

Grondboor & Hamer

Tweemaandelijks tijdschrift van de Nederlandse Geologische Vereniging
Jaargang 53 (1999) nummer 3/4

Inhoud van dit nummer:

- 49 Harry N.A. Priem: In den Beginne - Dageraad van de Aarde.
- 54 Jeroen van Rhijn: Het grootste antimonietkristal ter wereld.
- 56 Hans Steur: Sporenaren van wolfsklauwbomen.
- 59 Hans Steur: Sporenaren van paardenstaartbomen.
- 62 Peter Venema: Granuliet.
- 70 Frank Gelaude: Enkele kritische opmerkingen over aardwetenschappelijke begrippen in Nederlandstalige woordenboeken en de vakliteratuur.
- 76 Hans Bongaerts: Groene jaspis uit midden-pleistocene afzettingen van Arcen.
- 81 Peter Venema: Van der Lijn-onderscheiding voor Freek Rhebergen.
- 83 Fred Rabe: Geovaria.

In den Beginne - Dageraad van de Aarde

Harry N.A. Priem

Prof. dr. H.N.A. Priem, hoogleraar planetaire geologie Universiteit Utrecht en curator Artis Geologisch Museum te Amsterdam.

Samenvatting van de lezing op de Landelijke Contactdag van de Nederlandse Geologische Vereniging op zaterdag 6 maart 1999 te Utrecht.

Het 'geologisch archief', de in gesteenten geregistreerde geschiedenis van onze planeet, begint 3,962 miljard jaar geleden met de intrusie van het oudste bewaard gebleven aardse gesteente, de Acasta-dioriet in Noordwest-Canada (door latere geologische processen tot gneis gemetamorfoseerd). Toen had de Aarde echter al een geschiedenis van 610 miljoen jaar achter zich. Het begin van haar bestaan ligt in de explosie ('supernova') van een 'opgebrande' oude ster veel groter dan onze Zon. De explosie bracht de samentrekking op gang van

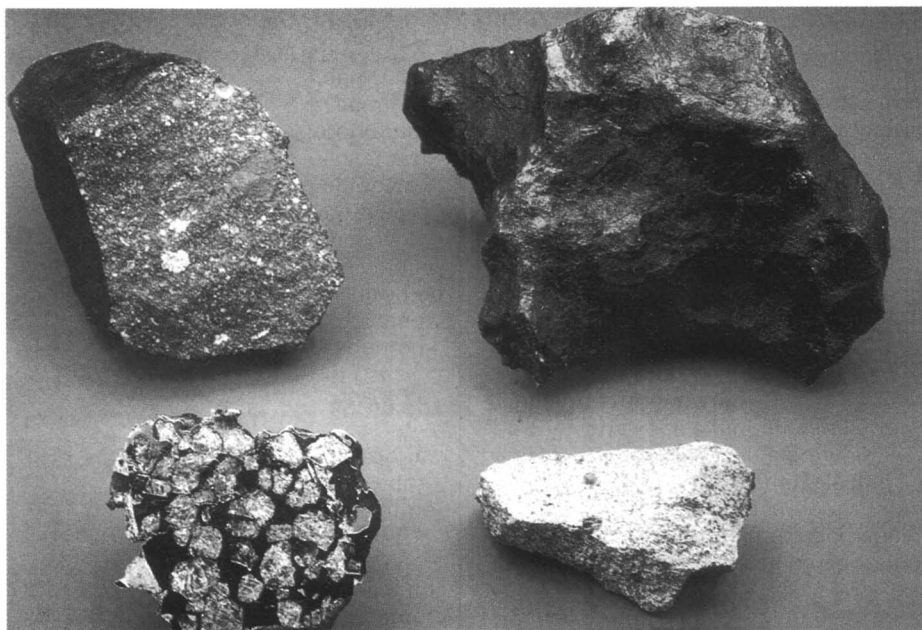
een nabije interstellare wolk bestaande uit waterstof en helium, naast geringe hoeveelheden zwaardere elementen, stof en gruis. Ruim 99 procent van de materie van de wolk werd in het centrum geconcentreerd, waar de oplopende druk de temperatuur tot zo'n 10 miljoen graden Kelvin deed stijgen. Bij die temperatuur beginnen spontaan kernfusiereacties op te treden waarbij waterstof wordt omgezet in helium. Dit luidde de geboorte van een nieuwe ster in, onze Zon. De resterende materie (minder dan 1 procent) balde samen ('accretiseerde') tot de

