

Aarde en haar burenen: variaties op één thema*)

door Harry N.A. Priem

Emeritus-hoogleraar isotopen-geologie en planetaire geologie Universiteit Utrecht en curator Artis Geologisch Museum

De mens en alle andere levensvormen zijn niet louter de koloniatoren van onze planeet, die hier kunnen bestaan omdat er 'toevallig' condities heersen die voor levensfuncties vereist zijn: beschikbaarheid van water en voedingsstoffen, en temperaturen aan het oppervlak waarbij water vloeibaar is. Dit beeld van 'ruimteschip Aarde' in een levensvijandige omgeving was tot voor kort algemeen en is ook nu nog wel gangbaar, maar is onvolledig. Het verschijnsel Leven maakt deel uit van een complex dynamisch systeem dat de gehele planeet omvat, het 'Systeem Aarde'. Dit is één van een aantal onderscheiden planetaire systemen die om de zon bewegen. Zij hebben alle dezelfde oorsprong en zijn gelijktijdig ontstaan, maar elk is op een andere wijze geëvolueerd. Tezamen met de Zon vormen zij ons zonnestelsel, gesitueerd in de buitenzone van het Melkwegstelsel. In het heelal, waarvan de ouderdom wordt geschat op 13,7 miljard jaar, zijn honderden miljoenen melkwegstelsels, elk met tientallen miljarden sterren van uiteenlopende ouderdom. Hun aantal wordt alleen in ons Melkwegstelsel al op zo'n 40 miljard geschat. Vele komen in grootte en temperatuur overeen met onze zon. Het gangbare scenario is dat ons zonnestelsel 4,57 miljard jaar

stof, helium en door de exploderende ster uitgestoten zwaardere elementen. Door zwaartekrachtwerking trok 99,9 % van de in de wolk aanwezige materie samen tot een compacte massa in het centrum, met daaromheen een platte, roterende schijf van gas, stof en gruis, de 'zonnenevel'. Bij de compactie werd potentiële energie omgezet in warmte, waardoor de temperatuur in het centrum opliep tot ongeveer 10 miljoen graden Celsius. Bij die temperatuur komen kernfusieprocessen op gang en was er een nieuwe ster geboren, de Zon. De roterende schijf, 0,1 % van de totale massa van de zonnenevel, klonterde samen (accretiseerde) tot steeds grotere aggregaten: planetesimalen, planetoiden en planeten. Dergelijke processen zijn waarschijnlijk niet zeldzaam in het heelal. Men neemt dan ook aan dat er talloze zonnestelsels van uiteenlopende ouderdom zijn.

Het Begin

Uit de zwaardere bestanddelen van de zonnenevel accretiseerden gesteentemassa's met als hoofdbestanddelen magnesium, ijzer, silicium en zuurstof – elementen die in het heelal zeldzaam zijn, maar in een smalle zone direct rond de zon het grootste deel van de materie uitmaken (de binnenplaneten Mercurius, Venus, Aarde met de maan, en Mars). In deze zone verdreef de zonnewind de gasvormige bestanddelen. Achter de huidige planeetengordel, tussen Mars en Jupiter, was de afstand tot de zon zo groot dat de gassen niet door de zonnewind werden verdreven. Daar vormden zich de reuzenplaneten, grotendeels bestaande uit waterstof en helium met slechts een kleine gesteentekern. De warmte die werd gegenereerd door de accretie en door het verval van radioactieve elementen (die toen in veel grotere hoeveelheden aanwezig waren dan thans), bracht grote delen van de planetaire gesteentemassa's in gesmolten toestand. In de gesteentesmelt zakten de zwaarste elementen naar de kern, waardoor differentiatie optrad in een metallische kern (voornamelijk ijzer en enkele procenten nikkel) omhuld door een mantel van ijzer-magnesiumsilikaten (*peridotiet*).

