

Klimaatonderzoek rond Antarctica:

hoe een groen, nat continent afkoelde tot een koude ijsklomp

door Peter K. Bijl, Universiteit Utrecht
p.k.bijl@uu.nl

Sinds het begin van de industriële revolutie, ongeveer 150 jaar geleden, is de CO₂-concentratie in de atmosfeer snel toegenomen. Als deze stijging zo doorgaat, dan worden aan het begin van de 21^e eeuw waarden verwacht van 1.000 ppmv (deeltjes per miljoen in volumeprocent, ook wel ppm). Dit is veel hoger dan de ~390 ppm die nu wordt gemeten. Vlak voor de industrialisatie was de concentratie nog 280 ppm.

Koolstofdioxide absorbeert de uitgaande langegolfstraling (warmte) en straalt het naar alle richtingen uit, waaronder naar de aarde. Hogere CO₂-waarden zullen daarom naar verwachting resulteren in hogere oppervlaktetemperaturen. Bovendien blijft koolstofdioxide zeker 100.000 jaar in het oceaan-atmosfeersysteem aanwezig. Ook als we nu stoppen met de emissies van CO₂ zal de aarde opwarmen.

De klimaatrespons is reeds meetbaar bij veldobservaties. Met computermodellen probeert men de toekomstige CO₂-waarde te voorspellen, waarbij wordt uitgegaan van het actualiteitsprincipe (d.w.z. dat toekomstige geologische processen verklaard worden met dezelfde processen als die we in het heden waarnemen). De vraag is of deze wel hetzelfde zijn onder verschillende klimaatcondities.

Een manier om de betrouwbaarheid van de voorspellingen met computermodellen te testen is om te kijken in het geologische verleden, toen er condities heersten die vergelijkbaar zijn met verwachte toekomstige omstandigheden.

Paleoklimatologie: lessen uit het verleden

Om een wereld te bestuderen met een atmosferische CO₂-concentratie die de toekomstige concentratie benadert, kijken paleoklimatologen ver terug in de tijd. Over de laatste 35 miljoen jaar is de CO₂-concentratie nooit boven de 1.000 ppm uitgekomen en lag zelfs meestal beneden de 500 ppm. Vóór 35 miljoen jaar geleden lag de concentratie waarschijnlijk ver boven de 1.000 ppm, wat impliceert dat de temperatuur toen veel hoger was.

Het bewijs voor veel warmere klimaatcondities is vooral overtuigend in poolgebieden. Reconstructies van de vegetatie op noordelijke, hoge breedtegraden laten zien dat de continenten rondom de Noordelijke IJszee tijdens het Eoceen (~56 tot 34 miljoen jaar geleden) onder meer waren begroeid met *Metasequoia*, een boomsoort die nu alleen nog in gematigd regenwoud groeit. In Alaska zijn krokodilschedels gevonden en pootafdrukken bewijzen dat de voorvaders van het nijlpaard moerassen bevolkten op wat nu Spitsbergen is. Sommige van deze zoogdieren vertoefden zelfs het hele jaar door in het noordelijke poolgebied. Tijdens de warmste periode van het Eoceen, omstreeks 54 miljoen jaar geleden, groeiden er zelfs palmen rond de Noordelijke IJszee en rond 50 miljoen jaar geleden was deze zee bedekt onder een dikke laag van de drijvende zoetwatervaren *Azolla*. Dit alles wijst op een seizoenaal neerslagpatroon op noordelijke hoge breedtegraden.

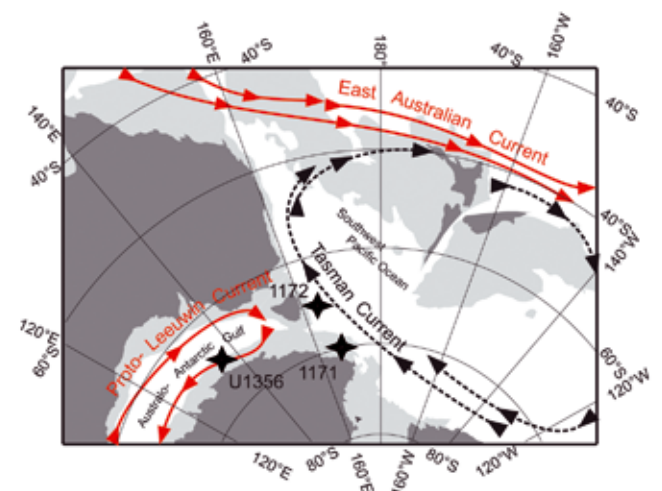
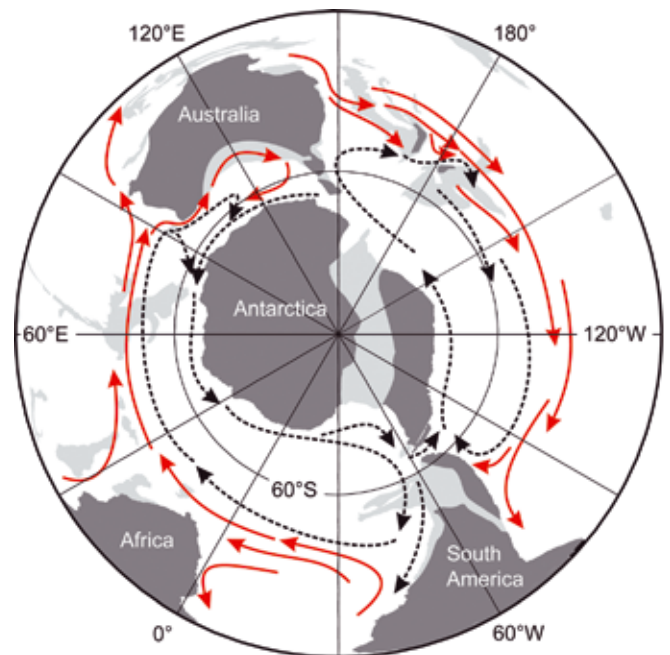
Loofbossen op de Zuidpool