andere objecten van ons zonnestelsel. Hierbij kwam veel gravitatieve warmte vrij. Daarnaast werd ook veel warmte geproduceerd door het verval van kort en lang levende radioactieve stoffen. Al deze warmte was ruim voldoende om de geaccretiseerde gesteentemas-sa's grotendeels te doen smelten, waarna differentiatie optrad in een kern hoofdzakelijk bestaande uit nikkelhoudend ijzer omhuld door een mantel van voornamelijk ijzer-magnesiumsilicaten. De kernseparatie genereerde opnieuw een flux van gravitatieve warmte.

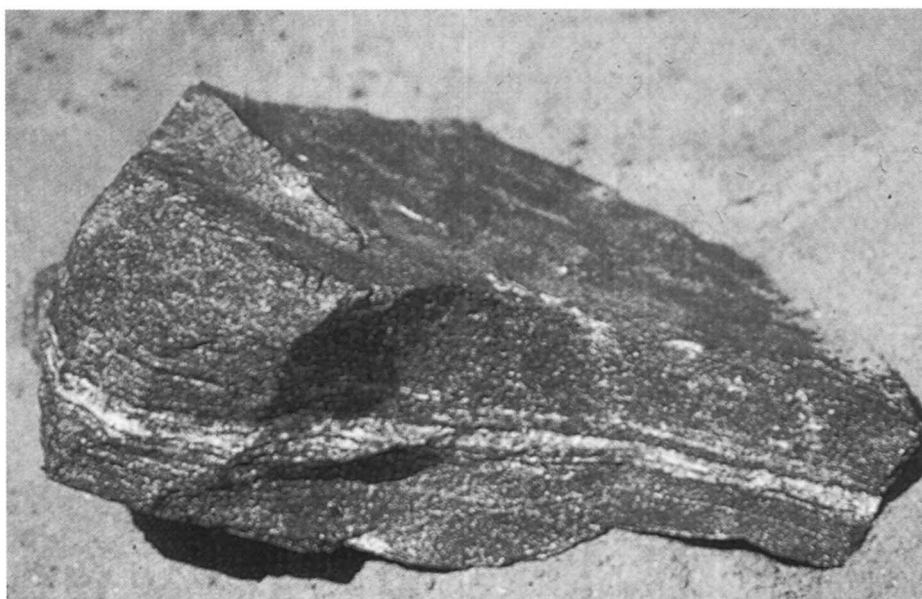
Meteorieten zijn de enige gesteenten waarover we kunnen beschikken die dateren uit de vroegste jeugd van het zonnestelsel. Hun vormingsouderdom ligt rond 4,57 miljard jaar. Isotopen-anomalieën in deze gesteenten laten zien dat er ten tijde van hun consolidatie nog kort levende, thans al lang uitgestorven radioactieve stoffen aanwezig waren (zoals aluminium-26, met een halveringstijd van 760.000 jaar). De anomalieën worden ook waargenomen in aardse basaltlava's die uit de diepste mantel afkomstig zijn (in 'hot spots'). Dit impliceert dat tussen de explosie van de 'oerster' (waarin de kort levende radioactieve stoffen zijn gesynthetiseerd) en de differentiatie en consolidatie van de meteoriet- en mantelgesteenten ten hoogste zo'n 5 miljoen jaar is verlopen. De geboorte van ons zonnestelsel was dus, geologisch gezien, een zeer snel proces dat zich 4,57 miljard jaar geleden heeft voltrokken.

De eerste 610 miljoen jaar van de aardgeschiedenis heeft nauwelijks sporen nagelaten - zij zijn door jongere geologische processen uitgewist. De enige directe overblijfselen van aardse oorsprong zijn enkele detritische zirkonen met ouderdommen van 4,2-4,3 miljard jaar in jongere (3,2 miljard jaar oude) sedimenten. Zij tonen aan dat er toen al enige dioritisch-granitische korst moet zijn geweest. Deze duistere beginperiode, het *Hadeïcum*, wordt afgesloten met de intrusie van de Acasta-dioriet die het begin van het *Archeïcum* markeert. Dat de geologische evolutie in het Hadeïcum toch in grote lijnen kan worden gereconstrueerd, danken we vooral aan de geologische kennis die in het ruimtevaart-tijdperk is verworven van onze burens, in het bijzonder de Maan. Door haar kleine massa was de Maan al 3,2 miljard jaar geleden zover afgekoeld dat zij sindsdien 'geologisch dood' is. Sporen uit haar vroegste jeugd zijn daardoor wél bewaard gebleven.

