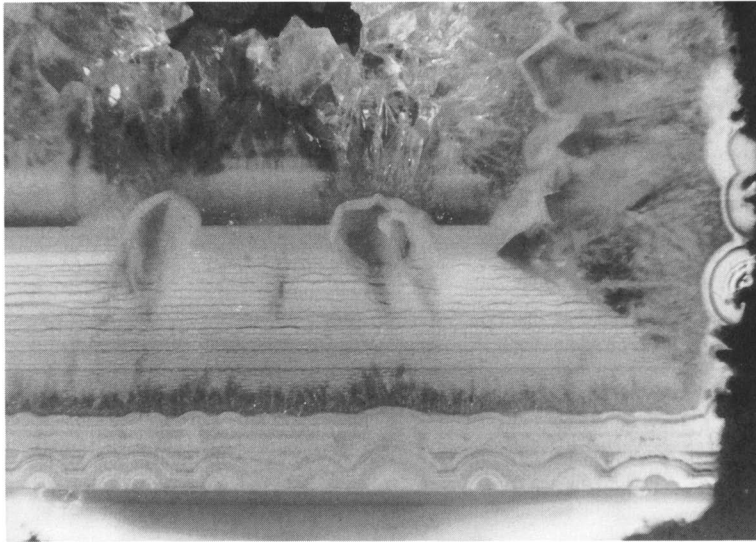




Afb. 15. Agaats, waarin de groei van kwarts belemmerd werd door het neerslaan van Uruguay-banden. Slechts weinig van de van beneden naar boven groeiende kwarskristallen hebben dit "overleefd". Agaatzones met gewone gebandheid bestaan ook hier uit duidelijke sferulieten.

Kurzfassung "Zur Frage der Achatentstehung"

In der sehr kontroversen petrologischen Diskussion um die Entstehung der Achate wird in jüngster Zeit (z.B. von Blankenburg 1988, p. 146) die bereits von Krämer (1955, pp. 199 f.) geäußerte Vorstellung wieder vertreten, daß Achate nach mehreren grundverschiedenen Mechanismen bei völlig unterschiedlichen P-T-Bedingungen entstehen können. Hierdurch wird das wissenschaftstheoretische Problem der Induktion in der aktuellen Achat-

Diskussion besonders brisant. Wirklich **allgemeingültige** Aussagen zum P-T-Bereich der Achatgenese sind auf zweierlei Weise möglich.

1. Man kann Eigenschaften, die bereits in der Definition von "Achat" stecken, petrogenetisch auswerten. Hierzu ist die Eigenschaft "kryptokristallin" geeignet: Grundzüge einer Gefüge-Thermometrie der Achate werden vorgestellt, wobei das thermische Reifungsverhalten von kontaktmetamorph belasteten Cherts (Keller *et al.* 1985, Joesten 1983) zur physikalisch-chemischen Orientierung dient. Kryptokristalline Quarz-Aggregate verlieren ihren kryptokristallinen Charakter, wenn sie für längere Zeit den P-T-Bedingungen des magmatischen oder hochmetamorphen Bereichs ausgesetzt werden. Es gibt daher **ganz allgemein** keine Möglichkeit für eine intramagmatische Entstehung der kryptokristallinen Achatsubstanz. Die Abbildungen 7, 8 und 9 zeigen typische Beispiele der elektronenmikroskopischen Morphologie kryptokristalliner Achatzonen (Chalcedon im engeren Sinne).

2. Es läßt sich zeigen, daß der vulkanisch-spätvulkanische P-T-Bereich (T oberhalb der Dampfdruckkurve des Wassers!) ganz allgemein für die Achatgenese entfällt, weil hier die physikalisch-chemischen Bedingungen für einen effektiven SiO_2 -Transport und damit für die SiO_2 -Akkumulation im Achat generell fehlen (vgl. Landmesser 1988).

Achate entstehen im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich. Einige Aspekte des Achatbildungsprozesses werden dargestellt.

Buitenaards Bestaan ?

door Prof. Dr. Harry N.A. Priem
Rijksuniversiteit Utrecht en
Artis Geologisch Museum te Amsterdam

Toen Christiaan Huygens in de heldere nacht van 28 november 1659 met een eenvoudige telescoop de planeet Mars observeerde, slaagde hij er als eerste in om enkele oppervlakedetails in kaart te brengen waarvan we nu weten dat zij corresponderen met reële landschapskenmerken. Het opvallendste detail was een donker, driehoekig gebied dat ruim drie eeuwen later, ten tijde van de planetaire exploratie in het ruimtevaarttijdperk, de naam *Syrtis Major Planum* heeft gekregen — een enorm plateau (441.000 km²) van basaltische lava's. Bij zijn verdere observaties constateerde Huygens dat sommige donkere vlekken op het Marsoppervlak zich in de loop van de seizoenen uitbreiden en weer kleiner worden. In zijn monumentale, in 1698 verschenen werk

Cosmotheoros (wereldbeschouwer) speculeert hij, dat deze seizoengebonden veranderingen zouden kunnen wijzen op het bestaan van vegetatie op Mars, en dat er mogelijk zelfs Marsbewoners zijn. Tegenwoordig weten we echter, dank zij de observaties door onbemande ruimtesondes in de jaren '70, dat de door Huygens en latere waarnemers geconstateerde oppervlakteveranderingen het gevolg zijn van enorme verplaatsingen van fijn sediment door zware, seizoengebonden stormen.

