Een grote, koude rift:

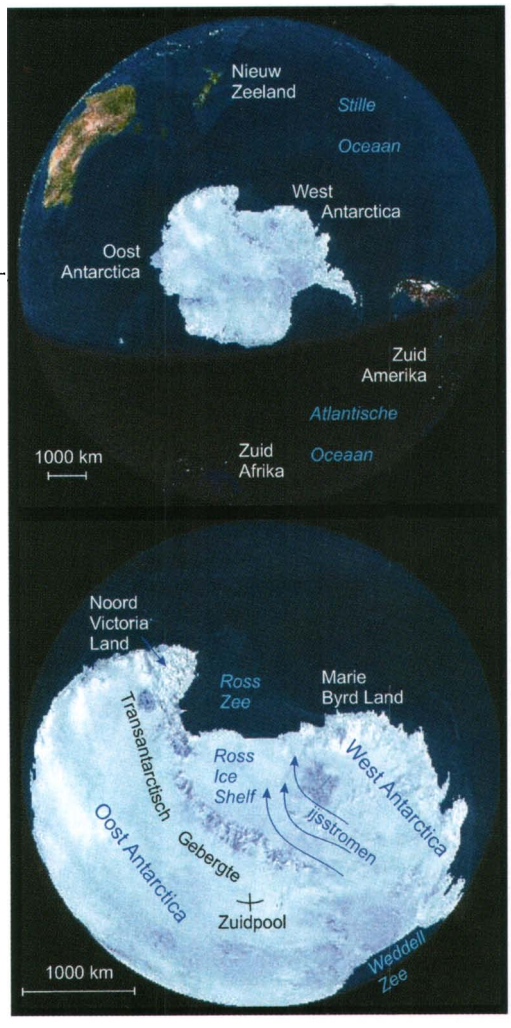
het West-Antarctische Rift Systeem

Dick van der Wateren
Faculteit der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit
De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam
watd@geo.vu.nl

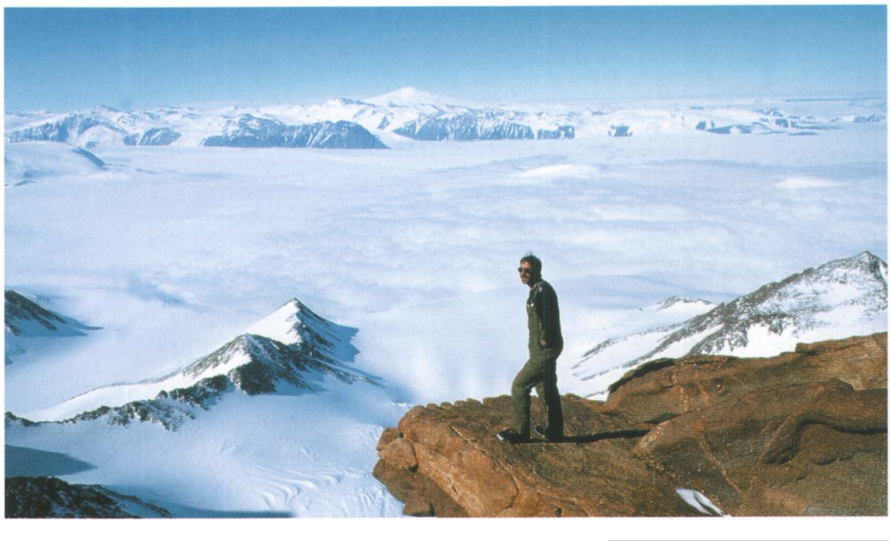
Inleiding

December 1988. Mount Nansen, 2737 meter. 74°33´ Zuid, 162° 35' Oost.

De helicopter heeft ons zojuist op de top afgezet (Afb. 2). In het oosten steken nog enkele geïsoleerde bergtoppen door het ijs en daarachter rijst als een witte muur het Poolplateau op - tweeduizend kilometer uitgestrektheid van sneeuw en ijs. 2500 meter beneden me voegen de Priestley Gletsjer en de Reeves Gletsjer zich samen en stromen langzaam naar Terra Nova Bay, aan de westkust van Victoria Land. Zestig kilometer naar het westen is in de heldere poollucht de kust duidelijk zichtbaar. Het pakijs bedekt zo vroeg in de Antarctische zomer nog een groot deel van de Ross Zee. Dit moment, daar boven op het plateau van Mount Nansen, is symbolisch voor de volgende tien jaar van mijn werk in Antarctica, al besef ik dat dan nog niet. Het is mijn eerste seizoen op "Het IJs", aan het einde van mijn eerste kamp met de Duitse professor Kwartairgeologie Klaus Duphorn. We hebben de uithoeken van ons veldwerkgebied verkend, ruim 900 km² ruw bergachtig terrein, dat nu aan mijn voeten ligt. Ik heb mijn eerste Antarctische storm meegemaakt (Afb. 3). Windkracht tien met windstoten van 70 knopen. De eerste uren denk je dat de tent boven je hoofd elk moment in flarden kan wegwaaien. Door het geklapper kunnen we nauwelijks met elkaar communiceren. Maar het went en na een dag ga je rustig slapen in het stormgeweld en wacht tot na een paar dagen de wind gaat liggen. Daarna is het weer genieten van het overweldigende en wonderschone landschap en de lange dagtochten op ski's van morene naar bergpas en gletsjerrand. De hoge top van Mount Nansen gaf een ideaal uitzicht over een van de grootste actieve rift-systemen op aarde. (Zie het kader "Riften".) Het vlakke, flauw naar het westen hellende, top-plateau is een deel van de opgeheven riftflank, het Transantarctische Gebergte.
In de verte, dicht bij de kust ligt Mount Melbourne, een van de grote, actieve vulkanen van Antarctica (Afb. 4). De nog met pakijs bedekte Terra Nova Baai vormt de noordkant van het Victoria Land Bekken, het diepste van de drie sedimentaire bekkens van het West-Antarctische Rift Systeem, dat zich van de Ross Zee tot aan de Weddell Zee, aan de andere kant van het continent, uitstrekt (Afb. 5). Pas jaren later dringt de betekenis van het majestueuze vergezicht van Mount Nansen tot me door. Waar beter dan vanaf die plek kun je leren hoe landschappen gevormd worden door het



Afb. 1. Blik vanuit de ruimte.
a) Het Zuidpoolgebied en de omringende zuidelijke continenten gezien vanaf een afstand van 1 miljoen kilometer om 12 uur 's middags lokale tijd, middernacht in Europa.
b) Antarctica vanaf een afstand van 986 km. De montage van de satellietbeelden is afkomstig van de Internet-site "Earth and Moon Viewer" (http://www.fourmilab.ch/earthview/).