Volgens de huidige inzichten ontstond de Maan kort na de accretie en differentiatie van de Aarde, toen een groot planetair object met onze planeet in botsing kwam. Het puin van het verbrijzelde inslaande object en het uit de aardmantel losgeslagen materiaal balde onder invloed van gravitatieve krachten samen tot de Maan. De hierbij gegenereerde warmte deed een maanomspannende magma-oceaan ontstaan, waarin een differentiaat van voornamelijk veldspaten kwam boven-drijven. Dat consolideerde tot de *anorthositische* maankorst. Ouderdomsbepalingen van anorthositmonsters die door de Apollo-expedities naar de Aarde zijn gebracht, laten zien dat dit proces 4,44 miljard jaar geleden was voltooid. Talloze inslagen van interplanetair gruis van allerlei afmetingen gaven de korst het



Afb. 1. Meteorieten. Links boven: koolstofvrije chondriet (Allende); rechts boven: ijzermeteoriet (Canyon Diablo); links onder: steen-ijzer pallasiet (Ilmamac); rechts onder: primitieve chondriet (Mern). Al deze meteorieten hebben een ouderdom van 4,57 miljard jaar.

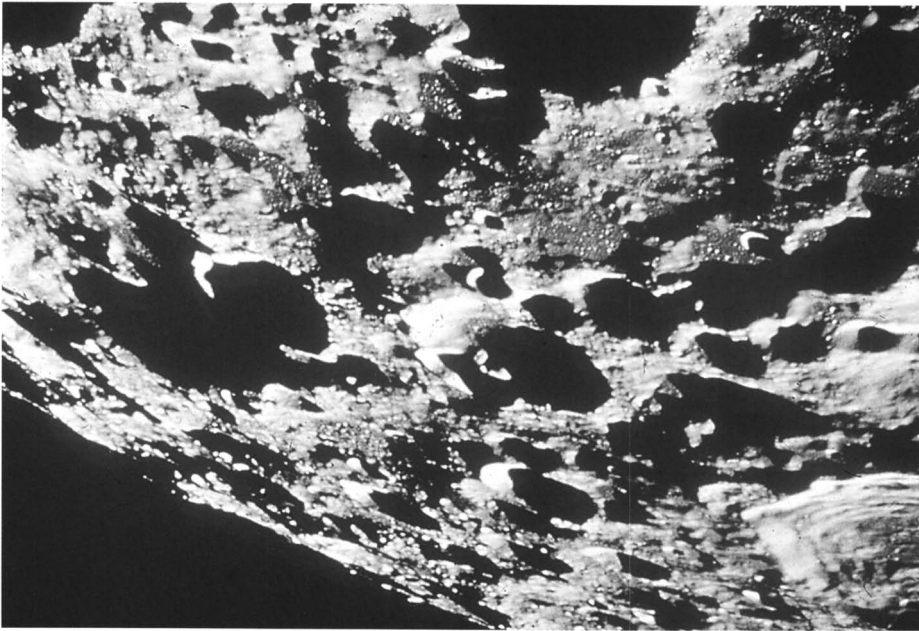


Afb. 2. Acasta-diorietgneis, Noordwest-Canada. Met een ouderdom van 3,96 miljard jaar is dit het oudste bewaard gebleven aardse gesteente. (Handstuk 40 cm lang; Artis Geologisch Museum).