Vóór Huygens hadden anderen al gespeeld met het idee dat de Aarde niet de enige bewoonde planeet is. Toen Galileo Galilei aan het eind van de 16de eeuw als eerste de hemel ging bestuderen door een verrekijker (waarvan de uitvinding wordt toegeschreven aan de Middelburgse brillenslijper Hans Lippershey) en daarmee

aan de wieg stond van het moderne astronomische onderzoek, werd snel onderkend dat de planeten onderling veel gemeen hebben. De logische consequentie was, dat de mogelijkheid onder ogen werd gezien dat er andere planeten zijn waar condities heersen die overeenkomen met die op Aarde, inclusief de aanwezigheid van leven. In 1600 werd de Italiaan Giordano Bruno door de Inquisitie nog tot de brandstapel veroordeeld vanwege zijn veronderstelling dat er in het heelal vele bewoonde planeten zijn, maar in de volgende decennia vond de opvatting algemeen ingang dat leven in een of andere vorm zich ook op andere planeten manifesteert. Naarmate de astronomische kennis toenam, bleek echter al snel dat op de meeste planeten van ons Zonnestelsel condities heersen die leven onmogelijk maken. Alleen Venus en Mars bleven tot in onze eeuw hoge ogen gooien als kandidaat voor buitenaards leven.

Geén Leven

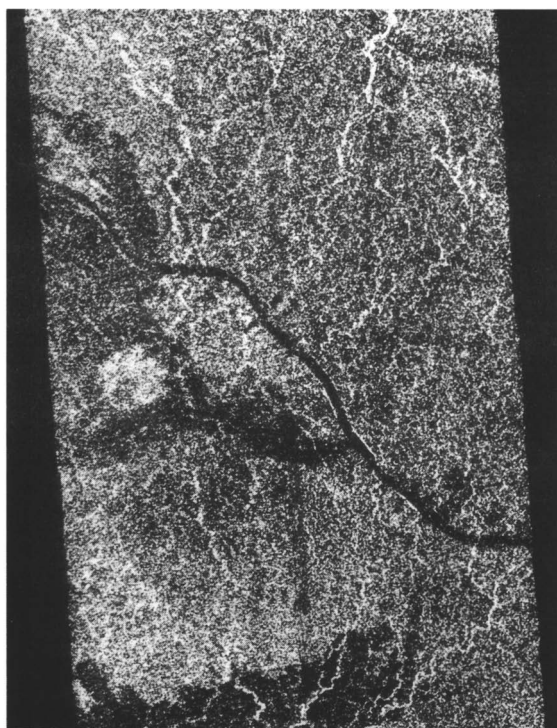
De planetaire exploratie in het ruimtevaarttijdperk heeft ook aan deze illusie een eind gemaakt. Van Venus weten we nu dat deze planeet eerder Dantes hel personificeert dan de godin van de Liefde waarnaar zij is vernoemd. De planeet is omringd door een dik wolkendek, bestaande uit druppels zwavelzuur en zwaveldeeltjes, afkomstig van vulkanisme. De temperatuur aan het oppervlak bedraagt 480 °C, hoog genoeg om lood en tin te doen smelten. De Venusiaanse dampkring bestaat vrijwel geheel uit CO₂, met een verstikkend zware druk aan de basis, 90 maal hoger dan die op Aarde en overeenkomend met de hydrostatische druk op 900 m onder het zeeoppervlak. De *neerwaartse infrarood-flux* ('broeikas-effect') als gevolg van deze dichte CO₂-atmosfeer is verantwoordelijk voor het helse Venusiaanse klimaat. Venus is een droge planeet, met slechts spoortjes water (0,01%) in haar dampkring. Afb. 1.

De isotopische kenmerken van de schaarse watermoleculen, met name de sterke verrijking aan deuterium ($D/H = 10^{-2}$, tegen $1,5 \cdot 10^{-4}$ op Aarde, in meteorieten en in de komeet Halley), wijzen echter op de aanwezigheid van een overvloed aan water in een ver verleden. Het scenario is, dat de planeet door haar kleinere afstand tot de Zon vanaf den beginne zo warm was, dat de waterdamp die als gevolg van vulkanische activiteiten uit de planetaire massa vrijkwam en in de dampkring accumuleerde, nooit haar verzadiging bereikte. Anders dan op de Aarde en Mars, kon het dus nooit