Gesteenten die dateren uit het accretiestadium van het zonnestelsel kennen we op Aarde uitsluitend als *meteorieten*. Afb. 1. Sommige zijn fragmenten van planetaire massa's die al de differentiatie in metallische kern en silikaatmantel hadden ondergaan (ijzermeteorieten, steenmeteorieten en steen-ijzermeteorieten), maar zowel de ongedifferentieerde als de gedifferentieerde

meteorieten hebben binnen de foutenmarge dezelfde ouderdom van 4,57 miljard jaar. Zie het kader. Beide bevatten soms een overmaat van isotopen die het vervalsproduct zijn van radioactieve isotopen met zeer korte halveringstijd. Die 'kortlevende' radioactieve isotopen zijn uitgestoten door de exploderende ster die de geboorte van ons zonnestelsel initieerde, maar door hun korte halveringstijd zijn zij snel uitgestorven. Zo bevatten meteo-



Afb. 1. Enkele meteorieten (met vindplaats en jaar van aankomst). Van links boven naar rechts onder: koolstofrijke meteoriet (Chihuahua, Mexico, 1969); ijzermeteoriet (Coconino, Arizona, ca 25.000 jaar geleden); steen-ijzermeteoriet (Ilmilac, Chili, 1822); chondriet, een ongedifferentieerde meteoriet (Meru, Kenya, 1945).

geleden is geconcipieerd in het geweld van de explosie van een oude 'opgebrande' ster veel groter dan onze zon, die aan het einde van zijn bestaan was gekomen. Dergelijke explosies (supernovae) worden ook nu nog af en toe aan de sterrenhemel waargenomen. Het geboortescenario, zeer kort samengevat, is dat de schokgolf van de explosie de samentrekking initieerde van een nabijgelegen ijle interstellare wolk bestaande uit water-

*) Dit is een bewerkte versie van de voordracht op 15 november 2003 in de grote collegezaal van Artis



Afb. 2. Astronaut en geoloog Harrison H. Schmitt bemonstert een brok anorthosit (gedateerd op 4,44 miljard jaar) aan de rand van Mare Serenitas, een grote (doorsnede 680 km) inslagkrater op de maan die tijdens het Kosmisch Bombardement (tussen 4,1 en 3,9 miljard jaar geleden) is gevormd. De bodem van de krater is overdekt met een kilometersdik pakket van basaltische lava's, waarvan meegenomen monsters zijn gedateerd op 3,82 miljard jaar. (NASA Apollo 17, 1972).

rieten soms een overmaat van het magnesiumisotoop ^{26}Mg , afkomstig van het radioactieve aluminiumisotoop ^{26}Al met een halveringstijd van 760.000 jaar. Het radioactieve ^{26}Al was dus nog aanwezig toen in het moederlichaam van de gedifferentieerde meteorieten de separatie in metallische kern en silikaatmantel zich al had voltrokken. Een radioactief isotoop is na maximaal 10 halveringstijden uitgestorven, zodat er vanaf de explosie van de ster, tot en met de differentiatie van de planetaire lichamen in metallische kern en silikaatmantel, slechts zo'n 5 à 6 miljoen jaar kan zijn verlopen – een minuscule tijdspanne tegen de ouderdom van heelal en zonnestelsel. De geboorte van het zonnestelsel was dus, kosmisch en geologisch bezien, een extreem snel proces.

Geologisch onderzoek op Aarde, de maan en Mars, observaties van hemellichamen vanuit ruimtesondes, en computermodelleren hebben inzicht verschaft in de vroegste ontwikkeling van de binnenplaneten en de maan. Aanvankelijk was de silikaatmantel grotendeels gesmolten, de magma-oceaan. Daarin kwamen de lichtere silikaten bovendrijven, waar zij een relatief dunne korst vormden: op Mars, Aarde, Venus en vermoedelijk ook Mercurius bestaande uit *basalt*, op de maan uit *anorthosit*. Afb. 2. Op de maan overdeken jongere basaltische lavastromen grote delen van het oppervlak, maar de oorspronkelijke anorthositische korst (gedateerd op 4,44 miljard jaar) komt in de Hooglanden aan de oppervlakte. Op Venus, Aarde en Mars is de primaire basaltische korst in de loop van de tijd als gevolg van geologische processen vervangen door jongere korst van uiteenlopende ouderdom, op Venus en Mars bestaande uit basalt, op Aarde uit basalt onder de oceanen en uit een grote verscheidenheid van gesteenten met de gemiddelde samenstelling van *dioriet* in de continenten. Op Mars moeten echter ook nog resten van de oorspronkelijke korst aanwezig zijn, getuige het 4,5 miljard jaar oude brok basalt dat door een inslag is losgeslagen en na een verblijf van 30 miljoen jaar in de ruimte 13.000 jaar geleden als meteoriet in Antarctica is neergekomen.