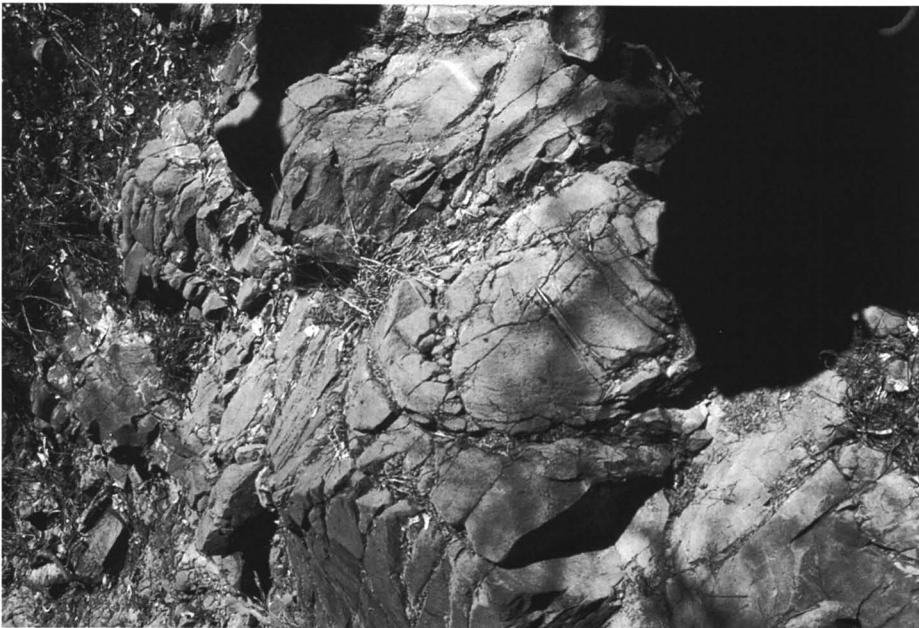
pokdalige uiterlijk dat de Lunar Highlands karakteriseert. Ouderdomsbepalingen tonen aan dat de meeste inslagen tussen 4,1 en 3,9 miljard jaar geleden plaatsvonden, tijdens het *Kosmisch Bombardement*. Zeer zware inslagen vormden enorme depressies, de *maria*, en initieerden daarin *basaltisch* vulkanisme dat tot ongeveer 3,2 miljard jaar geleden actief was. De basaltlava's stroomden uit over de oude anorthositische korst en zijn verantwoordelijk voor de vlakke bodem met weinig inslagkraters en het donkere uiterlijk van de maria.

In haar vroegste jeugd moet ook op Aarde een magma-oceaan zijn gevormd. Door de grotere zwaarte-

kracht en het aanwezige water (in tegenstelling tot de gortdroge maangesteenten) differentieerde en consolideerde hieruit echter geen anorthositische, maar een *basaltische* korst. Hiervan is niets bewaard gebleven. Evenals de Maan, moet ook onze planeet 4,1-3,9 miljard jaar geleden tijdens het 'Kosmisch Bombardement' door inslagen zijn geteisterd. Op basis van het aantal kraters op de Maan en hun ouderdommen is berekend dat op Aarde toen tenminste 3.000 kraters met een diameter van meer dan 100 km moeten zijn gevormd, waarvan zo'n 25 met een diameter van meer dan 1.000 km, naast talloze kleinere kraters. Ook hiervan is niets bewaard gebleven.



Afb. 3. Highlands op de Maan, bestaande uit anorthositische korst met een ouderdom van 4,44 miljard jaar. Het pokdalige uiterlijk is te danken aan het 'Kosmisch Bombardement' rond 4 miljard jaar geleden.



Afb. 4. Komatiitische kussenlava, 3,66 miljard jaar oud. Bellingwe Formatie, Zimbabwe.

De geologische registratie van de condities aan het aardoppervlak begint met de oudste bewaard gebleven sedimenten: de 3,8 miljard jaar oude formaties aan de kop van de Godthåbsfjord in West-Groenland. Deze laten zien dat er toen al oceanen waren waarin zich de normale sedimentatieprocessen voltrokken, dat het oceaanwater warmer was (misschien wel 70-80 °C), dat de dampkring voornamelijk uit CO₂ bestond en nauwelijks O₂ bevatte, en dat het water vol (vermoedelijk bacterieel) leven was. De archeïsche Aarde was een 'oceanische planeet', met slechts weinig droog land in de vorm van vulkanische (basaltische) eilanden en kleine stukjes continentale korst. Die toestand hand-

haafde zich tot 3,0-2,5 miljard jaar geleden. Toen veranderde het aanzicht van de Aarde drastisch doordat geologische processen uit de basaltische korst zo'n 70 procent van het huidige volume van de *continentale korst* genereerden. Onze planeet kreeg haar 'moderne' (hoewel met de tijd continu veranderend) uiterlijk, met een verdeling in ruwweg 40 procent hoger gelegen continentale korst (met de primaire samenstelling van *dioriet*, waaruit door jongere geologische processen de veelheid van gesteentetypen is ontstaan die thans de continentale korst uitmaken) en 60 procent lager gelegen oceanische (basaltische) korst. De overgang van de oude 'oceanische' naar de 'moderne' Aarde markeert de

grens tussen *Archeïcum* en *Proterozoïcum*.