In ontsluitingen op het Antarctische continent zijn Paleogene macrofossielen gevonden die op de aanwezigheid van loof-

Afb. 1. (rechts) Tektonische reconstructie van de Zuidelijke Oceaan tijdens het Vroeg-Paleoceen. De pijlen geven de oppervlaktestroming aan. Bron: Bijl, 2011 PhD thesis Universiteit Utrecht. LPP Contributions series 34, 2011.



Satellietbeeld van Antarctica. Foto: NASA.



bos wijzen. Bossen in Nieuw-Zeeland (destijds op 55° zuiderbreedte) bevatten diverse palmsoorten tijdens het Laat-Eoceen. Kleimineraalcomposities in Eocene kustsedimenten wijzen op chemische verwerking onder invloed van regen in het Antarctische achterland.

De ontdekking dat Antarctica nat en warm was is des te opvallender omdat polaire gebieden ook tijdens het Eoceen voor de helft van het jaar door de stand van de zon donker waren. Om de hoge temperaturen tijdens het Eoceen op polaire breedtegraden te verklaren, werd een verklaring gezocht in de ligging van de continenten op het zuidelijk halfrond. Australië zat tijdens het grootste deel van het Eoceen nog min of meer vast aan Antarctica en de doorgang tussen Antarctica en Zuid-Amerika was gesloten; hierdoor kon de – vandaag de dag isolerende – Antarctische circumpolaire stroming niet rond Antarctica stromen (afb. 1). Warme stromingen afkomstig van lage breedtegraden konden daarom destijds de Antarctische kustlijn bereiken en opwarmen. Deze hypothese werd later door simulaties van oceaancirculaties in twijfel getrokken, want zelfs in afwezigheid van een isolerende circumpolaire stroming zouden de warme oceaanstromingen op lage breedtegraden de Antarctische kustlijn niet hebben kunnen bereiken. In plaats daarvan circuleerde het oppervlaktewater in de vorm van grote kloksgewijs circulerende stromingen.

Tegenwoordig denken wetenschappers dat de warme condities tijdens het Vroeg- Paleoceen vooral veroorzaakt zijn door de hoge concentraties broeikasgassen, en de daarmee geassocieerde terugkoppelingen. Voldoende direct bewijs voor deze hypothese ontbreekt echter nog.

Het sedimentair archief

Veel onderzoek doet vermoeden dat het Vroeg-Eoceen warm was en er tijdens het late Eoceen een sterke afkoeling plaatsvond, tot aan de 'ijskastwereld' van het Oligoceen en Neoceen. Toch is er nog steeds veel onzeker over de *timing*, gedrag en oorzaken van de overgang van een warme broeikaswereld, met een hoge atmosferische CO₂-concentratie, naar de ijskastwereld zoals we deze vandaag de dag meemaken. Om deze overgang beter te begrijpen, grijpen we terug op de sedimentaire archieven uit het onherbergzame Antarctische gebied. Het sedimentaire archief van de Zuidelijke Oceaan is in detail geanalyseerd dankzij het *Deep Sea Drilling Project* (DSDP), het *Ocean Drilling Program* (ODP) en het nog lopende *Integrated Ocean Drilling Program* (IODP). Een probleem bij de bestudering van deze boorkernen is de afwezigheid van voldoende biostratigrafische middelen om de sedimenten te dateren: conventionele, uit calciet bestaande microfossielen zijn afwezig in sedimenten van hoge breedtegraden. Hierdoor blijft de evolutie van het klimaat in de Zuidelijke Oceaan ten tijde van het Vroeg-Paleoceen grotendeels een raadsel.