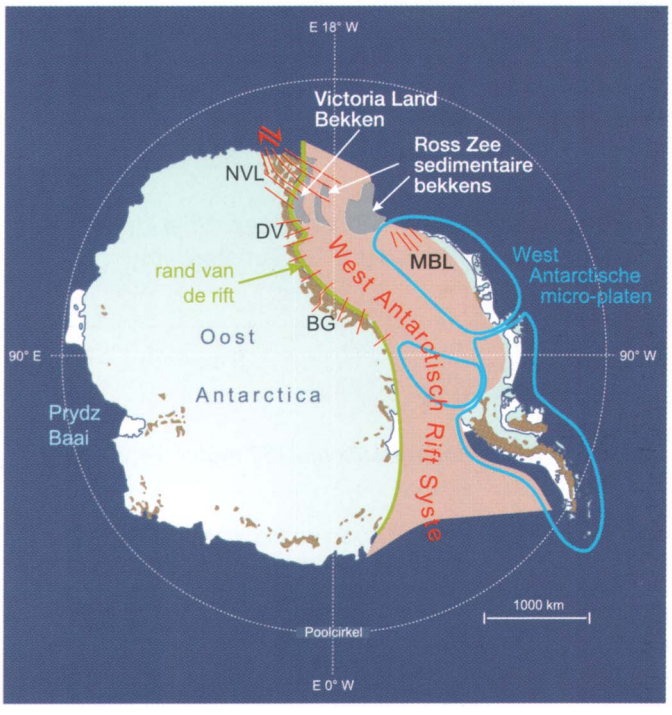
Afb. 2. Uitzicht naar het oosten vanaf Mount Nansen in Noord Victoria Land. De bergen op de achtergrond horen tot de Deep Freeze Range, met in het midden de actieve vulkaan Mount Melbourne (2732 m), aan de rand van het West-Antarctische Rift Systeem. De bergen maken deel uit van het Transantarctische Gebergte, de opgeheven flank van de rift. Voorbij de bergen is de kust van de Ross Zee, die grotendeels met zeeijs bedekt is. Afvoergletsjers van de Oost-Antarctische IJskap liggen onder de wolken. De top van Mount Nansen bestaat uit een pakket vlak naar het westen hellende, Paleozoïsche zandsteen, waarin tijdens de Jura dolerietsills geïntrudeerd zijn.



Afb. 3. Ons kamp tijdens een pauze in de storm van december 1988. De oude Scott tent heeft windkracht 10 met windstoten van 70 knopen overleefd. Mijn metgezel Klaus Duphorn verzamelt sneeuw om drinkwater te smelten.

samenspel van processen aan de oppervlakte en op tientallen kilometers diepte. De opgeheven riftflank, de bekkens en vulkanen, getuigen van de nog steeds actieve bewegingen van de lithosfeer en de warmtetoevoer vanuit de mantel. Tegelijktertijd wordt het reliëf afgebroken door de gletsjers en ijsstromen, die diepe dalen insnijden en hun sedimentlast in de riftbekkens afzetten. En niet te vergeten de wind, die los verweringsmateriaal afvoert en bizarre holten in rotswanden uitblaast en stenen glanzend polijst.

Antarctica is het koudste, droogste, hoogste en meest stormachtige continent. Het beslaat een oppervlakte van 13 miljoen km^2 - groter dan Europa - en wordt bedekt door bijna 30 miljoen km^3 ijs - ongeveer 90% van de totale hoeveelheid ijs en 70% van de totale hoeveelheid zoet water op Aarde. Het ijs is gemiddeld 2,5 km dik met een maximale dikte van 4,8 km. Minder dan 2% van het landoppervlak - het Transantarctisch Gebergte en de bergketens van het Antarctisch Schiereiland - is ijsvrij (Afb. 1). Met een gemiddelde neerslag overeenkomend met minder dan 150 mm water is Antarctica een van de droogste woestijngebieden ter wereld.
Het koude continent wordt door een van de grootste actieve riften op aarde, het West-Antarctische Rift Systeem (Afb. 5), in twee lithologisch en struktureel sterk verschillende subcontinenten verdeeld: Oost-Antarctica en het kleinere West-Antarctica.



Afb. 5. Het West-Antarctische Rift Systeem, ruim 3000 km lang en 500 tot 1200 km breed, tussen Oost- en West-Antarctica. West-Antarctica is opgebouwd uit een aantal microplaten, waaronder Marie Byrd Land en het Antarctisch Schiereiland. De rift omvat een aantal sedimentaire bekkens, die ontstaan zijn door uitrekking en verdunning van de korst. Het Victoria Land Bekken bevat 14 km dik sediment, dat door gletsjers van land is aangevoerd, afgewisseld met mariene sedimenten. Het Transantarctisch Gebergte wordt door breuken (in rood) in een groot aantal blokken verdeeld. Aan de kant van de Stille Oceaan staat de rift onder plaatspanningen, die de breuken in rechts-laterale zin verzetten (rode pijltjes). NVL: Noord Victoria Land, DV: Dry Valleys, BG: Beardmore Gletsjergebied.

En zo is er ook sprake van twee ijskappen, de Oost- en de West-Antarctische IJskap, die grote verschillen vertonen in o.a. hun respons op klimaatverandering.

Mijn eigen onderzoek in Antarctica (waarvan twee seizoenen met Anja Verbers, Deventer) heeft sinds mijn eerste veldwerk in 1988/89 een duidelijke ontwikkeling doorgemaakt. Aanvankelijk was dit puur glaciaal-geologisch gericht en onderzochten we in de bergen van Noord Victoria Land de geschiedenis van de Oost-Antarctische IJskap. In samenwerking met een laboratorium in Keulen werden van verschillende, door het ijs gepolijste, gesteente-oppervlakken door middel van exposiedatering de ouderdommen bepaald. (Zie kader "Exposiedatering"). We hebben vastgesteld dat meer dan 5 miljoen jaar geleden heel Noord Victoria Land, dat toen vermoedelijk een vlak landschap was, bedekt was door een lokale ijskap. Vervolgens begon het ijs zich in de ondergrond in te snijden, daarbij terrassen en geïsoleerde plateauvormige toppen achterlatend, gescheiden door brede en diepe gletsjerdalen (Afb. 6).