Inwendig was de Aarde in het Archeïcum warmer dan nu. Met het verstrijken van de tijd koelt elk planeetair lichaam geleidelijk af door de afname van de radiogene warmteproductie en het verlies van de bij accretie en kernseparatie vrijgekomen warmte. De afkoeling gaat sneller naarmate het lichaam kleiner is. De kleine Maan en Mercurius zijn dan ook al lang 'geologisch dood', Mars (1/10 van de aardmassa) is op sterven na dood (misschien is er nog enig vulkanisme), maar de grotere planeten Venus en Aarde zijn geologisch nog volop actief. Ook van deze planeten neemt de endogene geologische activiteit echter langzaam af, tot zij tenslotte geheel zal ophouden. Dat de archeïsche Aarde inwendig warmer was dan nu, blijkt onder andere uit de vele *komatiïeten* uit die tijd, ultrabasische lava's die in jongere afzettingen uiterst schaars zijn. Komatiitisch magma ontstaat uit mantelgesteente (*peridotiet*) bij temperaturen rond 1500 °C, zo'n 300 °C hoger dan de temperatuur waarbij basaltisch magma genereert.

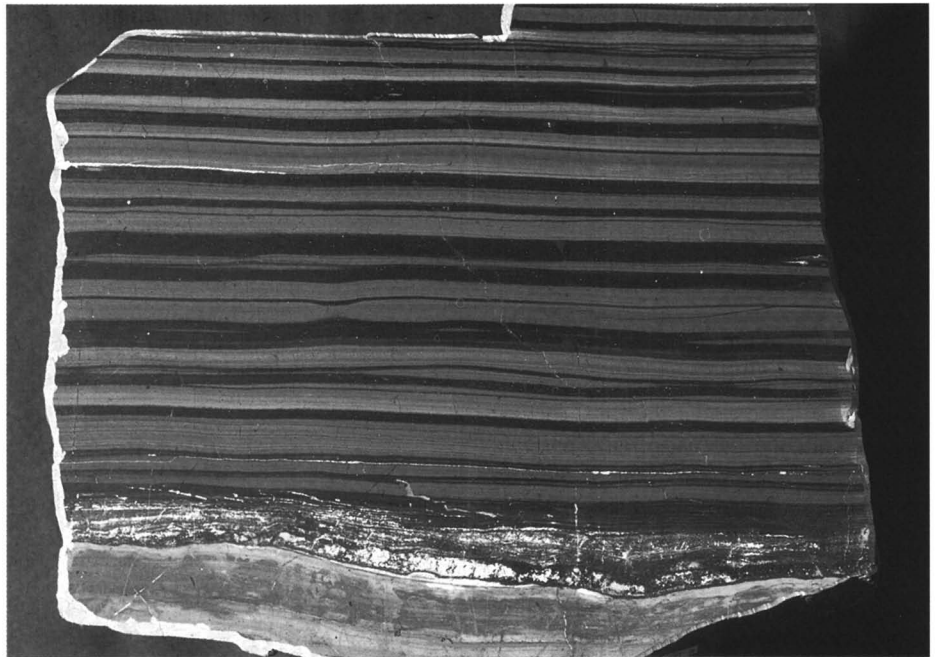
In tegenstelling tot de geleidelijk afkoelende Aarde, wordt de Zon met het verstrijken van de tijd warmer. In de 4,57 miljard jaar van zijn bestaan is de warmteafgifte van de Zon lineair met zo'n 30 procent toegenomen. Toch is de temperatuur van de onderste dampkring in de 3,8 miljard jaar van de geregistreerde aardgeschiedenis steeds in het beperkte gebied gebleven waar vloeibaar water kan bestaan, in ieder geval op de lagere breedtegraden. Al die tijd functioneert er dus een *aardse thermostaat*, een interactief systeem van dampkring, biosfeer en aardoppervlak dat de temperatuur binnen nauwe grenzen houdt. Binnen die grenzen was het op de archeïsche Aarde ondanks de koudere Zon warmer dan nu. Dit wijst op een andere warmtehuishouding, zoals een grotere warmteafgifte van de planeet en een lagere albedo door het veel grotere wateroppervlak. De eerste 'ijstijd' (ijskap op hogere breedtegraden) treedt pas 2,3 miljard jaar geleden op.