Zuurstofisotopen van foraminiferen

Met zuurstofisotopenanalyses aan benthische foraminiferen ($\delta^{18}\text{O}$) kan het Paleogene klimaat in de Zuidelijke Oceaan geanalyseerd worden. De waarde in benthische foraminiferen wordt vooral bepaald door veranderingen van de zeewatertemperatuur én de $\delta^{18}\text{O}$ -concentratie van het zeewater. Dit laatste wordt weer beïnvloed door ijsvolume en saliniteit. In de afwezigheid van continentale ijskappen wordt het $\delta^{18}\text{O}$ -gehalte van zeewater dus vooral bepaald door saliniteitsschommelingen.

De analyse toont een algemene afkoeling vanaf de Krijt-Tertiair grens naar een minimum in het mid-Paleoceen (~58 Ma). Hierna stijgt de temperatuur, tot ~52 Ma, wanneer langetermijn-piektemperaturen voor het Kenozoïcum worden bereikt, tot ~50 Ma. We noemen dit het *Early Eocene Climatic Optimum* (EECO). De temperatuur van diep zeewater ligt dan zelfs 13°C hoger dan tegenwoordig. De daaropvolgende 15 miljoen jaren (van 49 tot 34 Ma) worden gekenmerkt door een geleidelijke afkoeling van diepere wateren. Uiteindelijk mondt dit uit in de grootschalige glaciaties op Antarctica, vanaf ongeveer 34 miljoen jaar geleden.

Snelle klimaatverandering in het verleden

Tijdens deze langdurige trends hebben zich eveneens verscheidene periodes van korte klimaatverandering voorgedaan. Het *Paleocene-Eocene Thermal Maximum* (PETM) is zo'n kortdurend interval (~150.000 jaar), met een opwarming tussen 5 en 8°C. Tijdens het PETM is de toegenomen hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer vergelijkbaar met een toename indien alle fossiele brandstoffen opgebruikt zouden worden. Daarom wordt deze periode wel gezien als de beste analogoog voor toekomstige klimaatverandering.

Recentere, minder extreme periodes met veel gelijkenissen met het PETM zijn ontdekt in het tijdsinterval tussen 56 en 51 miljoen jaar geleden. Deze zogenoemde '*hyperthermals*' worden, net als het PETM, gekenmerkt door een overgang naar lagere $\delta^{13}\text{C}$ -waarden van het exogene koolstofreservoir (en een toename van de atmosferische CO₂-concentratie). Een nog jongere periode van relatief kortdurende klimaatopwarming is het *Middle Eocene Climatic Optimum* (MECO). Deze vond 39 miljoen jaar geleden plaats. Net als het PETM en andere *hyperthermals* valt het MECO in opeenvolgende diepzeesedimenten op door de carbonaatoplossing, die toe te schrijven is aan veranderingen (perturbaties) van de koolstofcyclus. Het MECO onderscheidt zich van de *hyperthermals* door het ontbreken van een negatieve $\delta^{13}\text{C}$ -verandering. Dit doet vermoeden dat, mocht CO₂-stijging een rol spelen bij de klimaatverandering tijdens het MECO, de oorsprong van die koolstof die in de atmosfeer is gekomen een andere bron heeft dan bij de *hyperthermals*.

Nieuwe methoden voor klimaatreconstructies

Voor de aanvang van mijn promotieonderzoek tastte men over Antarctica nog in het duister over:

- de omvang van de Antarctische ijskap in de loop van de geologische geschiedenis;
- het zuidpoolklimaat tijdens de laatste 34 miljoen jaar;
- Antarctica in de periode voordat er een grote ijskap opkwam;
- de evolutie en de gevoeligheid van de oppervlaktewateren tijdens het Kenozoïcum, vooral in vergelijking met de reconstructies op grond van benthische isotopen;
- de biotische respons op ijsvolume en temperatuur- en circulatieveranderingen;
- het effect van CO₂ en de opening en verdieping van de *Tasmanian Gateway* op het ontstaan van de Antarctische ijskap;
- de klimaatgevoeligheid van de Zuidelijke Oceaan in de Paleogene broeikaswereld.

Kortom, er waren vele vragen. Een combinatie van micro-paleontologische en organisch-geochemische technieken bleek uitermate bruikbaar om klimaatverandering op hoge breedtegraden te reconstrueren. Weliswaar, zoals hierboven al vermeld, ontbraken microfossielen van calciet, maar waren fossiele algen zoals dinoflagellaten en dinocysten wel zeer talrijk aanwezig in sedimenten op hoge breedtegraden. Met name in zeer oude sedimenten zijn dinocysten zelfs het enige biostratigrafische hulpmiddel om verschillende sedimenten te kunnen correleren. Bovendien levert dit kwantitatieve informatie op over fysische parameters van de oppervlaktewateren, zoals nutriënten, temperatuur, saliniteit en kustnabijheid.