Afb. 4. Mount Melbourne aan de Terra Nova Baai. Het expeditieschip "Polar Queen" van de Duitse expeditie GANOVEX (German Antarctic North Victoria Land Expedition) ligt afgemeerd aan de rand van het zeeijs.



Afb. 6. Door het ijs afgeronde graniet in Noord Victoria Land. De gletsjerkrassen en rekbreuken op deze zg. bultrotsen geven aan dat hier in het verleden een dikkere gletsjer van rechts naar links stroomde. De plateaus op de achtergrond zijn opgebouwd uit lava's, deel van een tijdens de Jura in een groot deel van het continent uitgevloeide vloedbasalt, voorloper van de huidige rift. Voordat zich enkele miljoenen jaren geleden gletsjerdalen begonnen in te snijden, vermoedelijk als gevolg van de opheffing van het gebergte, vormden de topplateaus een vlak landschap, bedekt door een lokale ijskap. Zie ook afb. 9.

Franz Tessensohn, de leider van verschillende Duitse expedities naar Noord Victoria Land, daagde ons uit onze resultaten in verband te brengen met de opheffing van het Transantarctische Gebergte gedurende het Tertiair. Een bundel artikelen in de laatste aflevering van *Global and Planetary Change* van 1999 (Van der Wateren and Cloetingh, 1999) is de voorlopige weerslag van ruim tien jaar onderzoek in het Ross-Zeegebied. Bijdragen van collega's uit Duitsland, Italië, Engeland, Zweden en de Verenigde Staten belichten aspecten variërend van de struktuur en deformatie van de lithosfeer, magmatisme en neotektoniek, tot glaciale geschiedenis en landschapsontwikkeling in het Ross-Zeegebied. Dit artikel is een weerslag van de belangrijkste resultaten uit die bundel met de nadruk op mijn werk in Victoria Land en Marie Byrd Land.

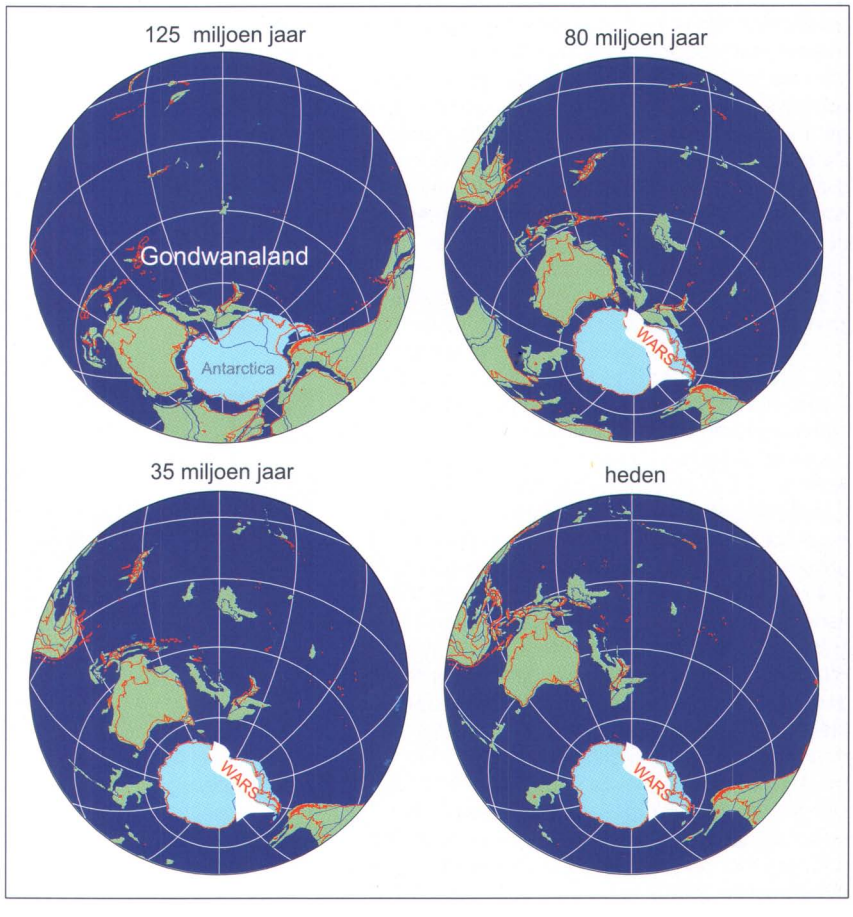
Een unieke rift

Het West-Antarctische Rift Systeem vormt de overgang tussen de twee sub-continenten en valt ruwweg samen met de Ross Zee en de Weddell Zee, de grote baaien tussen Oost- en West-Antarctica (Afb. 5). Over een lengte van meer dan 3000 kilometer en een breedte van 500 tot 1200 kilometer is de lithosfeer horizontaal uitgerekt en in de diepste delen van de bekkens de helft dunner geworden. Als gevolg van de grote warmteaanvoer vanuit de mantel komen over de hele rift vulkanen voor, zowel op het land als onder het ijs en op de zeebodem. Het Transantarctisch Gebergte is de opgeheven westelijke rand van de rift: de riftschouder of riftflank. Het gebergte strekt zich over het hele continent van de Stille Oceaan tot aan de Atlantische Oceaan uit. Met toppen van 3000 tot 4000 meter en maximaal ruim 5000 meter hoog is het een van de hoogste en langste gebergten ter wereld.