condenseren tot water of sublimeren tot ijs. De hoeveelheid waterdamp in de Venusiaanse dampkring nam dus alsmaar toe, waarbij het 'broeikas-effect' van de H₂O-moleculen de temperatuur steeds verder opdreef. Deze positieve terugkoppeling werd nog versterkt door de ongeremde stijging van de hoeveelheid CO₂, het tweede belangrijke 'broeikas-gas' dat als gevolg van vulkanische activiteiten uit de planetaire massa vrijkomt. Dit in tegenstelling tot de Aarde (en vermoedelijk Mars), waar de stijging van de hoeveelheid CO₂ is afgeremd door oplossing in water en precipitatie als kalksteen (op Aarde is zo 99,99% van alle CO₂ dat in de aardgeschiedenis is vrijgekomen, opgeslagen in de enorme hoeveelheden kalksteen, dolomiet en fossiele biomassa). De positieve terugkoppelingen in het CO₂ — H₂O-temperatuursysteem van de prille Venusiaanse dampkring brachten de planeet in een toestand die wordt aangeduid als *runaway greenhouse*. De hoge temperatuur maakt, dat de gehele Venusiaanse dampkring als gevolg van heftige thermische wervelingen continu van boven naar beneden door elkaar wordt gemengd, in tegenstelling tot de gelaagde structuur van de veel koelere Aardse dampkring. Op Aarde treedt slechts zeer weinig transport op van waterdamp van de onderste laag van de dampkring ('troposfeer') naar de daarboven liggende laag ('stratosfeer'). Die isolatie ontbreekt echter onder de op Venus heersende condities. Waterdamp wordt dan ongeremd tot hoog in de dampkring gebracht, waar de watermoleculen onder invloed van de ultraviolette straling van de Zon dissociëren en de zo ontstane waterstofatomen op grote schaal naar de ruimte ontsnappen. Zo verloor Venus in een tijdspanne van enkele honderden miljoenen jaren al haar water. Tijdens dit proces ontsnapte preferentieel het lichte waterstofisotoop, zodat de in de dampkring achterblijvende watermoleculen verrijkt werden aan het zwaardere deuterium ('zwaar water').

De condities op Venus zijn totaal ongeschikt voor het bestaan van leven en moeten dat zijn geweest sinds het prille begin van de Venusiaanse geschiedenis. Dat is anders op Mars, hoewel er op de rode planeet eveneens onherbergzame condities heersen. De dampkring is uiterst ijl: 0,006 bar aan het Martiaanse oppervlak, overeenkomend met de dichtheid van de Aardse dampkring op een hoogte van 40 km. De Martiaanse dampkring bestaat eveneens vrijwel geheel uit CO₂, maar is te ijl om via het 'broeikas-effect' een gunstig klimaat te creëren. Het is op Mars koud en guur, met felle zandstormen. De temperatuur is overal beneden het vriespunt, met extreem hoge variaties tussen dag en nacht en van polen naar evenaar. Er is water op Mars, maar uitsluitend als ijs in de poolkappen en 'permafrost' in de bodem. Het Martiaanse oppervlak is een uitgestrekte woestijn die, door het ontbreken van een ozonlaag in de dampkring, continu is blootgesteld aan de schadelijke ultraviolette straling van de Zon. De gehele planeet is in de greep van een permanente ijs tijd. Mars is een barse, vijandige wereld, die in de grimmige oorlogsgod een passende naamgever heeft gevonden.

Toch is het denkbaar dat er primitieve vormen van leven op Mars zouden kunnen bestaan. Ook op Aarde kan leven gedijen onder extreme omstandigheden, variërend van bacteriën en algen in de kokende poelen in het Yellowstone Park, tot de kolonies van bacteriën en schimmels die zijn aangetroffen in barsten en spleten in rotsblokken in de permanente, bittere koude van Antarctica. Experimenten hebben aangetoond dat sommige Aardse bacteriën de Martiaanse condities zouden kunnen overleven, en zich er zelfs vermenigvuldigen. De chemische samenstelling van de dampkring draagt echter niet de signatuur van biologische processen, iets wat men bij de aanwezigheid van zelfs een primitieve biosfeer zou verwachten. De Martiaanse dampkring is in perfect chemisch evenwicht, in tegenstelling tot de Aarde, waar de samenstelling ver afwijkt van de toestand van chemisch evenwicht door de continue



Afb. 1. De Magellan ruimtecapsule zond begin 1991 deze radaropname van Venus naar de Aarde. Duidelijk is een 30 km lange en tot 2 km brede lava-stroom te zien, die over het Venusiaanse oppervlak is uitgestroomd. De opname beslaat een gebied van 80 x 20 km. Het oplossend vermogen is 120 m. (NASA)



Afb. 2. Landschap op Mars, gezien vanuit het Viking-station (1975). Een droge, bitter koude woestijn, blootgesteld aan felle zandstormen en schadelijke ultraviolette straling.

interactie met de biosfeer. Bovendien hebben de Amerikaanse robot-laboratoria Viking-1 en Viking-2 die in 1976 op Mars zijn neergezet (op een afstand van 4000 km van elkaar) geen spoor van biologische activiteit in de bodem kunnen aantonen (afb. 2). Hoewel sommige planetologen de mogelijkheid nog willen open houden dat er onder het Martiaanse oppervlak primitieve vormen van anaeroob leven kunnen voorkomen, bijvoorbeeld op plaatsen waar vulkanische activiteit de bodem verwarmt, is de algemene conclusie na de Vikingexpedities toch dat er op Mars géén leven (meer) is — een bittere pil voor de velen die voor de Viking-expedities al hun hoop op deze planeet hadden gesteld als laatst overgebleven kandidaat voor buitenaards leven.

Martiaanse Mythen

De toenemende kennis van Mars had al in het begin van deze eeuw duidelijk gemaakt dat er geen sprake kan zijn van hoger ontwikkeld leven, maar hoogstens van een primitieve vegetatie. Deze conclusie maakte een einde aan de euforie die zich vooral in de tweede helft van de 19de eeuw van het grote publiek had meester gemaakt over de veronderstelde aanwezigheid van een geavanceerde beschaving op Mars. Ook in de wetenschappelijke wereld van die tijd werd dit niet onaannemelijk geacht. Als men een ontwikkeld mens in de Victoriaanse tijd vroeg of hij geloofde in het bestaan van Martianen, was de kans op een bevestigend antwoord dan ook groot.