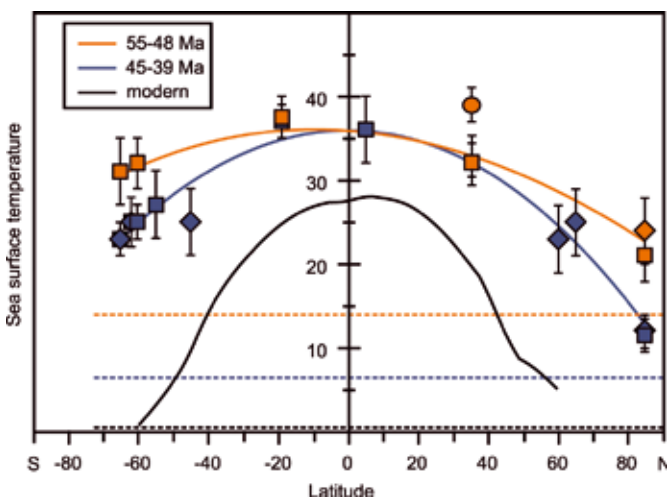
Kenmerkend voor de Zuidelijke Oceaan tijdens het Vroeg-Paleoceen is de aanwezigheid van endemische (=uitsluitend in dit gebied voorkomende) vormen van dinocysten (*transantarctic flora*, hoewel deze term niet geheel correct is). Deze flora domineerde in de regio's die onder invloed stonden van oceaanstromingen vanuit Antarctica. De temperatuur is hier waarschijnlijk de bepalende omgevingsfactor voor de biogeografische distributie van de endemische populatie.

Ook worden organisch-geochemische *tools* vaak gebruikt om sedimenten die dinocysten bevatten te analyseren. De reden is dat het sediment op vrijwel dezelfde wijze wordt geconserveerd. De organisch-geochemische *toolbox* voor klimaatreconstructies is de afgelopen jaren erg vergroot, mede dankzij de ontwikke-

ling van nieuwe methodes, ontwikkeld door o.a. het Nederlands Instituut voor Zeeonderzoek (NIOZ). Met een combinatie van palynologische en organisch-geochemische tools kunnen klimaatreconstructies met een hogere resolutie worden gemaakt.

Biostratigrafie en klimaatreconstructie

Voordat we met de boorkernen van de Zuidelijke Oceaan aan de slag konden, moesten ze eerst gedateerd worden. Met behulp van een dinocysten-zonatieschema konden we het uitsterven/ eerste voorkomen in verband brengen met magnetostratigrafie; dit maakte het mogelijk om de boorkernen heel nauwkeurig te dateren. Vervolgens hebben we de oppervlaktewatertemperatuur in de zuidwestelijke Pacificische Oceaan gereconstrueerd. Hieruit blijkt dat deze tijdens het Vroeg-Eoceen (53 miljoen jaar geleden) steeg tot boven hedendaagse temperaturen in de tropen (tot 34°C) en geleidelijk afkoelde tot ongeveer 21°C in het Laat-Eoceen (36 miljoen jaar geleden). Dit zou betekenen dat er tijdens het Vroeg-Eoceen (~55-50 miljoen jaar geleden) nagenoeg geen verloop van temperatuur met de hoogte van de breedtegraad bestond tussen sub-equatoriale en sub-polaire breedtegraden. Deze latitudinale temperatuurgadiënt werd beduidend sterker tijdens het Midden-Eoceen (afb. 2). Als de Eocene afkoeling het resultaat was van dalende atmosferische CO₂-concentraties in het Eoceen, dan kan niet worden verklaard waarom de tropische gebieden niet afkoelden bij dezelfde CO₂-daling. Naast de dalende atmosferische CO₂-concentratie moeten er daarom ook nog andere factoren een rol hebben gespeeld bij de temperatuurevolutie tijdens het Eoceen.

