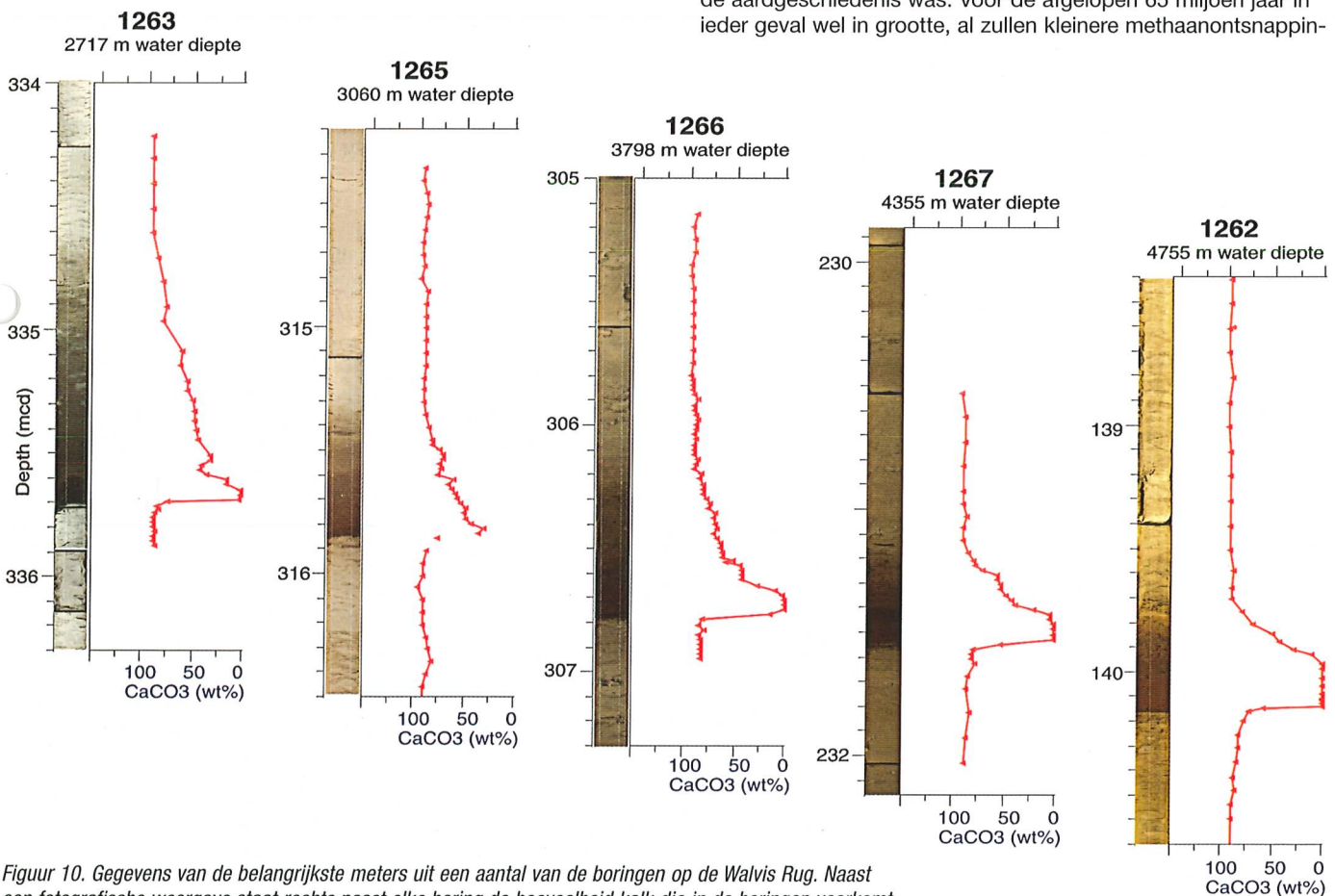
water en daardoor ontstaat CO_2 en water. Meer CO_2 in het water zorgt via de evenwichtsreactie $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ voor meer vrije H^+ ionen. Die extra H^+ ionen zorgen ervoor dat het water zuurder wordt en er meer kalk oplost. Hierdoor komt de CCD minder diep te liggen.