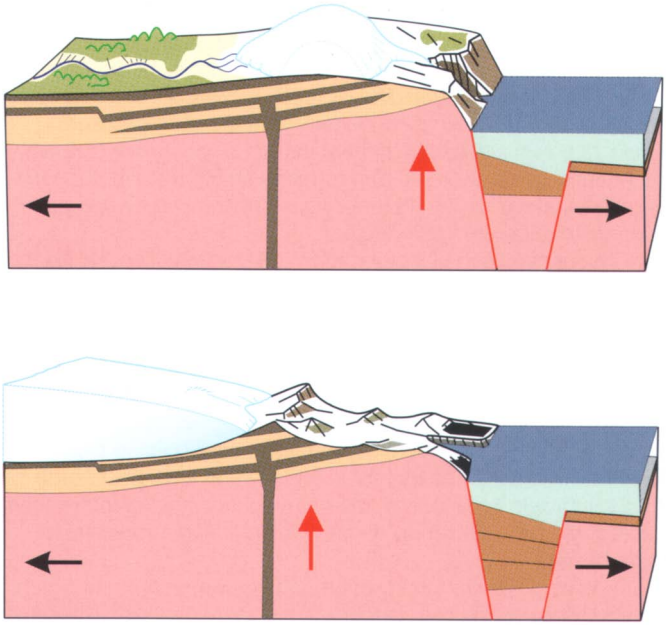
Het Transantarctisch Gebergte vormt de grens tussen het Precambrisch/Paleozoïsche craton van Oost-Antarctica en het West-Antarctische Rift Systeem. Deze grens valt samen met een verandering in dikte en samenstelling van de korst: van een ongeveer 20 km dikke, SiO_2-arme en zware korst onder de Ross Zee naar de 25 tot 40 km dikke SiO_2-rijke en lichte korst onder de riftflank. Het is vermoedelijk een oeroude sutuurzone, erfenis uit de tijd dat het supercontinent Pangea door botsing met kleinere continenten aangroeide. Zoals overal elders op Aarde is zo'n sutuur een zwaktezone, die het mechanische en thermische gedrag van de korst tot op de dag van vandaag in belangrijke mate bepaalt.

De rift is vergelijkbaar qua grootte, struktuur en magmatische ontwikkeling met de twee andere grote riften, de Oost-Afrikaanse Rift (Nyamweru, 1996) en de Basin and Range provincie in de westelijke Verenigde Staten (Murphy et al., 1999). Alle drie de grote riftsystemen zijn gevormd vanaf het Vroeg-Kenozoïcum. De West-Antarctische Rift is echter in een aantal opzichten uniek, zowel geologisch, morfologisch als klimatologisch.

De laatste 100 miljoen jaar heeft de Antarctische Plaat vrijwel op dezelfde plaats gelegen, terwijl het West-Antarctische Rift Systeem bezig was zich te openen. We kunnen de absolute bewegingen van continenten, en van de platen waarvan ze deel uitmaken, relateren aan het wereldwijde systeem van hotspots, plaatsen waar heet mantelmateriaal oprijst (mantelpluimen) en waar een kenmerkend type vulkanisme voorkomt. Hotspots bevinden zich voor lange perioden op dezelfde plaats, terwijl lithosfeerplaten zich op de ruggen van mantel-convectiestromen voortbewegen. Bij het passeren van een hotspot laat deze een



Afb. 7. Plaat-tektonische ontwikkeling van Antarctica. Het opbreken van Gondwana, de zuidelijke helft van het oude reuzencontinent Pangea, begon rond 180 miljoen jaar geleden. De afkoeling van Antarctica, en als gevolg daarvan de wereldwijde afkoeling in het Tertiair, hangt nauw samen met de plaat-tektonische evolutie van het Zuidelijk Halfrond. Zolang er nog verbindingen bestonden met een of meer van de omringende continenten, bleef Antarctica te warm voor een permanente ijsbedekking. Sinds ongeveer 30 miljoen jaar geleden is Antarctica volledig omringd door oceanen en de Circumantarctische Stroom, die het continent vrijwel volledig isoleren van warmere breedtegraden. Vanaf die tijd kwamen de Antarctische ijskappen volledig tot ontwikkeling.



Afb. 8. Opheffing van de riftflank. Opheffing van het gebergte is het gevolg van tektonische krachten, die samenhangen met de horizontale uitrekking van de lithosfeer in de rift (zie kader "Riften"). Verwering en erosie - insnijding van diepe gletsjerdalen - hebben meerdere kilometers gesteente verwijderd en daarbij zijn de hoogste toppen steeds verder van de rand van de rift, de kust, komen te liggen. Het reliëf wordt over een periode van meer dan 50 miljoen jaar in stand gehouden, dankzij de opwaartse beweging van de lithosfeer die de erosie compenseert (isostatische opheffing).

spoor van vulkanische centra na, die in de richting van de plaatbeweging steeds jonger worden. De eilandenreeks van Hawai is daarvan een voorbeeld. Terwijl de platen, waarop de andere grote riften liggen, sinds het Laat-Mesozoïcum over grote afstanden van Antarctica weggedreven zijn (Afb. 7) is de Antarctische Plaat in dezelfde periode opmerkelijk honkvast. Er zijn sterke aanwijzingen dat het Ross-Zeegebied gelegen is boven een grote mantelpluim (of meerdere kleine) die al rond 180 miljoen jaar geleden actief was (Behrendt, 1999; Wörner, 1999). Vermoedelijk is dan ook de lokale opwarming van de lithosfeer door die mantelpluim van grote invloed op het ontstaan en het gedrag van het West-Antarctische Rift Systeem.
De huidige rift is aangelegd over een ouder riftsysteem dat na het Mesozoïcum niet meer actief is geweest. Deze voorloper van de West-Antarctische Rift dateert uit de beginperiode van het opbreken van Gondwana, ongeveer 180 miljoen jaar geleden, toen Zuid-Amerika en Zuid-Afrika zich van Oost-Antarctica losmaakten. Overal in het Transantarctisch Gebergte zijn de sporen van deze gebeurtenis te zien in de vorm van basalt-uitvloeiingen en doleriet-intrusies (Afb. 6). Terwijl rondom de Ross Zee en de Weddell Zee neotektonische en vulkanische activiteit bestaat, worden er opmerkelijk weinig aardbevingen waargenomen. De oorzaak daarvan is nog niet duidelijk en kan maar gedeeltelijk liggen aan het gebrek aan seismische waarnemingsstations op het continent. Mogelijk helpt de kilometersdikke ijsbedekking aardbevingen onderdrukken.
Het Transantarctisch Gebergte is de hoogste riftschouder ter wereld, hoger dan de bergen aan weerskanten van de Oost-Afrikaanse Rift. Het hoogteverschil met het Precambrische craton van Oost-Antarctica bedraagt 2000 meter, wanneer we het ijs wegdenken.
Het maximum reliëf tussen de bergketen en de sedimentaire bekkens in de Ross Zee bedraagt 5 km en met het door ijs bedekte Byrd Subglaciale Bekken zelfs 7 km.