Energie

Na hun vorming zijn alle grotere planetaire gesteentemassa's (planeten, planetoïden en manen) voor korte of langere tijd geo-

logisch actief, tot uiting komend in vulkanisme en/of tektonische processen. De daarvoor vereiste energie is afkomstig uit twee interne bronnen: de radiogene warmte als gevolg van het verval van de in de gesteenten aanwezige radioactieve elementen, en de getijdewarmte als gevolg van fricties in de gesteentemassa door de aantrekking van de zon en nabije planeten en/of manen. De radiogene warmte is vrijwel geheel afkomstig van de radioactieve isotopen van uranium (^{238}U en ^{235}U), thorium (^{232}Th) en kalium (^{40}K), alle met halveringstijden van honderden miljoenen tot miljarden jaren. Dit is de belangrijkste interne energiebron in de binnenplaneten en de maan, maar met het verstrijken van de geologische tijd neemt de warmteproductie door deze elementen en dus ook de geologische activiteit geleidelijk af. Hoe lang de geologische activiteit in stand wordt gehouden, wordt bepaald door de balans tussen enerzijds de interne warmteproductie, en anderzijds de afvoer van warmte naar de ruimte via geleiding en vulkanische processen, en energieverbruik door een scala van geologische processen in mantel en korst: smelten en omvorming van gesteenten (*metamorfose*), en allerlei deformaties en bewegingen (*tektoniek*).

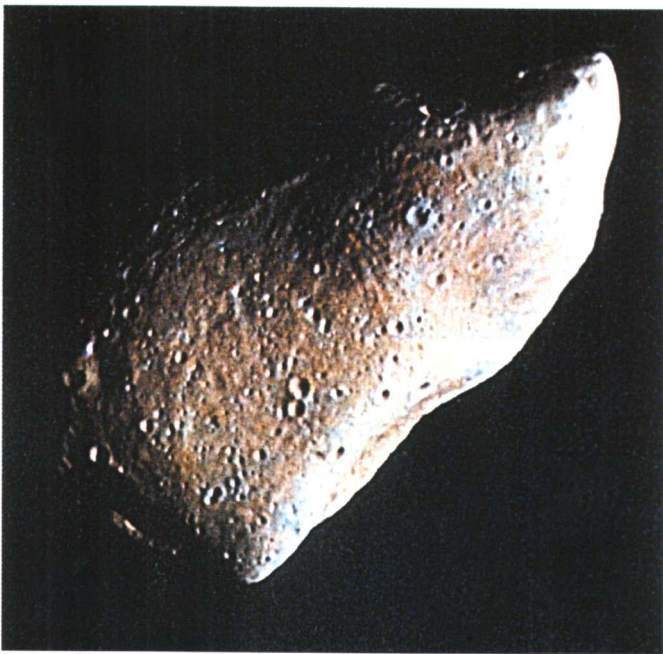
Als de radiogene warmteproductie zover is afgenomen dat de warmte geheel via geleiding kan worden afgestaan, treedt de 'geologische dood' in. Dit zal des te eerder het geval zijn, naarmate de planetaire massa kleiner is – kleinere lichamen hebben in verhouding tot hun volume een groter oppervlak dan grotere, zodat ze hun inwendige warmte sneller afstaan. Zo zijn Aarde en Venus (81,6 % van de aardmassa) nog volop geologisch actief, terwijl Mercurius en de maan (respectievelijk 5,5 en 1,2 % van de aardmassa) al lang geologisch dood zijn, behoudens enige zwakke tektonische activiteit door de getijdekrachten van Zon en Aarde. Mars (10,7 % van de aardmassa) is een grensgeval: tot enkele honderden miljoenen jaren geleden was er nog vulkanische activiteit, en misschien is er nóg wel enig zwak vulkanisme (hoewel tot dusverre nooit waargenomen).