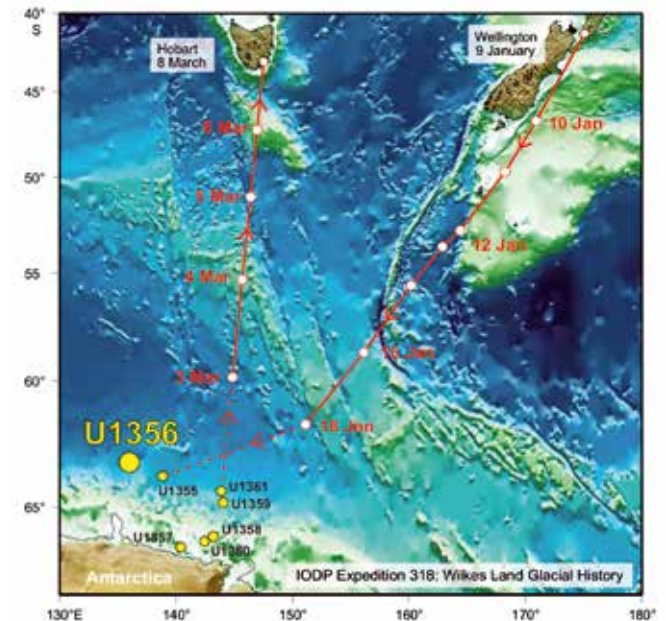


Afb. 2. De temperatuurgadiënt in de huidige tijd (zwart), tijdens het Vroeg-Eoceen (oranje) en Midden-Eoceen (blauw). Bron: Bijl et al., *Early Paleogene temperature evolution of the Southwest Pacific Ocean. Nature 461: 776-779, met toevoegingen.*

Wat is dan de rol van CO₂ geweest op het klimaat in de Paleogene broeikaswereld? De compilatie van CO₂-gegevens in het Eoceen bestaat uit weinig datapunten en de data die er zijn, zijn inaccuraat. We hebben een bijdrage geleverd aan deze datasets door temperatuur- en CO₂-reconstructies te doen voor het *Middle Eocene Climatic Optimum* (MECO, ~39 miljoen jaar geleden) toen de temperatuur relatief snel (in ~400 duizend jaar) steeg en vervolgens weer snel daalde. De opwarming van zuidwestelijke Pacificische oppervlaktewateren bedroeg tussen 3 en 6°C, terwijl CO₂-concentratie in dezelfde periode twee- tot driemaal zo hoog werd. De evidente overeenstemming tussen zeewater-temperatuur- en trends in CO₂-concentraties tijdens het MECO doet vermoeden dat verhoogde CO₂-concentraties een grote rol speelden in de wereldwijde opwarming.

Boorexpeditie naar Antarctica in 2010

Om een completer beeld te krijgen van de geschiedenis van de Antarctische ijskap, vanaf zijn ontstaan rond 34 miljoen jaar geleden tot aan de veranderingen gedurende de laatste 10.000 jaar, is een boorexpeditie opgezet. De temperatuurschommelingen in deze 34 miljoen jaar (zoals de sterk fluctuerende temperatuur tijdens het Oligoceen, de hoge temperaturen tijdens het Midden-Mioceen en het Pliocene en de ijstijden tijdens het Pleistoceen) zouden hun weerslag moeten hebben gehad op de Antarctische ijskap. De gevolgen hiervan zouden zichtbaar moeten zijn in de oceaansedimenten voor de Antarctische kust. Hoewel we met deze expeditie meerdere onderzoeksvragen wilden beantwoorden, wil ik in dit artikel vooral ingaan op de bepaling van de ouderdom van de oudste sedimenten, ten tijde van het begin van het ontstaan van de glaciatie van Antarctica. Dit moet omstreeks de overgang van Eoceen naar Oligoceen hebben plaatsgevonden.



Afb. 3. Route en boorlocaties van de boorexpeditie naar Antarctica. Bron: Escutia et al., *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 318.*

De expeditie duurde twee maanden. Op 9 januari 2010 vertrokken we uit Wellington, Nieuw-Zeeland en kwamen op 8 maart in Hobart, Tasmanië, aan (afb. 3). In totaal is 2.500 meter aan boorkernen omhoog gehaald, verdeeld over zeven boorlocaties. Een grote uitdaging was het vermijden van de talloze ijsbergen; het boorschip - de *Joides Resolution* - is immers geen ijsbreker (afb. 4). Aangezien het schip tijdens het boren aan de oceaانبodem vastzit vanwege de boorpijp en ijsbergen onvoorspelbare bewegingen kunnen maken, moesten de ijsbergen tijdens het boren goed in de gaten worden gehouden.

De belangrijkste boorlocatie (U1356) bevond zich 350 km van de Antarctische kust, op 4 km waterdiepte. We hebben hier bijna drie weken geboord, tot 1 km diep in de oceaانبodem. Mijn taak binnen het 'paleoteam' was om de boorkernen te dateren, waarbij mijn expertise de datering met de dinoflagellaten-cysten was. Het team maakte een diagram waarin voor de totale opeenvolging van de boorkernen de ouderdom werd aangegeven (afb. 5). Dankzij de Neogene diatomeeën, de Oligocene kalkfossielen en de Eocene dinoflagellaten hadden we een goede stratigrafische controle. Wel was er een hiaat van 14 miljoen jaar tussen het vroegste Oligoceen en het Vroeg-Eoceen. Dit was een grote verrassing, maar dit heeft ons wel 100 meter sediment opgeleverd van 54-46 miljoen jaar oud: het warmste tijdsinterval



Afb. 4. Het boorschip Joides Resolution. Foto: Wikimedia Commons/William Crawford, IODP/TAMU.

van de laatste 95 miljoen jaar. Dit biedt een uniek inzicht in de condities van Antarctica gedurende deze warme periode.