Een uniek aspect is de ijsbedekking van het riftsysteem, inclusief de bekkens en de opgeheven flank. Iets dergelijks heeft zich ook op het Noordelijk Halfrond voorgedaan, waar het ontstaan en de groei van de grote Pleistocene ijskappen direct samenhangen met de tektonische opheffing van de marges rond de noordelijke Atlantische Oceaan (Eyles, 1993). In Antarctica is die relatie tussen tektoniek en landijs echter van veel eerdere datum.
De ijsbedekking begon daar minstens 36 miljoen jaar geleden, voorafgegaan door kleine gletsjers en lokale ijskappen in het geleidelijk oprijzende gebergte. In de loop van miljoenen jaren vloeiden die samen en groeiden uit tot wat nu de Oost-Antarctische IJskap is (Hambrey and Barrett, 1993). De West-Antarctische IJskap is ongeveer 10 miljoen jaar jonger en zijn ontstaan hangt vermoedelijk samen met de koepelvormige opheffing van Marie Byrd Land als gevolg van de grote mantelpluim onder het Ross-Zeegebied (LeMasurier and Landis, 1996).
West-Antarctica wordt gedraineerd door relatief snelle ijsstromen - rivieren van ijs, die met een snelheid van 500 tot 800 meter per jaar tussen de 10 tot 100 keer tragere ijsmassa's door naar de Ross Zee en de Weddell Zee bewegen (Knip, 2000). De ijsstromen volgen, niet toevallig, de structuur van de rift (Bell et al., 1998). Ze bepalen bovendien voor een belangrijk deel de stabiliteit van de West-Antarctische IJskap, die heel gevoelig is voor zelfs maar kleine veranderingen van de zeespiegel (Oppenheimer, 1998). Dit is een voorbeeld van de, misschien verrassende, maar niettemin sterke samenhangen tussen lithosfeerprocessen en klimaatverandering in Antarctica, met wereldwijde consequenties, die geologisch onderzoek op dit continent tot zo'n fascinerende bezigheid maken.
De oorzaak van de gevoeligheid van de West-Antarctische IJskap voor zeespiegelrijzing ligt in het feit dat die, in tegenstelling tot de Oost-Antarctische, grotendeels een ondergrond heeft die ver beneden zeeniveau ligt (Knip, 2000). Daardoor kan een betrekkelijk geringe zeespiegelstijging – bijvoorbeeld als gevolg van de broeikasopwarming – ertoe leiden dat grote delen van de West-Antarctische IJskap gaan drijven en vrijwel zonder weerstand uitvloeien. In dat geval zou over de hele wereld de zeespiegel 6 meter hoger worden, met catastrofale gevolgen voor veel dichtbevolkte kustgebieden. Dit is een belangrijk motief om in dit onherbergzame gebied onderzoek te doen, en daarom wordt veel geld en energie besteed met name aan projecten aan de West-Antarctische IJsstromen.



Afb. 9. Resten van een eens uitgestrekt plateau in Noord Victoria Land, dat door insnijding van brede en diepe gletsjerdalen veranderd is in een landschap van geïsoleerde toppen (nunataks). Op de achtergrond is een topplateau van 2850 meter hoogte (Afb. 10). De bergen op de voorgrond zijn resten van een terrasniveau, rond 1800 meter, dat ontstaan is in een eerste fase van versnijding van het topplateau ongeveer 11 miljoen jaar geleden. De erosieterrassen zijn rond 1 miljoen jaar geleden ijsvrij geworden, toen de gletsjers zich naar een dieper niveau insneden.

Ontwikkeling van de Antarctische IJskappen

Niet de ligging van het continent nabij de Zuidpool, maar vooral de verdeling van continenten en oceanen over de globe zijn bepalend geweest voor het ontstaan van de immense ijskappen in Antarctica. Het continent lag immers al min of meer in zijn huidige positie lang voordat er zelfs maar een begin van ijsbedekking was (Afb. 7). De huidige ijskappen kunnen alleen bestaan dankzij de vrijwel volledige thermische isolatie van Antarctica van de rest van de wereld en die begon pas in de meer recente geschiedenis van het continent.
Antarctica wordt aan alle kanten omgeven door een ruig en stormachtig zeegebied, de Zuidelijke Oceaan. Per schip op weg van Nieuw-Zeeland naar Noord Victoria Land, 3.500 kilometer naar het zuiden, passeren we na ongeveer vier dagen varen de grens tussen het warme water van de Stille Oceaan en het koude Antarctische water. Zelfs vanaf het dek is die grens te zien. De kleur van het zeewater verandert over een strook van hooguit honderd meter van diepblauw in grijsgroen, er staat een zware deining en de luchttemperatuur neemt opvallend snel af. Dit is het Antarctisch Front, waarlangs als een enorme rivier de Circumantarctische Stroom het continent omcirkelt. Die zeestroom verhindert dat de warmte van lagere breedtegraden Antarctica bereikt.
Tijdens het Mesozoïcum vormde Antarctica, met Zuid-Amerika, Afrika, India en Australië nog één geheel, het supercontinent Gondwana, de zuidelijke helft van Pangea. Zeestromen in de omringende oceanen en de circulatie in de atmosfeer zorgden ervoor dat de warmte en vochtigheid, die op lagere breedte werden geproduceerd, ook Antarctica bereikten. Terwijl wereldwijd, als gevolg van de geleidelijk afnemende koolzuurconcentratie van de atmosfeer, de temperaturen lager werden, bleef het klimaat in Antarctica te warm om ijskappen te vormen. Pas bij het uiteenvallen van Gondwana begon een ontwikkeling waarbij Antarctica steeds verder geïsoleerd raakte en tenslotte voldoende afkoelde om de groei van permanente ijskappen toe te laten (Afb. 7).