Over de aard van het Martiaanse leven waren er allerlei speculaties, waarvan vele bizar, maar de algemene opvatting was dat er op Mars leven, misschien zelfs intelligent leven moest zijn. Na de stormachtige ontwikkelingen binnen de natuurwetenschappen in de voorafgaande decennia, leek het immers vanzelfsprekend dat, als de universeel geldende natuurwetten intelligent leven op Aarde hadden doen ontstaan, dat ook het geval moest zijn op andere planeten waar condities heersen die overeenkomen met die op Aarde. Deze opvatting werd gestimuleerd door de berichten over de waarnemingen in

Afb. 3. Dendritische dalpatronen op Mars getuigen ervan, dat in een ver verleden rivieren over het Martiaanse oppervlak stroomden. De opname beslaat een gebied van 200 x 140 km. (Mariner 9, 1971)



1877 en volgende jaren door de Italiaanse astronoom Giovanni Schiaparelli van de zogenaamde 'canali', kaarsrechte, donkere lijnen op het oppervlak van Mars. 'Canali', de Italiaanse aanduiding voor 'geulen', werd echter foutief vertaald als 'canals', waarmee voor het grote publiek de suggestie werd gewekt dat het om structuren ging die door een geavanceerde beschaving zouden zijn aangelegd. De Amerikaanse jurist en astronoom Percival Lowell interpreteerde de donkere lijnen als een reusachtig netwerk van irrigatiekanalen, dat water van de polen naar de droge woestijnen leidde. De vegetatie in de geïrrigeerde zones langs de kanalen zouden als donkere lijnen te zien zijn door telescopen op Aarde. Lowell's publikaties brachten grote opwinding teweeg en gaven aanleiding tot de wijd verbreide mythologie van intelligent Martiaans leven, onder andere resulterend in H.G. Wells' beroemde science fiction roman *War of the Worlds* (1898).

Het werd echter al snel duidelijk dat Schiaparelli's en Lowell's structuren grotendeels op optische illusies berusten, ingegeven door de menselijke neiging om ordening te willen zien in een wanordelijk beeld. Toen in onze tijd ruimtesondes het Martiaanse oppervlak gingen verkennen, bleek slechts één van de door hen gekarteerde 'canali' te berusten op een reëel landschapskenmerk: het 5000 km lange, 150 tot 700 km brede stelsel van breuken en tot 7 km diepe canyons dat het Martiaanse oppervlak langs de evenaar doorsnijdt. Dit geprononceerde verschijnsel heeft de naam *Valles Marineris* gekregen en is vergelijkbaar met het (veel kleinere)

Oostafrikaanse slenkstelsel — eveneens het produkt van de gecombineerde werking van breukbewegingen en erosie.

In den Beginne

Mars is echter niet altijd een onherbergzame wereld geweest. De geologische kenmerken van het Martiaanse oppervlak laten zien dat er in een ver verleden condities moeten hebben geheerst die lijken op die op Aarde. Een van de grootste sensaties van de beelden die de ruimtesonde Mariner-9 in 1971/72 doorseinde was, dat er in de oudste gebieden op Mars dalpatronen voorkomen die moeilijk anders kunnen worden geïnterpreteerd dan als afvoeren van water dat in de vorm van regen op het land is neergekomen (afb. 3). Kratertellingen (een ruwe methode van ouderdomsbepaling, de enige in de planetaire geologie zolang er géén gesteenten beschikbaar zijn voor isotopische datering) suggereren dat deze rivierdalen tot ongeveer 4 miljard jaar geleden zijn gevormd, in het begin van de Martiaanse geschiedenis. Toen droogden de rivieren op, maar in het prille begin viel er regen en stroomden er rivieren. In die beginperiode moet Mars dus een warmer klimaat hebben gehad en een dichtere dampkring — onder de huidige condities kan immers geen vloeibaar oppervlaktewater bestaan.

Tabel I. Gassen in de dampkringen van Venus, Aarde en Mars, thans en in de vroegste jeugd van de planeten (%)

	Venus		Aarde		Mars	
CO ₂	96.5	(96.5)	0.035	(98)	95.3	(98)
N ₂	3.5	(3.4)	78.1	(1.9)	2.7	(1.7)
O ₂	—	(--)	20.9	(--)	—	(--)

Op grond van allerlei geologische en geochemische overwegingen wordt, mede op basis van de chemische en isotopische eigenschappen van de huidige Martiaanse dampkring, geconcludeerd dat Mars in zijn vroegste geschiedenis een dampkring had met een druk van ongeveer 2 bar aan de basis. Uit de relatieve abundenties van edelgassen, CO₂ en N₂ kan worden afgeleid dat de samenstelling ongeveer dezelfde was als die op de jonge Aarde: in hoofdzaak CO₂, ondergeschikt N₂, maar géén O₂. De temperatuur aan het oppervlak moet in het gebied hebben gelegen waarin vloeibaar water kan bestaan. Er waren op Mars meren, wellicht zelfs oceanen. In den beginne heersten er dus condities vergelijkbaar met die op de jonge Aarde. Zie Tabel I.