Zo'n 2,5 miljard jaar geleden begon de aardse dampkring te veranderen door de geleidelijke accumulatie van zuurstofgas (O₂). Dit gas hoort, puur chemisch gezien, niet in de dampkring thuis: het wordt voortdurend door allerlei oxideerbare stoffen gebonden, vooral door tweewaardig ijzer (de primaire vorm van ijzer in aardse gesteenten). Dat de huidige dampkring toch voor 21 procent uit O₂ bestaat, is te danken aan het operationeel zijn van een complex dynamisch evenwicht tussen biologische, geologische en chemische processen. Aan de basis staat de *fotosynthese*, het proces

waarbij cyanobacteriën en planten energie van zonlicht benutten om CO_2 en water om te zetten in koolhydraten (biomassa) onder afgifte van O_2 . Dit proces verloopt bij rotting (verbranding) en ademhaling ook weer in tegengestelde richting, maar een deel van de geproduceerde biomassa wordt door geologische processen in sedimenten 'begraven'. Daar blijft het opgeslagen in de vorm van koolstof en koolstofverbindingen in sedimenten, en in afzettingen van veen, turf, bruinkool, steenkool, aardolie en aardgas. Voor elk koolstof-atoom dat zo aan de dampkring wordt onttrokken, blijft een zuurstof-molecuul in de dampkring achter.

In het Archeïcum was er ook al een grootschalige productie van zuurstofgas door cyanobacteriën, maar toch bestond de dampkring hoofdzakelijk uit CO_2 en slechts zeer weinig O_2 , voornamelijk afkomstig van de dissociatie van watermoleculen in de hoge lagen van de dampkring onder invloed van ultraviolette straling van de Zon (in onze tijd is dit dissociatieproces verantwoordelijk voor ongeveer 0,1 procent van het atmosferisch O_2). Men neemt aan dat de accumulatie van O_2 in de dampkring toen werd geblokkeerd door de activiteit van mariene chemosynthetiserende bacteriën, die hun energie voor levensfuncties ontleen aan diverse oxidatieprocessen. Vooral de oxidatie van tweewaardig ijzer tot het veel minder oplosbare driewaardig ijzer moet belangrijk zijn geweest. Hierdoor ontstonden de reusachtige afzettingen van hematiet (Fe_2O_3) in de kilometersdikke 'Banded Iron Formations' (BIF's) die zo karakteristiek zijn voor het Archeïcum. Zij leveren tegenwoordig nagenoeg alle ijzer voor onze industriële samenleving.

Aan deze toestand kwam een eind door de drastische verandering van het aardoppervlak als gevolg van de enorme uitbreiding van de continenten 3,0-2,5 miljard jaar geleden. In samenhang hiermee was er ook een forse uitbreiding van de ondiepe zeeën langs de continentranden. Aangezien kustnabije zeeën (ook nu nog) in biologisch opzicht de productiefste milieus zijn, heeft dit de biosfeer ingrijpend beïnvloed. De rol van chemosynthetiserende bacteriën in de regulatie van de dampkring werd minder belangrijk, zodat O_2 in de dampkring begon te accumuleren. Dat maakte de evolutie van protozoën en meercellige levensvormen mogelijk, die een omgeving met (tenminste een weinig) O_2 nodig hebben. Daarnaast bleef de 'bacteriële wereld' van het Archeïcum bestaan -- zij vormt nog steeds de essentie van de biosfeer. De O_2 -concentratie van de dampkring steeg echter maar langzaam en bleef lange tijd te laag om een ozonlaag (O_3) te onderhouden, die



Afb. 5. Gebande ijzerformatie (Banded Iron Formation, BIF), een afwisseling van dunne laagjes hematiet (donker) en jaspis (licht rood), uit een 3,5 miljard jaar oude sedimentaire afzetting in West-Australië. (Handstuk 22 cm lang; Artis Geologisch Museum).



Afb. 6. De oudste 'echte' fossielen op Aarde zijn van bacteriën, zoals deze 3,5 miljard jaar oude stromatoliet in West-Australië. Stromatolieten zijn bouwsels van complexe bacteriële levensgemeenschappen.



Afb. 7. Droge rivierdalen op Mars wijzen erop, dat 4 à 3 miljard jaar geleden een overvloed van water vrijelijk over het oppervlak stroomde. (Het afgebeelde gebied is ongeveer 200 x 140 km groot.)