Landschapsgeschiedenis van het Ross-Zeegebied

Zoals uit de inleiding bleek, kunnen de geschiedenis van de klimaatverandering en de ontwikkeling van de ijskappen in Antarctica niet los gezien worden van de plaattektonische ontwikkeling van het continent. De sporen daarvan laten zich in de landschappen van Victoria Land en Marie Byrd Land aflezen. Waarschijnlijk kreeg het Transantarctisch Gebergte rond 50 miljoen jaar geleden ruwweg zijn huidige vorm. Opheffing van de riftflank en daling van de sedimentaire bekkens vonden plaats als gevolg van de horizontale uitrekking en verdunning van de lithosfeer in de rift, waarbij Oost- en West-Antarctica steeds verder uitelkaar dreven. Er zijn aanwijzingen dat dit proces van rifting nog steeds voortduurt. Verwering en erosie (insnijding van diepe gletsjerdalen) hebben kilometersdikke gesteentepakketten verwijderd. Dit wordt gecompenseerd door een opwaartse beweging van de lithosfeer, zoals een kurk in water omhoog komt wanneer stukjes van de bovenkant worden afgesneden. Daarbij komt het hoogste deel van de riftflank geleidelijk steeds verder van de rand van de rift, de kust, te liggen (Afb. 8).
Het Transantarctisch Gebergte wordt door dwarsbreuken, die de hele korst doorsnijden, in ruim twintig blokken verdeeld (Afb. 5). In het Laat-Tertiair, mogelijk vanaf 10 miljoen jaar geleden, worden nieuwe tektonische bewegingen in het Ross-Zeegebied gesuperponeerd op de noordwest-zuidoost gerichte uitrekking. Als gevolg van de reorganisatie van platen in de Zuidelijke Oceaan worden bestaande breuken en zwaktezones in de korst van het Ross-Zeegebied actief. In het Transantarctische Gebergte, in grote delen van de Ross Zee en zelfs aan de oostkant, in Marie Byrd Land, vinden horizontaalverschuivingen en opheffing en daling van blokken plaats.
Verschillende gebieden, zowel aan de west- als de oostkant van het Ross-Zeegebied maken, als gevolg van die differentiële blokbewegingen, uiteenlopende landschapsontwikkelingen door. Wij hebben met behulp van exposiedatering de ouderdom vastgesteld van een aantal topplateaus en erosieterrassen. Het bleek dat de oudste plateaus in Noord Victoria Land langer dan 11,2 miljoen jaar geleden nog door ijs bedekt waren voordat het ijs zich naar een lager niveau insneed (Afb. 9 en 10). Dit is hiermee de oudste op deze wijze gedateerde landschapsvorm. 700 kilometer meer naar het zuiden in ons veldwerkgebied was een vergelijkbaar plateau pas 3,8 miljoen jaar geleden ijs geworden. Onze conclusie is dat de insnijding van diepe gletsjerdalen in de riftflank in verschillende perioden plaats vond, afhankelijk van de tektonische beweging ter plaatse.
Ook op andere plaatsen zijn aanwijzingen gevonden dat het Transantarctische Gebergte extreem oude landschappen bevat. Een onderzoeksgroep, aangevoerd door George Denton van de Universiteit van Maine en David Sugden van de Universiteit van Edinburgh, meent dat de Antarctische landschappen geen noemenswaardige veranderingen ondergaan hebben sinds het Midden-Mioceen, 10 tot 15 miljoen jaar geleden. Deze groep werkt hoofdzakelijk in het gebied van de Dry Valleys in Zuid Victoria Land, het grootste ijsvrije gebied van Antarctica en bijna zo groot als Nederland (Afb. 5). Datering van vulkanische aslagen op ijsvrije berghellingen en dalbodems geeft sterke



*Afb. 10. Oudste oppervlak in Noord Victoria Land, de top van Mount Burnham, 2850 meter. Deze berg bestaat uit Precambrische graniet, die door de ijskap vlakgeslepen is. De lichte plekken zijn resten van dit glaciale erosie-oppervlak, waarop nog vers uitziende gletsjerkrassen te vinden zijn. Meting van de concentratie van de cosmogene isotoop 21Ne in kwartskristallen gaf een exposie-leeftijd van 11,2 miljoen jaar (zie kader "Exposiedatering").
Het oppervlak is ijsvrij geworden nadat de ijskap zich naar een lager niveau had ingesneden.
Op de achtergrond stroomt ruim 1000 meter lager een grote afvoergletsjer van de Oost-Antarctische IJskap tussen de resten van het eens aaneengesloten topplateau.*

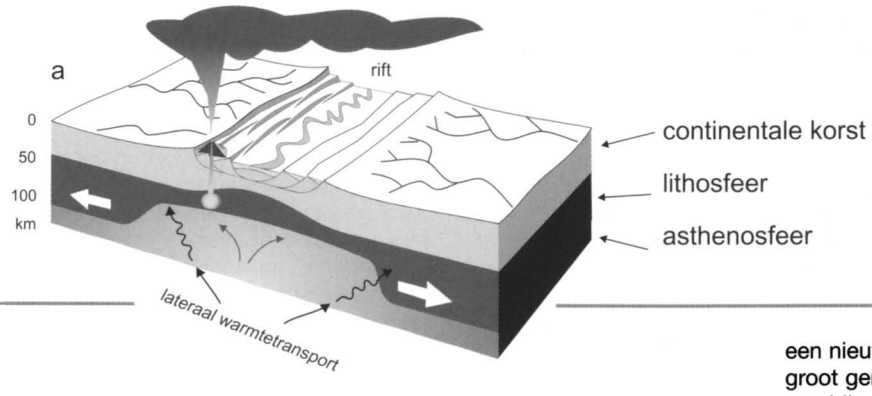
aanwijzingen voor de hoge ouderdom van de landschappen en de lange duur van het extreem droge en polaire klimaat. Ook de merkwaardige vondst van 8 miljoen jaar oud gletsjerijs onder een metersdikke laag gletsjerpuin (Sugden et al., 1995) wordt door deze groep aangevoerd als argument voor langdurig stabiele klimaatsomstandigheden.
In weer andere gebieden in het Transantarctisch Gebergte, maar ook in de omgeving van de Prydz Baai (Afb. 5), zijn juist sterke aanwijzingen gevonden dat de Oost-Antarctische IJskap sinds zijn ontstaan 36 miljoen jaar geleden een meer dynamische geschiedenis heeft doorgemaakt. Een groep onderzoekers onder leiding van Peter Webb van Ohio State University en David Harwood van de Universiteit van Nebraska baseert die conclusie op analyses van dikke pakketten sediment op meer dan 2000 meter hoogte in de omgeving van de Beardmore Gletsjer (Afb. 5). In een afwisseling met door gletsjers afgezette lagen morenemateriaal komen daar sedimenten met plantenresten voor, o.a. pollen, bladeren en wortels van de zuidelijke beuk *Nothofagus*, en daarnaast ook rugschilden van kevers. Alles wijst erop dat in dit gebied - dicht bij de Zuidpool - afwisselend polaire en meer gematigde omstandigheden geheerst hebben. Volgens de dateringen van de Ohio/Nebraska-groep was de laatste opwarming nog in het Midden-Plioceen – rond 3 miljoen jaar geleden. Bij gematigde omstandigheden moeten we ons een bijna 20° warmer klimaat voorstellen, zoals nu in Siberië bij de boomgrens. Beide opvattingen over de klimaats- en landschapsgeschiedenis van Antarctica lijken zich moeilijk met elkaar te verenigen. Terwijl de ene groep gedurende 15 miljoen jaar of langer een stabiel poolklimaat veronderstelt, ziet de andere groep in dezelfde periode een afwisseling van polaire en meer gematigde omstandigheden. Dit is al meer dan tien jaar het onderwerp van een verhit debat, waarvan het eind nog niet in zicht is.
Op grond van onze eigen onderzoeksresultaten (Van der Wateren et al., 1999; Van der Wateren and Hindmarsh, 1995) komen we tot de conclusie dat de grote contrasten in landschapsgeschiedenis terug te voeren zijn op de verschillen in tektonische ontwikkeling van delen van het gebergte. Dat kan verklaren waarom in het ene gebied landschappen over uitzonderlijk lange perioden bewaard kunnen blijven, terwijl landschappen elders voortdurend door uitbreidingen van de ijskap worden overreden en verjongd.