Verlies van de dampkring

Mars heeft echter in zijn vroege jeugd het grootste deel van zijn dampkring verloren. Dit verlies blijkt onder andere uit de sterke verrijking van het stikstof in de huidige atmosfeer aan het zware isotoop stikstof-15, die door de Viking robot-laboratoria is gemeten (¹⁵N/¹⁴N = 5,94.10⁻³, tegen 3,66.10⁻³ op Aarde en in meteorieten, een verrijking van 62%). Deze verrijking wordt toegeschreven aan de grootschalige ontsnapping van atmosferisch stikstof naar de ruimte, waarbij preferentieel het lichtere isotoop stikstof-14 verdween.

Dat dit verlies vroeg in de Martiaanse geschiedenis moet hebben plaatsgevonden, blijkt onder andere uit de sterke verrijking van het argon in de huidige Martiaanse dampkring aan het isotoop argon-40 (een van de drie isotopen van natuurlijk argon; de andere zijn de isotopen 38 en 36). De abundantie van dit isotoop neemt in de dampkring van Venus, Aarde en Mars geleidelijk toe door de

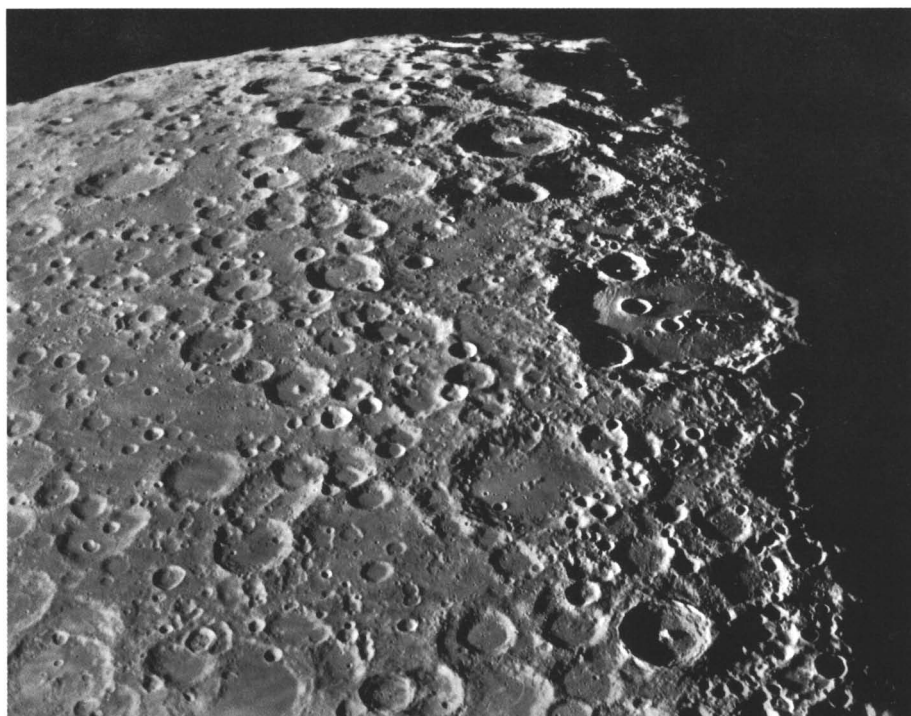
continue toevoeging als gevolg van het radioactieve verval van kalium-40 in de planetaire gesteentemassa, waarbij argon-40 een van de vervalprodukten is. De abundenties van de beide andere argonisotopen blijven daarentegen in principe constant, zolang er geen verlies naar de ruimte optreedt. Met het verstrijken van de tijd verandert dus de isotopische samenstelling van het atmosferisch argon, doordat het aandeel van argon-40 geleidelijk hoger wordt. Op Mars is de verrijking echter zo'n 10 maal hoger dan op Aarde (⁴⁰Ar/³⁶Ar = 2.750, tegen 295 op Aarde). Dat impliceert dat vroeg in de Martiaanse geschiedenis, toen er nog weinig argon-40 was, een groot deel van het initieel in de dampkring aanwezige argon moet zijn ontsnapt. Daarna resulteerde de continue toevoeging van argon-40 dus in een veel steilere toename van het aandeel van dit isotoop in het atmosferisch argon.

IJstijd

Het ligt voor de hand om het verlies van het grootste deel van de initiële Martiaanse dampkring te correleren met het opdrogen van de rivieren ongeveer 4 miljard jaar geleden. De verdwijning van vloeibaar water was echter niet alleen het gevolg van de ijerl wordende dampkring, maar ook van een mondiale afkoeling tot beneden het vriespunt. Dat kan worden toegeschreven aan de daling van de atmosferische CO₂-druk — dit gas bepaalt immers, via het 'broeikas-effect', in belangrijke mate het planetaire klimaat. In het begin van de Martiaanse geschiedenis was er kennelijk zo veel CO₂, dat de temperatuur boven het vriespunt van water bleef, hoewel de planeet zich verder van de Zon bevindt dan de Aarde en de Zon toen zo'n 30% kouder was dan nu. De planeet zag echter géén kans om zijn CO₂-druk op peil te houden. Ten dele kan dat worden toegeschreven aan de relatief snelle afkoeling van de Martiaanse gesteentebol: de massa bedraagt slechts 11% van die van de Aarde, zodat de inwendige warmte veel sneller kon worden afgevoerd. Daardoor nam de intensiteit van de vulkanische activiteit veel sneller af dan die op Aarde (hoewel er waarschijnlijk tot op heden nog enige vulkanische activiteit op Mars is), en daarmee ook de toevoer van CO₂ — de belangrijkste bron van CO₂ in een planetaire dampkring is immers de ontgassing van de planetaire massa door vulkanische activiteiten. Er kan zo een toestand zijn ontstaan waarbij de toevoer van CO₂ achterbleef bij de verwijdering door chemische verweringsprocessen aan het Martiaanse oppervlak en de precipitatie van carbonaten in het oppervlaktewater.