Op de Walvis Rug zou op korte afstand door boringen op verschillende diepte bepaald kunnen worden tot hoe hoog de CCD 55 miljoen

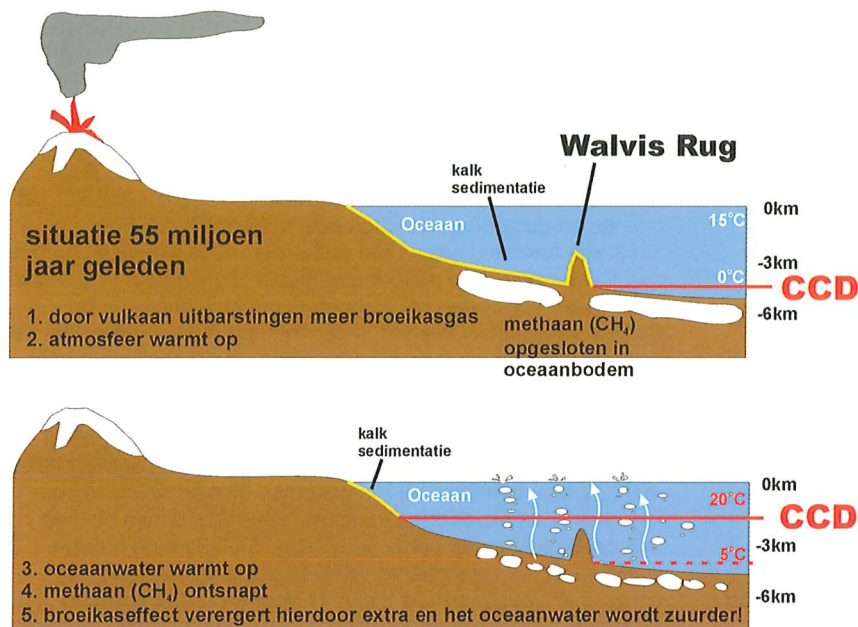
jaar geleden is gekomen en daarmee indirect hoeveel methaan er is vrij gekomen. Kroon: "Tot ieders verbazing bleek ook in de ondiepste boring een laagje van rode klei te zitten, ook hier was alle kalk dus weg. Fantastisch!" En de rode klei was eigenlijk niet minder duidelijk dan in de diepste boring op 4755 meter (zie gewichtspercentage CaCO_3 in de boringen, figuur 10). Leefde er een tijdje geen plankton in de zeeën? Nee, uit ondiepere zeeën weten we dat plankton er gewoon was. Hun skeletjes bereikten eenvoudigweg de zeebodem niet doordat het oceaanwater zuurder was geworden. De CCD moet dus tot ruim boven de 2700

meter omhoog gekomen zijn! Dat is al 1500 meter minder diep dan vandaag de dag. Daar komt nog bij dat die 2717 meter 55 miljoen jaar geleden zelfs nog iets minder diep was: de Zuid Atlantische Oceaan was toen 'nog maar' 65 miljoen jaar aan het openen en dus nog geen volgroeide oceaan als nu. Boorsite 1263 was toen ongeveer 1600 meter diep. Dus we weten nu dat de CCD tot boven de 1600 meter diepte is gestegen, maar liefst 2600 meter hoger dan vandaag de dag. Fluctuaties van de CCD-diepte zijn wel bekend, maar zo'n sprong kan alleen als het water tijdelijk een stuk zuurder is geworden doordat grote hoeveelheden methaan vrijkwamen van de oceaانبodem. Met computermodellen is berekend hoeveel gigaton methaangas nodig is om de CCD zoveel te laten stijgen. Kroon: "Voor 500 meter is 800 gigaton nodig. Voor 2600 meter moet er maar liefst 4000 gigaton methaan vrij zijn gekomen. Een gigantische hoeveelheid!" Een onvoorstelbaar grote hoeveelheid. Om het nog een beetje te kunnen behappen: dat is 8000 keer de huidige jaarlijkse uitstoot methaan of 2000 keer het jaarverbruik aan aardgas in Nederland. Zie figuur 11 voor een schematische weergave van de gebeurtenissen. Door de uitstoot van methaan en het CO_2 dat daardoor in de oceanen ontstond, werd de wereld nog een paar graden verder opgewarmd, tot gemiddeld 6 – 8 graden warmer dan vandaag de dag. Gemiddeld! Op tropische breedtegraden verandert bij een wereldwijde opwarming niet veel, maar vooral op de hogere breedtegraden (bij de polen) liepen de temperaturen gemiddeld tientallen graden op. Daardoor was een enorme aanpassing nodig van het leven op aarde. Deze periode is daarmee ook een van de grootste sprongen in de evolutie van de zoogdieren. Het duurde maar liefst 100.000 jaar voor de situatie van daarvoor weer hersteld was. De tijdsindeling van het Tertiair is, zoals gezegd, gebaseerd op het leven, deze duidelijke grens is dan ook de grens tussen het Paleoceen en het Eoceen (zie figuur 4).