Deze simpele relatie tussen grootte en geologische activiteit gaat alleen op wanneer radiogene warmteproductie de belangrijkste interne energiebron is. Voor de hemellichamen in de zone van de binnenplaneten is dat het geval, maar in bijvoorbeeld de kleine Jupiter-maan Io (1,5 % van de aardmassa) is de belangrijkste bron de door de aantrekking van de reusachtige massa van Jupiter (3180 maal de aardmassa) opgewekte getijdewarmte. Io heeft dan ook nog steeds een zeer actief vulkanisme, in tegenstelling tot onze maan, waar incidentele zwakke maanbevingen het enig waarneembare effect zijn van de door Aarde en Zon uitgeoefende getijdekrachten.

In de zone van de binnenplaneten is de ingevangen stralingsenergie van de zon vele malen groter dan de interne warmteproductie – het 'Systeem Aarde', bijvoorbeeld, ontvangt 3000 maal zo veel energie van de zon dan van de eigen warmteproductie. Deze externe energie bepaalt de fysische condities aan het planetaire oppervlak: de temperatuur en, als er een dampkring is, de geologische werking van water en/of wind. Daarnaast speelt de zon ook een geologische rol door middel van zonnewind en ultraviolette straling. Aan het oppervlak van de dampkringloze Mercurius en de maan zijn dat zelfs de enige actieve geologische agentia.

Kosmisch biljart

Een ander extern geologisch agens is de continue regen van interplanetaire stof- en gruisdeeltjes en incidenteel de inslagen van grotere objecten. Bij afwezigheid van een dampkring treffen zij het oppervlak met een snelheid van 20 tot 60 km per seconde. Mercurius, de maan en andere manen en interplanetaire objecten zonder dampkring (planetoïden, planetesimals) danken hieraan hun pokdalige uiterlijk (afb. 3), maar op planeten met een substantiële dampkring vervagen de inslagsporen snel als gevolg van de werking van water en wind. Op Aarde, Venus en in mindere mate Mars remt de dampkring de inkomende stof- en gruisdeeltjes af, waarbij de kleinste deeltjes door de wrijvingswarmte in de dampkring verbranden ('vallende sterren'). Grotere brokken bereiken het oppervlak als meteorieten, maar



Afb. 3. Planetoïde Gaspra (200x13 km), gezien op een afstand van 5.300 km vanaf de ruimtesonde Galileo op weg naar Jupiter. Het pokdalige oppervlak getuigt van de inslagen van 'interplanetair gruis'. (NASA, 1991).

alleen extreem grote worden niet of nauwelijks afgeremd en treffen het oppervlak met hoge snelheid. Daarbij wordt al hun kinetische energie plotseling omgezet in thermische energie, waardoor het inslaande lichaam explodeert onder vorming van een cirkelvormige inslagkrater. Afb. 4 en 5. Op Aarde bevindt de bekendste inslagkrater, met een diameter van ruim 200 km, zich in de ondergrond van het Mexicaanse schiereiland Yucatan. Deze inslag vond 65 miljoen jaar geleden plaats en veroorzaakte een wereldwijde milieucatastrofe, met als gevolg abrupte veranderingen in de biosfeer. Op de maan en Mars zijn echter veel grotere inslagkraters herkend.

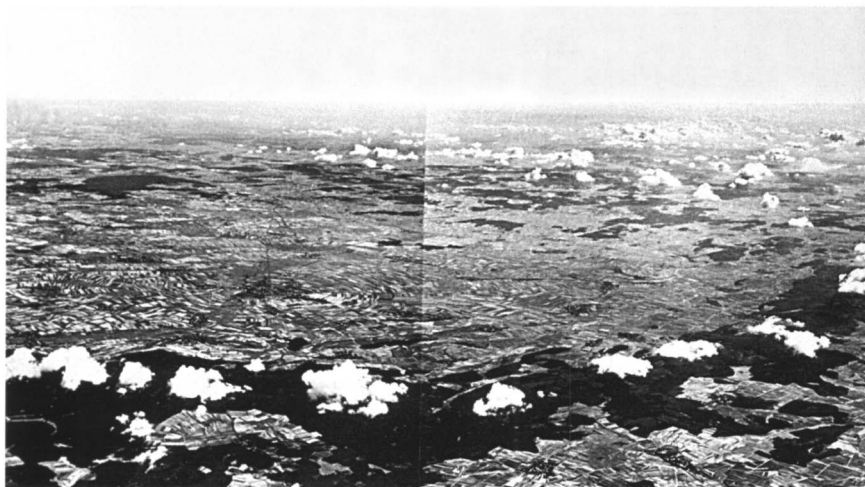
In het turbulente beginstadium van ons zonnestelsel is volgens de huidige inzichten de Aarde kort na de separatie in silikaatmantel en metallische kern in botsing gekomen met één of meer gedifferentieerde planetaire lichamen, die daarbij uiteenspatten. De fragmenten en het bij de botsing in de ruimte geslingerde materiaal van de aardmantel vormden een om de Aarde draaiende schijf van stof, gruis en puin, dat accretiseerde tot de maan. Deze botsing-hypothese verklaart zowel de fysische eigenschappen van het Aarde-Maan-systeem, als de ver-