Milieucatastrofe

Daarnaast moet CO₂ echter ook tegelijk met de andere atmosferische gassen naar de ruimte zijn ontsnapt. Er zijn aanwijzingen dat dit verlies het gevolg is van inslagen op Mars van reusachtige planetoïden en/of kometen. Dergelijke inslagen kunnen een groot deel van de atmosferische gassen in de ruimte hebben geslingerd, een proces dat *atmosferische erosie* wordt genoemd. Sinds het baanbrekende werk van de Berkeley-onderzoekers Luis en Walter Alvarez (vader en zoon, respectievelijk fysicus/ Nobelprijs-winnaar en geoloog) aan de overgang Krijt/Tertiair (de K/T grens, 65 miljoen jaar oud), onderken-



Afb. 4. Het pokdalige oppervlak van de Maan getuigt van talloze inslagen. De meeste kraters zijn omstreeks 4 miljard jaar geleden ontstaan, tijdens het 'Grote Kosmische Bombardement', dat ook de Aarde en de andere planeten heeft geteisterd.

nen geologen dat inslagen van enorme extraterrestrische lichamen ook op Aarde een belangrijke geologische rol hebben gespeeld. Een aantal malen in de aardgeschiedenis hebben zij mondiale milieucatastrofes tweegebracht, onder andere gepaard gaande met massaal uitsterven in de biosfeer. Maar hoewel de enorme inslagen catastrofale gevolgen hadden voor het Aardse milieu en de biosfeer, leidden zij hier niet tot significante atmosferische erosie. Door de geringere planeetaire massa was dit op Mars wel het geval: de ontsnappingssnelheid (de snelheid die een deeltje moet hebben om aan de aantrekkingskracht van een planeet te ontsnappen) bedraagt slechts 5,0 km/sec, tegen 11,2 km/sec op Aarde en 10,3 km/sec op Venus.

Sinds de Apollo- en Luna-expedities in de jaren '60 en '70 en de isotopische datering van gesteentemonsters die toen naar de Aarde zijn gebracht, weten we dat het maanoppervlak in het tijdsinterval van 4,1 tot 3,9 miljard jaar geleden onderworpen werd aan een zwaar 'bombardement' van interplanetair gruis. Daarbij waren er zo'n 30-tal gigantische inslagen die de maria deden ontstaan: min of meer cirkelvormige depressies met diameters tot meer dan 1000 km (afb. 4). Op Mars zijn er soortgelijke depressies, met als grootste de *Hellas*-, *Isidis*- en *Argyre*-bekkens (diameters respectievelijk 1800 km, 1200 km en 700 km). Extrapolatie van de stratigrafie van de Maan naar Mars en overwegingen van planetair-geologische aard maken het waarschijnlijk, dat deze bekkens van dezelfde ouderdom zijn als de maria op de Maan, en dat de inslagen plaatsvonden in dezelfde tijd als de uitdroging van de Martiaanse rivieren. Dit suggereert een scenario waarin een Martiaanse wereld, die veel gemeen had met de jonge Aarde, omstreeks 4 miljard jaar geleden ten onder ging in een milieucatastrofe tengevolge van zeer zware inslagen. De Aarde is bij soortgelijke inslagen aan dat lot ontsnapt dank zij de hogere ontsnappingssnelheid, waardoor haar dampkring veel minder kwetsbaar is.

Martiaans Leven?

De oudste bewaard gebleven sedimentaire gesteenten op Aarde zijn gevonden in het gebied van de Godthåbsfjord in West-Groenland (de *Isua supracrustal belt*). Zij zijn 3,75 miljard jaar geleden afgezet. De isotopische samenstelling van het koolstof in deze gesteenten toont aan dat er toen al overvloedig marien leven was, maar tot dusverre zijn van die levensvormen géén onbetwiste fossielen herkend. De oudste duidelijke fossielen zijn zo'n 200 miljoen jaar jonger en dateren van 3,5 miljard jaar geleden. Het zijn *stromatolieten*, de fijn-gelamineerde bouwsels van gecompliceerde kolonies van bacteriën en blauwgroene algen, primitieve prokaryotische organismen (gekenmerkt door cellen zonder kern en met DNA dat niet in chromosomen is gerangschikt) die ook nu nog leven in sommige kustzones waar bijna geen andere levensvorm het uithoudt (afb. 5).