Het is moeilijk te bepalen of het echt een unieke gebeurtenis in de aardgeschiedenis was. Voor de afgelopen 65 miljoen jaar in ieder geval wel in grootte, al zullen kleinere methaanontsnappin-



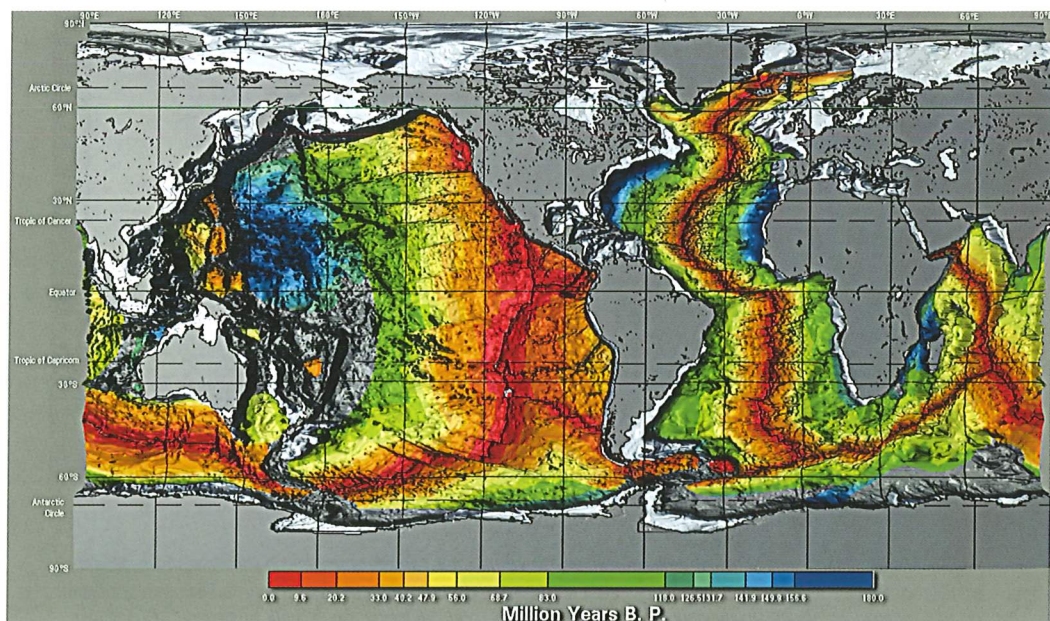
Figuur 10. Gegevens van de belangrijkste meters uit een aantal van de boringen op de Walvis Rug. Naast een fotografische weergave staat rechts naast elke boring de hoeveelheid kalk die in de boringen voorkomt (in gewichtspercentage). Op de plek waar de boorkernen rood gekleurd zijn, is kalk afwezig (CaCO_3 : 0%)



Figuur 11. Schematische weergave van de gebeurtenissen 55 miljoen jaar geleden. Zie de figuur voor verdere uitleg.

gen plaatsgevonden kunnen hebben. Voor verder terug in de aardgeschiedenis wordt het lastig om uitspraken te doen, eerdere belangrijke momenten in de ontwikkeling van het leven zouden beïnvloed kunnen zijn door hetzelfde proces. Helaas is het technisch lastiger om oudere lagen, die dus dieper in de oceaانبodem liggen, aan te boren. Maar dat is niet het grootste probleem. Als oceanen groter en groter worden, komt er een moment dat daardoor continenten met elkaar in botsing komen. Daar zit na een tijdje gebergtevorming weinig ruimte in voor verder in-elkaar-bewegen. De zwakste plek in de aardkorst is de overgang van continent naar oceaan. Daar ontstaat dan een nieuwe subductiezone, waarin de oceanische korst, met alle sedimenten en dus de klimaatinformatie erop, in de diepte verdwijnt. De oudste ongestoorde oceaانبodem, 180 miljoen jaar oud, ligt nog voor de kust van Japan en Wladiwostok (zie figuur 12). Deze verdwijnt daar met de snelheid waarmee vingernagels groeien, een paar centimeter per jaar, de diepte in. Oceaankorst ouder dan 120 miljoen jaar is eigenlijk al bijzonder en op niet veel plekken te vinden. Op basis van gegevens van een paar plekken op aarde uitspraken doen over wereldwijde veranderingen in het klimaat, dat wordt dan natuurlijk steeds lastiger.