schillen en overeenkomsten in de chemische samenstelling. Zo hebben alle maangesteenten hun equivalenten op Aarde, maar anders dan aardse gesteenten zijn zij extreem droog: waterhoudende mineralen zijn opvallend afwezig, als gevolg van de warmteontwikkeling bij de botsing. Ook is het gemiddelde soortelijk gewicht van de maan (3,3) nauwelijks méér dan dat van de maankorst en de aardse silikaatmantel, wat géén ruimte laat voor een substantiële metallische kern.

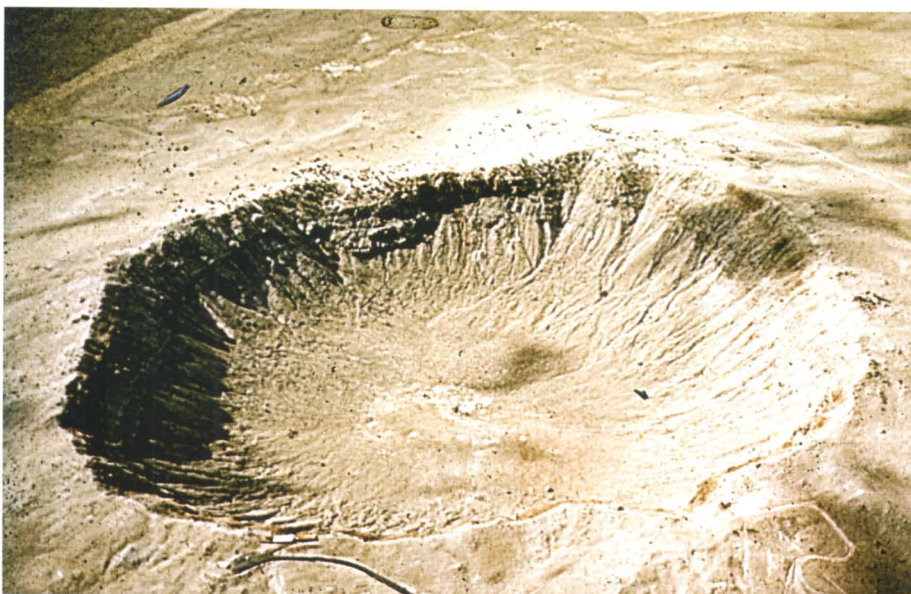
Geologisch onderzoek van de maan heeft aangetoond dat het oppervlak tussen 4,1 en 3,9 miljard jaar geleden een hevig bombardement uit de ruimte heeft ondergaan. Hierbij zijn talloze inslagkraters gevormd, waaronder enkele zeer grote. Alle binnenplaneten zijn door dit 'Kosmisch Bombardement' geteisterd, zoals bijvoorbeeld in de oudste gebieden van Mars nog te zien is. Op Aarde zijn echter alle sporen uitgewist door jongere geologische activiteiten – er zijn hier géén oudere oppervlaktegesteenten bewaard gebleven dan sedimenten en lava's die 3,75 miljard jaar geleden zijn afgezet.

Drie Zusters

Tussen de drie zusterplaneten Venus, Aarde en Mars zijn thans grote verschillen. Toch zijn die verschillen geologisch gezien minder wezenlijk dan op het eerste gezicht lijkt. Met dezelfde chemische samenstelling en vanuit dezelfde begintoestand ontwikkelden de drie planeten zich elk op eigen wijze, bepaald door verschillen in grootte (met gevolgen voor het planetaire warmtebudget, de zwaartekracht en de interne fysische toestand) en afstand tot de zon.