Aan de verschijning van deze levensvormen, hoewel primitief, moet een lange ontwikkeling vooraf zijn gegaan. Er zijn geen directe gegevens over de lengte van de tijd die daarmee gemoeid was: het sedimentaire geologische 'archief' gaat immers niet verder terug dan 3,75 miljard jaar. Er zijn echter wel indirecte aanwijzingen die enig licht werpen op de condities die op de prille Aarde heersten. In de vroeg-Archaïsche sedimenten van het Pilbara Block in West-Australië zijn detritische zirkonen gevonden met een ouderdom van 4,3 miljard jaar, het oudste tot dusverre



Afb. 5. Stromatoliet in het Pilbara Schild van West-Australië. De formatie is 3,5 miljard jaar oud en de hierin voorkomende stromatolieten representeren de oudste onbetwiste fossielen op Aarde.

bekende aardse materiaal (meteorieten zijn uiteraard nog ouder). Die oude zirkonen moeten afkomstig zijn van (nog niet gevonden, of verdwenen) continentale korstgesteenten. Dat wijst erop dat er ten tijde van de kristallisatie van die zirkonen al continentale korst was. In het licht van de huidige inzichten omtrent de genese van continentale korst, impliceert dat het bestaan van oceanen 4,3 miljard jaar geleden. Toen moeten er op Aarde dus al de temperatuurcondities hebben geheerst waarbij vloeibaar water kan bestaan — dezelfde condities die ook leven mogelijk maken. De geboorte van onze planeet, tegelijk met die van het gehele Zonnestelsel, is gedateerd op 4,57 miljard jaar, zodat het dus waarschijnlijk lijkt dat de biosfeer niet veel jonger is dan de Aarde zelf.

Alles wijst erop dat de condities op Mars tot zo'n 4 miljard jaar geleden ruwweg overeenkwamen met die op Aarde. Toen was Mars een 'oase in de ruimte', zoals onze planeet nog steeds is. Heeft het verschijnsel Leven in die tijd vaste voet op Mars gekregen, zoals dat terzelfder tijd ook op Aarde is geschied? Is de ontwikkeling van de Martiaanse biosfeer voortijdig afgebroken door een mondiale milieucatastrofe tengevolge van zware inslagen van interplanetair

gruis? Dit zijn vragen die belangrijke implicaties hebben voor de fundamentele vraag of het leven op onze planeet een uniek verschijnsel is, of dat leven overal in het heelal ontstaat en evolueert waar de condities gunstig zijn.

De processen die hebben geleid tot het ontstaan van het verschijnsel Leven, de *biogenese*, zijn nog grotendeels onbegrepen. De algemene opvatting is echter, dat leven pas kan ontstaan wanneer complexe organische moleculen van niet-biologische oorsprong al in overvloed voorhanden zijn. In de laatste decennia hebben radio-astronomische waarnemingen, spectroscopisch onderzoek en directe analyses aangetoond dat complexe koolstofverbindingen wijd verbreid zijn in het heelal — in interstellaire wolken, op sommige planeten en manen, in komeetkernen, planetoiden en meteorieten. Zelfs een scala aan aminozuren, de bouwstenen van het aardse leven, is in meteorieten aangetroffen. Dus waarom zouden biogenese en de evolutie van organismen ook niet elders in het heelal zijn opgetreden? Er zijn immers vele miljarden sterren als onze Zon (alleen in het Melkwegstelsel wordt hun aantal al op zo'n 40 miljard geschat) waaronder, naar men aanneemt, talloze, zo niet alle met een gevolg van planeten. Het lijkt onaannemelijk dat er hieronder niet vele zouden zijn waar condities heersen die vergelijkbaar zijn met die op Aarde en de jonge planeet Mars.

Zijn het ontstaan van een biosfeer en biologische evolutie normale fenomenen, inherent aan planeten van het Aardse type (waar 'Aardse' condities heersen), evenals de geboorte en evolutie van sterren inherent zijn aan de kosmos? Als (isotopische) sporen van een vroeg-Martiaanse biosfeer, hoe primitief dan ook en voortijdig afgebroken, zouden aantonen dat er ook buiten de planeet Aarde biogenese is opgetreden, lijkt een positief antwoord op deze vraag aan waarschijnlijkheid te winnen. Zelfs speculaties over mogelijk intelligent leven elders in het heelal krijgen dan meer grond onder de voeten — speculaties die nu al zo serieus worden genomen dat zij in 1991 hebben geleid tot het initiëren van het SETI- (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) project. Bij dit project dat, in het kader van het Exobiology Program van NASA, dit jaar van start gaat, worden radioteleskopen verspreid over de Aarde ingeschakeld.

Of er inderdaad een beginnende biosfeer op Mars is geweest, zullen uiteindelijk alleen geologisch onderzoek ter plaatse, de gerichte, selectieve bemonstering van oude sedimentgesteenten, en analyse van de verzamelde gesteentemonsters in laboratoria op Aarde kunnen uitmaken. Het is niet goed denkbaar dat dit te verwezenlijken is in het kader van de voor de komende jaren geplande onbemande 'sample return missions' en robot-observaties op het Mars-oppervlak, anders dan als een toevalstreffer. De menselijke beoordelingsfactor, gestoeld op geologische kennis, inzicht en ervaring, lijkt een essentiële voorwaarde te zijn om tot conclusieve resultaten te kunnen komen.

Met spanning wordt dan ook uitgezien naar de resultaten van het geologisch onderzoek van de oudste Martiaanse sedimenten, dat een belangrijke doelstelling is van de bemande expeditie naar de rode planeet, die voor het begin van de volgende eeuw op stapel staat.