Gedetailleerd onderzoek aan de boorkernen

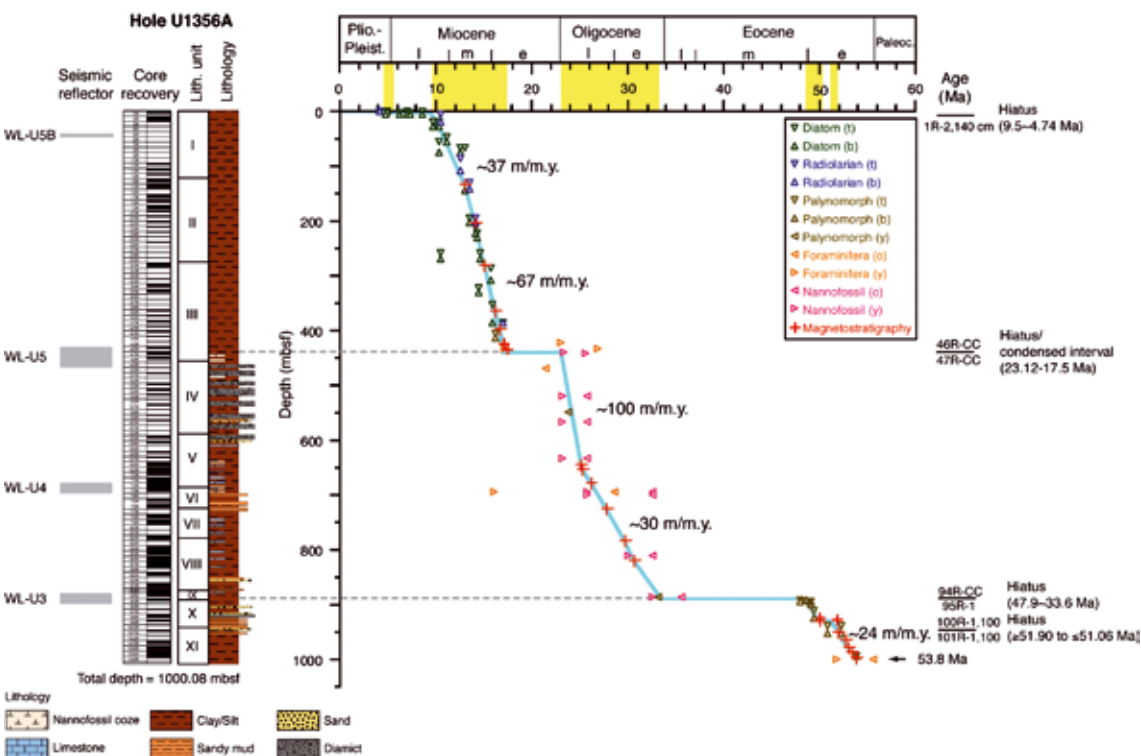
Na de expeditie gingen we direct aan de slag met de analyse van de boorkernen. Opvallend was het hoge gehalte aan stuifmeelkorrels. Gedetailleerde analyses door mijn collega's aan de Frankfurt Universitat wijzen ten tijde van het Vroeg-Eoceen op een vegetatie in de kuststrook van Antarctica die vergelijkbaar is met de hedendaagse tropen: veel niet-bladverliezende bomen zoals palmen, apenbroodbomen en varens (afb. 6). Als we aannemen dat deze boomsoorten dezelfde klimatologische voorkeuren hadden als hun moderne soortgenoten, kunnen we een 'temperatuur-range' reconstrueren die zo'n vegetatie mogelijk maakt. Deze benadering laat zien dat de Antarctische

kustlijn gedurende het Eoceen vorstvrij was en dat de temperatuur in de zomer boven de 23 C uitkwam. Ook de organisch-geochemische temperatuurreconstructies laten dezelfde temperaturen voor de zomerperiode zien. Daarnaast vinden we in dezelfde sedimenten tropisch plankton, wat een verder bewijs levert voor de warme condities gedurende het Vroeg-Eoceen rond Antarctica.

Het is nog steeds een raadsel waarom gedurende het Midden-Eoceen de Zuidelijke Oceaan zo sterk afkoelde terwijl de tropen warm blijven. Een antwoord ligt besloten in de boorkernen van de expeditie naar Wilkes Land.