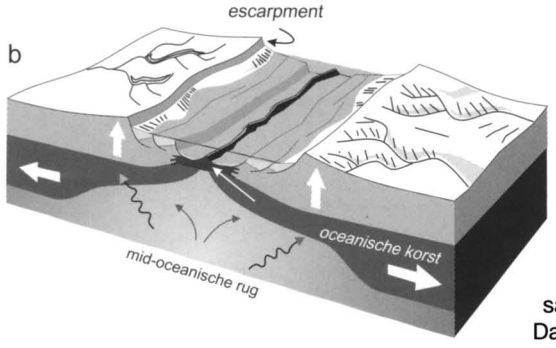
Dankwoord

Deelname aan drie Duitse en twee Amerikaanse expedities naar Antarctica werd mogelijk gemaakt door het Nederlands Antarctisch Programma (NAAP), de NWO-stichting Aard- en Levenswetenschappen (ALW), de Nederlandse Onderzoeksschool voor Sedimentaire Geologie (NSG), de Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Duitsland) en de National Science Foundation (NSF, USA).

WWW-links

De volgende sites over Antarctica op het wereldwijde web zijn een bezoek waard.
Glacier, site met algemene informatie over Antarctica voor het onderwijs: *http://www.glacier.rice.edu/*
British Antarctic Survey: *http://www.nerc-bas.ac.uk/*





Riften

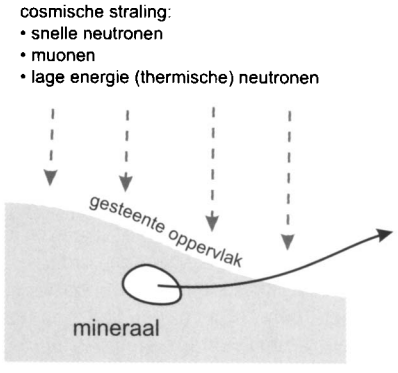
Een rift is een langgerekte depressie, waar de totale dikte van de lithosfeer gedeformeerd is onder invloed van horizontale uitrekking (extensie). Het gaat hierbij om honderden tot enkele duizenden kilometers lange strukturen, zoals de Oost-Afrikaanse Rift, het West-Antarctische Rift Systeem, de Baikal Rift en de Rijndalslenk. Als gevolg van de extensie, die met de tijd toeneemt, is de lithosfeer onder de rift dunner geworden, wat wordt gecompenseerd met een toevoer van heet mantelmateriaal in de asthenosfeer. Riften bevatten dan ook veelal matig tot sterk alkalische vulkanische gesteenten.
Continentale riften kunnen het begin zijn van de vorming van een nieuwe oceaan. Wanneer de horizontale extensie groot genoeg is, ontstaat in het midden van de rift een spreidingszone, die gemarkeerd wordt door een oceanische rug.
Vandaaruit wordt nieuwe oceanische korst gevormd. Iets dergelijks vindt vermoedelijk in het noordelijke deel van de Oost-Afrikaanse Rift plaats. In de Ross Zee is het nog niet zo ver en de West-Antarctische Rift is een duidelijk voorbeeld van een continentale rift.
Veel riftsystemen hebben een of meer opgeheven flanken of riftschouders, die aan de kant van de rift begrensd worden door een steil escarpment. Opheffing van een riftflank is het gevolg van tektonische krachten, die samenhangen met de horizontale extensie van de lithosfeer. Daarnaast speelt de aanvoer van warmte vanuit de mantel een rol, waardoor de lithosfeer aan de rand van de rift een lagere dichtheid krijgt. Bovendien vindt een opwaartse beweging van de lithosfeer plaats waar gesteente door erosie is verwijderd. Omdat de lithosfeer zich gedraagt als een stijve elastische plaat, is dit effect van flank-opheffing merkbaar in een vaak enkele honderden kilometers brede zone langs de rift.
Erosiemateriaal van de riftflanken wordt als sediment in het lage deel van de rift afgezet. De belasting van de plaatselijk dunne lithosfeer met soms meerdere kilometers sediment veroorzaakt een verdere daling van de riftbekkens.
Het Victoria Land Bekken in de Ross Zee is bijvoorbeeld gevuld met meer dan 14 kilometer sediment.