Met deze expeditie, die wellicht in internationale samenwerking zal worden gerealiseerd, zijn vele tientallen miljarden dollars en een gigantische technologische inspanning gemoeid. Die zijn het doel echter alleszins waard, gezien de enorme revenuen die zij voor de collectieve menselijke kennis zullen opleveren. Vele openstaande vragen betreffende de vroegste ontwikkelingsgeschiedenis van onze eigen planeet zullen op Mars kunnen worden beantwoord. Op de rode planeet ligt wellicht ook de sleutel tot een beter begrip van het hoe en waarom van het verschijnsel Leven, inclusief van onze eigen soort. Als op Mars sporen van vroeger leven kunnen worden aangetoond, ook al is dat miljarden jaren geleden in een pril stadium van de evolutie van de Martiaanse biosfeer uitgestorven, dan is onomstotelijk vastgesteld dat leven géén uniek verschijnsel van onze planeet is. Dit wordt de laatste jaren op allerlei gronden steeds waarschijnlijker geacht, maar het definitieve bewijs zou een impact hebben op ons wereldbeeld van dezelfde orde als het

aantonen van de heliocentriciteit in de 16de eeuw en de publikatie van Charles Darwins evolutieleer in 1859. De kerkelijke inquisiteurs wisten in 1600 zeer goed wat zij deden, toen zij Giordano Bruno naar de brandstapel stuurden!

Literatuur

- Burgess, E. (1990) Return to the red planet. Columbia University Press, New York, 222 pp.
- Morrison, D. and Owen, T. (1988) The planetary system. Addison-Wesley Publ., Reading (Mass.), 519 pp.
- Priem, H.N.A. (1987) Isotopic tales of ancient continents. *Geologie & Mijnbouw* 66, 275-292.
- Priem, H.N.A. (1988) Continent genesis - a story of oceans, life and isotopes. *Memoria e Noticias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra* 105, 37-73.
- Priem, H.N.A. (1989) Het aardse perspectief. In: *Denken over het ontstaan van Aarde, Leven en de Mens*, Studium Generale, reeks 8803, Rijksuniversiteit Utrecht, 13-44.
- Priem, H.N.A. (1989) Het Geosfeer-Biosfeer Systeem - wordt de Aarde door het Leven bepaald? *Gea* 22, nr. 3, 65-69.
- Priem, H.N.A. (1990) Strange relatives - Earth and her sibling neighbours. *Geologie & Mijnbouw* 69, 391-406.
- Priem, H.N.A. en Vlaar, N.J. (1991) Aardse Planeten - *Geologie in het Zonnestelsel. Natuur & Techniek* 59, nr.10, 768-779.
- Schilling, G. (1990) Werelden naast de Aarde - de planeten: ontstaan, evolutie, onderzoek. *Wereldbibliotheek*, Amsterdam, 191 pp.
- Smith, A.E. (1989) Mars, the next step. Adam Hilger, Bristol & New York, 151 pp.

Deze bijdrage is in verkorte vorm verschenen in de bijlage Wetenschap & Onderwijs van NRC-Handelsblad, 26 september 1991.

De continentale diepteboring in Duitsland: een speldeprik in de aardkorst?

door J.H.A. te Boekhorst

Vorig jaar waren wij, mijn echtgenote en ik, op vakantie in de Oberpfalz, in de nabijheid van de Duits-Tsjechische grens. Niet om specifiek geologische redenen, alhoewel uiteraard bezoeken aan enige vindplaatsen op het programma stonden. In een bij het plaatselijke VVV-kantoor veroverde folder werd iets vermeld over het KTB-project, dat in de Oberpfalz wordt uitgevoerd. KTB staat voor "Continental Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland". Over dit project had ik inderdaad gelezen, ook dat dit werd uitgevoerd in het Duits-Tsjechische grensgebied. De exacte lokatie van deze boring bleek op nog geen 15 km van ons vakantieovertrek te liggen, er was dus geen enkele belemmering om er eens langs te gaan.

Wat is nu dat KTB-project?

Al lange tijd heeft de internationale geologische wereld belangstelling voor het onderzoek van de diepe aardkorst. In de laatste twee decennia werd met name de aardkorst onder de oceanen intensief onderzocht. De

oceanbodem is echter slechts maximaal 200 miljoen jaar oud, terwijl de delen van de aardkorst die onder de continenten liggen aanzienlijk ouder zijn, zelfs wel tot 4 miljard jaar toe. Hun opbouw is bovendien veel ingewikkelder. Daarom heeft de internationale geo-wetenschappelijke wereld het onderzoek van de continentale aardkorst voor de komende tijd in het middelpunt van de belangstelling geplaatst.

Sinds een aantal jaren vinden daarom over de gehele wereld internationale en nationale onderzoeken plaats om de kennis over de opbouw en het ontstaan van de continentale aardkorst te verdiepen. Het grootste deel van deze onderzoeken betrof seismologisch onderzoek. Onderzoek dus om met behulp van bestudering van trillingen in de aardkorst conclusies te trekken over de opbouw en het ontstaan van de lithosfeer. Een voorbeeld van een dergelijk onderzoek wordt beschreven in het artikel van G. Nolet in *Gea*, vol. 19 nr. 2 (juni 1986). Om de gegevens die dit soort projecten opleveren te kunnen interpreteren, is echter nader onderzoek van de aardkorst noodzakelijk. Voor dit nadere onderzoek van