Figuur 12. De ouderdom van de oceani-sche korst is op deze figuur in kleur aan-gegeven. Jonge korst is rood van kleur en loopt via geel-groen naar blauw voor oude oceanische korst (zie de legenda). Opvallend zijn natuurlijk de symmetri-sche patronen in de Atlantische Oceaan: van recent bij de spreidingszone in het midden van de oceaan, waar nieuwe oceanische korst ontstaat, tot ongeveer 150 miljoen jaar tussen Noord-Afrika en Noord-Amerika: hier ging de Atlantische Oceaan als eerste open. Voor de kusten van Zuid-Amerika en zuidelijk Afrika is de oudst aanwezige oceaankorst ongeveer 120 miljoen jaar. In de Noordelijke Atlan-tische Oceaan wordt dat bij lange na niet gehaald: tussen Groenland en Schotland is de oudste korst 'slechts' 55 miljoen jaar oud. Verder valt op dat oude oceani-sche korst (ouder dan 120 miljoen jaar) maar op een beperkt aantal plekken ter wereld voorkomt.



Lang leve de Permafrost!

Ok, 55 miljoen jaar geleden is er dus veel me-thaan vrijgekomen. Maar wat is de parallel met nu? Op dit moment speelt de mens 'vulkaantje' en is verantwoordelijk voor een toename van CO₂uitstoot die zijn weerga in de geologische geschiedenis niet kent. Dat de temperatuur op aarde daardoor toeneemt, daarover zijn nu ook de meteorologen en klimatologen het wel eens. En dat het de komende decennia nog wel een graadje warmer wordt, dat is wel duidelijk. Afhankelijk van het model dat gekozen wordt, bedraagt de voorspelde opwarming 1 tot 5 gra-den gemiddeld op aarde in het jaar 2100. De modellen worden de laatste jaren regelmatig naar boven bijgesteld. Ook nu zit er methaan in de oceanen. In hun modellen houden klimaat-onderzoekers echter nog geen rekening met het vrijkomen van methaan. Op iets langere termijn dan 30 jaar moet dat wel, volgens Kroon. Maar het diepe water van de oceaan is niet zomaar opgewarmd, werpen critici op, want de ijskap-pen zijn nog niet weggesmolten. "Klopt", geeft

Kroon toe. "Maar waar is de opwarming volgens de klimaatmo-dellen het grootst? Niet aan de tropen, juist aan de polen. Uit oude gegevens van satellieten blijkt al dat de permafrostgrens zich de afgelopen 25 jaar in Canada snel noordwaarts terugtrekt. In die permafrostbodem zit ook nog eens een hoop methaan. Daar komt op korte termijn al 400 gigaton methaan uit vrij. Dat zorgt ervoor dat de temperatuur – weer voornamelijk aan de polen – nog verder oploopt. Binnen 100 jaar is de hele ijsbedek-king van de Noordpool weg, is de verwachting. Maar het zou goed kunnen dat we ook die schatting binnenkort naar beneden moeten bijstellen. We weten nu wat er kan gebeuren als de ijs-kappen ontbreken. Bovendien kunnen de koude pooloceanen veel opgeloste CO₂ vasthouden. Als die opwarmen komt daar dus ook nog eens een flinke hoeveelheid broeikasgas uit. Een onomkeerbaar proces, als zoiets eenmaal op gang is. Er bestaan blijkbaar mechanismen die het klimaat op Aarde beïnvloeden, waar we nog maar weinig van begrijpen. Een beet-je voorzichtig omspringen met de CO₂uitstoot kan dus geen kwaad".

<http://www.oceandrilling.org/>
<http://www.geo.vu.nl/~pal/staff/kroon.htm>
<http://www.geo.vu.nl/news/kroonmethaan-nl.html>