De dinocysten-associaties laten een duidelijke overgang zien van tropische soorten gedurende het Vroeg-Eoceen naar endemische soorten gedurende het Midden-Eoceen. Deze endemische soorten komen ook gedurende het Vroeg-Eoceen voor in de Zuid-Pacifische kustwateren, maar zijn nooit gevonden in de Australo-Antarctic Gulf (AAG). De Tasmanian Gateway vormde zelfs altijd een duidelijke scheiding tussen de dominantie van tropische soorten in de AAG en de endemische soorten in de zuidwestelijke Pacifiche Oceaan. De dominantie van endemische dinocysten in de Antarctische sedimenten van de AAG doet vermoeden dat zij gemigreerd zijn via een blijkbaar ondiepe zuidelijke opening van de

Tasmanian Gateway. In combinatie met een duidelijke afkoeling (gereconstrueerd met de organisch-geochemische tools) impliceren deze observaties dat het begin van de *Antarctic Counter Current* door de *Tasmanian Gateway* de invloed van de warmere *Proto-Leeuwin Current* heeft geminimaliseerd. Dit suggereert dat de ondiepe opening van de *Tasmanian Gateway* een grote rol gespeeld moet hebben in de Antarctische afkoeling, wat deze regio voorbereidt op grootschalige ijskapontwikkeling ten tijde van de Eoceen-Oligoceengrens, rond 34 miljoen jaar geleden. Deze tektonische verandering leidde mogelijk tot een sterke afkoeling van de Zuidelijke Oceaan doordat oceaanstromingen meer geisoleerd raakten. Tevens laat deze oceanografische verandering de tropische temperatuurevolutie ongemeoid en verklaart dit dus beter waarom de hoge breedtegraden afkoelen terwijl de tropen warm blijven.

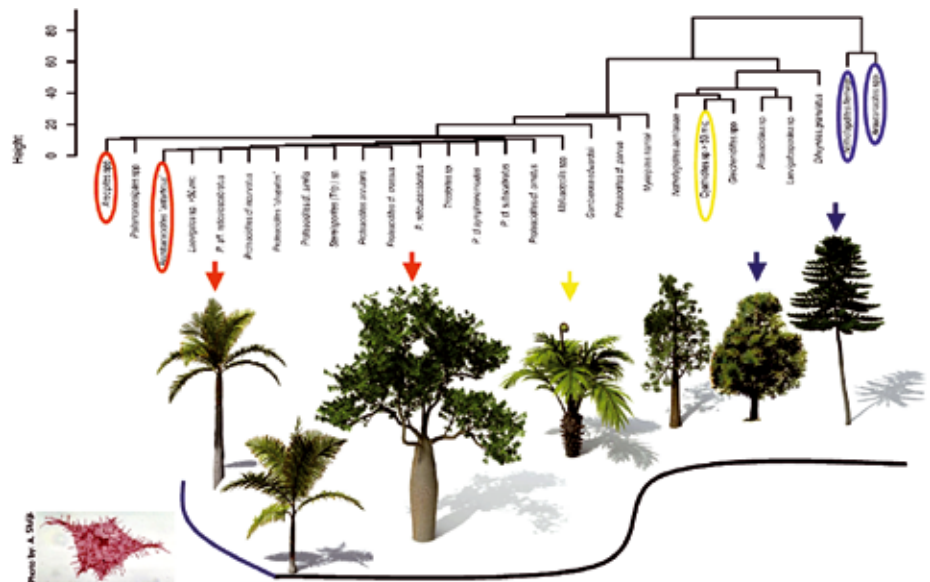


Afb. 5. Ouderdomsmodel voor boorlocatie U1356A. Datering met diatomeeën en radiolaria (tot 400 meter), nannofossielen en foraminiferen (400-900 m) en dinoflagellaten (900-1000 m), alle in combinatie met magnetostratigrafie. Bron: Escutia et al., *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 318*.

Vervolgonderzoek

Op dit moment zijn we bezig met de analyse van de Oligocene boorkernen. Daarbij zoeken we een antwoord op de vraag hoe (het leven in) de Zuidelijke Oceaan reageert op het plotselinge verschijnen van de Antarctische ijskap. Daarbij is het de vraag hoe snel het ecosysteem zich heeft aangepast op de snelle 'bevriezing' van zijn omgeving. Dit kan ook meer inzicht geven in de ecosystemeveranderingen in onze tijd, als gevolg van het opwarmen van de aarde.

De Nederlandse bijdrage aan het oceaanoorprogramma IODP, mijn participatie en het vervolgonderzoek worden mede gefinancierd door het Nederlands instituut voor Wetenschappelijk Onderzoek NWO.