International Antarctic Centre, Christchurch, New Zealand:
http://www.iceberg.co.nz/
Secrets of the Ice from the Museum of Science, Boston:
http://www.secretsoftheice.org/
Home page van Dick van der Wateren:
http://www.geo.vu.nl/~watd/

Literatuur

- Behrendt, J.C. 1999. Crustal and lithospheric structure of the West-Antarctic Rift System from geophysical investigations – a review. Global and Planetary Change, 23(1-4).
- Bell, R.E. et al., 1998. Influence of subglacial geology on the onset of a West-Antarctic ice stream from aerogeophysical observations. Nature, 394: 58-62.
- Eyles, N., 1993. Earth's glacial record and its tectonic setting. Earth Science Reviews, 35: 1-248.
- Hambrey, M.J. and Barrett, P.J., 1993. Cenozoic sedimentary and climatic record, Ross Sea region, Antarctica. In: J.P. Kennett and D.A. Warnke (Editors), The Antarctic Paleoenvironment: a Perspective on Global Change. Antarctic Research Series. AGU, Washington, D.C., pp. 91-124.
- Knip, K. 2000. Koud stromend ijs. NRC-Handelsblad, Wetenschap & Onderwijs. 5 februari 2000, 41.
- LeMasurier, W.E. and Landis, C.A., 1996. Mantle-plume activity recorded by low-relief erosion surfaces in West-Antarctica and New Zealand. Geological Society of America Bulletin, 108(11): 1450-1466.
- Murphy, J.B., Oppliger, G.L., Brimhall, G.H.J. and Hynes, A., 1999. Mantle plumes and mountain building. American Scientist, 87(2).
- Nyamweru, C.K., 1996. The African Rift System. In: W.M. Adams, A.S. Goudie and A.R. Orme (Editors), The Physical Geography of Africa. Oxford University Press, Oxford, pp. 18-33.
- Oppenheimer, M., 1998. Global warming and the stability of the West-Antarctic Ice Sheet. Nature, 393: 325-332.
- Sugden, D.E. et al., 1995. Preservation of Miocene glacier ice in East Antarctica. Nature, 376(6539): 412-414.
- Van der Wateren, F.M. and Cloetingh, S.A.P.L. (Editors), 1999. Lithosphere Dynamics and Environmental Change of the Cenozoic West-Antarctic Rift System. Global and Planetary Change, Special Issue, 23, 248 pp.
- Van der Wateren, F.M. et al., 1999. Contrasting Neogene denudation histories of regions in the Transantarctic Mountains, northern Victoria Land, Antarctica, constrained by cosmogenic nuclide measurements. Global and Planetary Change, 23(1-4): 145-172.
- Van der Wateren, F.M. and Hindmarsh, R.C.A., 1995. East Antarctic ice sheet; stabilists strike again. Nature, 376(6539): 389-391.
- Wörner, G. 1999. Lithospheric dynamics and mantle sources of alkaline magmatism of the Cenozoic West-Antarctic Rift System. Global and Planetary Change, 23(1-4).

exposie datering van geomorfologische oppervlakken met behulp van *in situ* geproduceerde cosmogene isotopen



^{3}He	stabiel	silicaten, olv, pyr, basalt
^{10}Be	1.5 milj.jr.	qtz, olv
^{14}C	5.7 duiz.jr.	qtz, silicaten
^{21}Ne	stabiel	qtz, olv, plag
^{26}Al	0.7 milj.jr.	qtz, olv
^{36}Cl	0.3 milj.jr.	Ca, K, Cl, div. gesteenten

Exposiedatering

Dit is een betrekkelijk nieuwe methode, waarmee landschapsvormen, zoals rivierterrassen, morenen en erosie-oppervlakken, gedateerd kunnen worden. De methode berust op het principe dat een oppervlak, dat blootgesteld is aan de atmosfeer, gebombardeerd wordt met kosmische deeltjes, zoals neutronen en muonen. Door de energie van de botsing van zo'n deeltje met atomen in de mineralen van het gesteente-oppervlak, worden door splijting nieuwe atomen gevormd: cosmogene isotopen. Bepaalde elementen kunnen een variatie aan cosmogene isotopen produceren. Zuurstof, in het kristalrooster van het wijdverspreide mineraal kwarts, kan zo worden omgezet in het stabiele edelgas-isotoop ^{3}He en de radioactieve isotopen ^{10}Be, met een halfwaardetijd van 1,5 miljoen jaar en ^{14}C, met een halfwaardetijd van 5700 jaar (zie tabel). Uit silicium, in kwarts of andere mineralen, kan zo ^{3}He, ^{10}Be, ^{21}Ne of ^{26}Al worden gevormd.
Van al deze cosmogene isotopen is de snelheid waarmee ze worden geproduceerd redelijk goed bekend. Die is afhankelijk van de geografische (eigenlijk magnetische) breedte, omdat de kosmische straling aan de magnetische polen het sterkst is. De produktiesnelheid neemt ook toe met de hoogte, omdat de atmosfeer de kosmische deeltjesstraling afschermt. Water en ijs hebben een nog sterkere afschermende werking, zodat de produktie van cosmogene isotopen pas begint als een landoppervlak drooggevallen of ijsvrij geworden is.
In principe is het dan mogelijk, door meting van de concentratie cosmogene isotopen in geschikte mineralen (bijv. olivijn en pyroxeen voor ^{3}He, kwarts voor ^{10}Be, ^{26}Al en ^{21}Ne) of gesteenten (bijv. basalt of doleriet voor ^{3}He en ^{36}Cl) de lengte te bepalen van de periode dat een oppervlak heeft blootgestaan aan kosmische straling (exposie). Deze concentraties zijn in het algemeen extreem laag en kunnen dan ook alleen met een gevoelige massaspectrometer worden bepaald. Op de Faculteit Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam beschikken we over een edelgas-massaspectrometer, waarmee ^{3}He en ^{21}Ne gemeten worden. Voor de meting van ^{10}Be en ^{26}Al, die in nog veel lagere concentraties voorkomen, hebben we in het verleden samengewerkt met een laboratorium van de Universiteit van Keulen en de massaspectrometer van de ETH in Zürich.
Tegenwoordig werken we daarvoor samen met het Van de Graaff Laboratorium van de Universiteit Utrecht.
Op de VU hebben we inmiddels een groot aantal monsters uit Antarctica, Namibië, Spanje en de Canarische Eilanden gemeten. Sommige Antarctische monsters zijn afkomstig van de oudste morfologische oppervlakken die met deze methode gemeten zijn en hebben een exposie-ouderdom van 11,2 miljoen jaar.
We gebruiken deze techniek ook voor andere toepassingen dan datering, zoals de bepaling van de snelheid van denudatie van een landschap, of de bewegingssnelheid van breuken.