Afb. 8. Mondingsgebied van Ares Vallis op Mars, gezien vanuit de Pathfinder in 1997.

dicht genoeg was om de voor leven schadelijke ultraviolette straling van de Zon tegen te houden. Vrijwel alle leven speelde zich derhalve in het mariene milieu af, waar water de UV-straling filtert. Pas rond 470 miljoen jaar geleden, in het *Ordovicium*, had de ozonlaag de dichtheid bereikt die flora en fauna in staat stelde om zich op grote schaal over land te verbreiden.

De koolstofisotopen-samenstelling van de sedimenten in de Godthåbsfjord laat zien dat er tijdens hun afzetting al overvloedig marien leven was. Fossielen zijn hierin (nog) niet gevonden, maar aangezien er tot zo'n 2,5 miljard jaar geleden uitsluitend bacte-

rieel leven was, neemt men aan dat het leven ten tijde van de Godthåbsfjord-sedimentatie, 3,8 miljard jaar geleden, ook bacterieel was. De eerste echte fossielen, van bacteriën, worden gevonden in 3,5 miljard jaar oude sedimenten in Australië en zuidelijk Afrika. Het leven moet dus in ieder geval vóór de afzetting van de Godthåbsfjord-sedimenten vaste voet op Aarde hebben gekregen. Hoe dat in zijn werk is gegaan, is nog steeds een onopgelost vraagstuk. In dit verband is het geologisch onderzoek van andere planeten actueel. Op Mars, bijvoorbeeld, heersten tot 4 à 3 miljard jaar geleden ongeveer dezelfde condities als op de jonge Aarde: een

temperatuur waarbij vloeibaar oppervlaktewater in de vorm van regen, rivieren, meren en misschien oceanen kon bestaan, onder een dampkring met een dichtheid van 1-2 bar groten-deels bestaande uit CO₂. Op onze planeet floreerde onder ruwweg dezelfde condities bacterieel leven, dus is het zeer wel denkbaar dat dit ook op Mars het geval was. De Amerikaanse ruimtevaartorganisatie NASA is dan ook voornemens om in het komende decennium met behulp van een onbemande Marslander monsters van de oudste sedimenten te nemen en naar de Aarde te brengen, om ze hier te onderzoeken op eventuele sporen van vroeger leven. In 1996 meende men hiervoor al indicaties te hebben gevonden, onder andere fossielen van nanobacteriën, in barstjes in een 4,5 miljard jaar oude Marsmeteoriet (een basaltische lava). Dit heeft wereldwijd voor grote opwinding gezorgd. Later onderzoek maakte de realiteit van deze 'martiaanse levenssporen' echter zeer dubieus.

In onze tijd heersen op Mars condities die zeer onvriendelijk zijn voor alle levensvormen, hoewel experimenteel is aangetoond dat sommige soorten aardse *archebacteriën* er zouden kunnen overleven en zich zelfs vermenigvuldigen. Het is echter niet uitgesloten dat diep in de ondergrond van Mars ecosystemen van (chemosynthetiserend) microbieel leven floreren. Recentelijk is ontdekt dat dit op Aarde althans het geval is, tot op dieptes van zo'n 4 km. Dit eventuele ondergrondse leven zou dan kunnen afstammen van microbiële levensvormen die zich 4 à 3 miljard jaar geleden van het oppervlak hebben teruggetrokken, toen Mars in de greep van de huidige barre condities kwam. Ook de 'intraterrestrische' microbiële levensvormen op Aarde stammen af van leven dat miljoenen tot miljarden jaren geleden door geologische processen van het oppervlak is geïsoleerd.

Zelfs acht men sinds de ontdekking van Maan- en Marsmeteorieten een 'interplanetaire migratie' van micro-organismen niet meer onmogelijk. Deze zouden in de vorm van sporen, of als 'slappende' cellen die door cysten zijn ingekapseld, kunnen meereizen met gesteentefragmenten die door zware inslagen uit een planetair oppervlak zijn geslagen en in de ruimte terecht zijn gekomen. Zo zou 'bevruchting' met leven van buiten tot stand kunnen komen. Het leven dat in het Hadeïcum of de eerste 200 miljoen jaar van het Archeïcum vaste voet op Aarde kreeg, hoeft dus niet per se hier te zijn ontstaan.

Literatuur

Priem, H.N.A., 1997. Aarde - een planetaire visie. Assen (Van Gorcum), 131 pp.