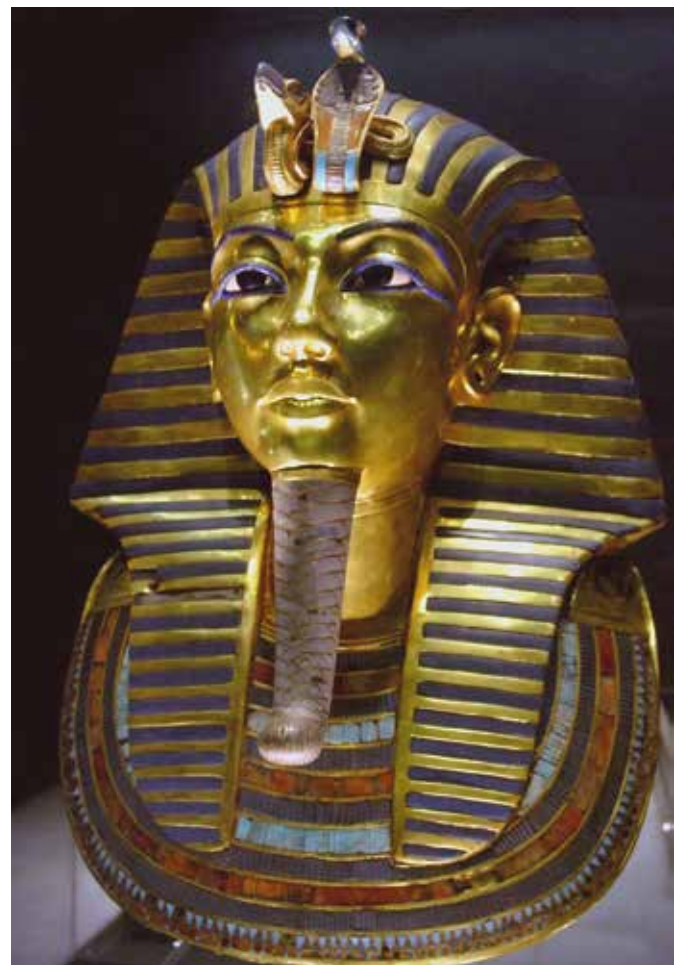
Afb. 6. (Sub-)tropische vegetatietypes op Antarctica tijdens het Vroeg-Eoceen op basis van stuifmeelkorrels die via rivieren vanaf het Antarctische vasteland in zee zijn gespeld. Bron: Joerg Pross en Lineth Contreras, Frankfurt Universität.

De oorsprong van goud

door A.J. (Tom) van Loon

Geologisch Instituut Adam Mickiewicz University, Poznan, Polen
e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Al sinds de oudheid wordt goud herkend als een waardevol element, deels omdat het zo'n zeldzaam element op aarde is, deels omdat er prachtige sieraden en andere mooie objecten van te maken zijn en het metaal zo goed bewerkbaar is. Een indrukwekkend voorbeeld is het dodenmasker van Toet-ankh-Amon, de Egyptische farao die in de 14e eeuw v.Chr. leefde (afb.1). Goud is in zeer lage concentraties in de aardkorst aanwezig zodat het slechts loont dit metaal in *placers* en goudaders te exploiteren. *Placers* zijn niets anders dan afzettingen waarin zware deeltjes zijn geconcentreerd, bijvoorbeeld in de geul van een rivier waarin door erosie goudaders tevoorschijn zijn gekomen. Goud is daar soms aanwezig in de vorm van *nuggets* (afb. 2). Omdat het in *placers* gewonnen goud afkomstig is uit geërodeerde goudaders, is het gedolven goud uiteindelijk vrijwel helemaal afkomstig uit goudaders. Het ontstaan daarvan is bekend: wanneer magma opstijgt, probeert een deel via spleten en andere zwaktezones zover mogelijk opwaarts door te dringen. Daarbij koelt het af, waarbij steeds meer mineralen uitkristalliseren. Daardoor wordt het in de aardkorst binnendringende materiaal steeds armer aan elementen, totdat uiteindelijk een soort waterige oplossing overblijft waaruit alleen nog kwarts kan neerslaan (kwartsaders). In die kwartsaders zitten de laatste restjes van elementen die geen of niet gemakkelijk kristallen vormen. Daartoe behoort goud (afb. 3). Omdat kwartsaders vaak dun zijn en verspreid voorkomen, moeten grote hoeveelheden gesteente verwerkt worden om daaruit het goud te kunnen isoleren. Dat resulteert in gigantische mijnen (afb. 4). Het meeste goud wordt inmiddels echter ondergronds gewonnen. Dit met zoveel moeite gewonnen goud wordt uiteindelijk voor een zeer groot deel als 'onderpand' voor papiergeld door overheden in de vorm van 'broodjes' veilig in kluizen opgeslagen (afb. 5).



Afb. 1. Het dodenmasker van farao Toet-ankh-Amon in het Egyptisch Museum te Cairo is rijkelijk ingelegd met goud. Foto: Bjørn Christian Tørrissen.