Afb. 5. Ries-depressie in Zuid Duitsland, met een doorsnede van 24 km. Deze depressie, waarin het middeleeuwse stadje Nördlingen ligt, is een inslagkrater die 14,8 miljoen jaar geleden is gevormd door de inslag van een meteoriet met een massa van omstreeks 3 miljard ton. De wolkjes hangen boven de ringwal die bij de explosie is opgeworpen en markeren de omtrek van de krater.

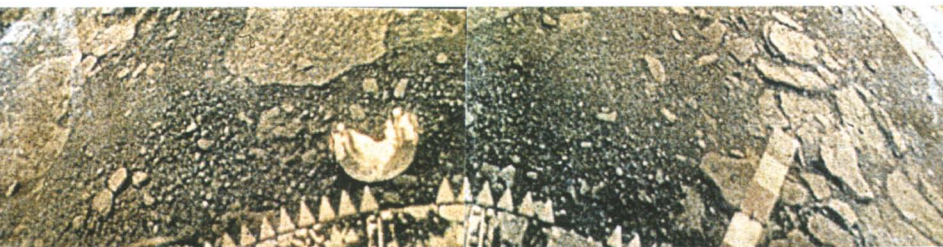


Afb. 4. Meteor Crater in Arizona. De krater, met een doorsnede van 1.200 meter, is omstreeks 25.000 jaar geleden gevormd door de inslag van een ijzermeteoriet met een massa van ongeveer één miljoen ton.

De binnenplaneten en de maan begonnen hun bestaan als een vulkanisch zeer actieve gesteentebol. Daarbij werden grote hoeveelheden vluchtige bestanddelen uitgestoten. De bij de ontgassing van de planeten vrijkomende gassen bestaan voor ruwweg 80 % uit waterdamp en 20 % uit kooldioxide (CO₂), naast geringe hoeveelheden andere verbindingen. De maan en Mercurius zijn te klein om die gassen vast te houden, maar op Venus, Aarde en Mars accumuleerde een CO₂-dampkring. Op Aarde en Mars condenseerde de uitgestoten waterdamp, terwijl bovendien veel water (en CO₂) werd aangeleverd als 'ruimte-ijs' door inslaande kometen. Zo kregen beide planeten vloeibaar oppervlaktewater. Op Venus, die dichter bij de zon staat, was de temperatuur vanaf het begin te hoog voor condensatie van waterdamp.

Venus

Venus onderscheidt zich direct van Aarde en Mars door haar extreem trage en retrograde aswenteling: één rotatie in 243 aardse dagen, mogelijk het gevolg van een botsing met een groot planetair lichaam in het turbulente beginstadium van het zonnestelsel. De planeet is gortdroog, zonder oppervlaktewater en met slechts spoorjes waterdamp in de dampkring. Afb. 6. De temperatuur aan het oppervlak bedraagt omstreeks 480°C, met geringe variatie van polen naar evenaar. Er is een dichte



Afb. 6. Eén van de twee enige foto's die tot dusverre direct op het oppervlak van Venus zijn gemaakt. De hoekige steenblokken bestaan uit basalt. (Russische landingsrobot Venera 10, 1982).

CO₂-dampkring met aan de basis een verstikkende druk van 90 bar, overeenkomend met de hydrostatische druk 900 meter onder het zeeoppervlak op Aarde. Op ongeveer 40 km hoogte is de planeet omhuld door een permanent wolkendek van zwavelstof en druppeltjes zwavelzuur, afkomstig van vulkanisme. De bij vulkanisme uitgestoten watermoleculen worden als gevolg van de hoge temperatuur door warmteconvecties naar de bovenste regionen van de dampkring getransporteerd, waar zij onder invloed van ultraviolette straling van de zon uiteenvallen. De lichte waterstofatomen ontsnappen naar de ruimte, terwijl de zwaardere zuurstof aan het venusiaanse gesteenteoppervlak wordt gebonden. Bij het verlies van de waterstof verdwijnen preferentieel de lichte waterstofisotopen, met als gevolg de opvallende verrijking van deuterium (²H) in de dampkring.

De condities op Venus doen dus meer denken aan Dantes' inferno dan aan de godin van de liefde waarnaar de planeet is vernoemd. Dit tot teleurstelling van degenen die tot ver in de vorige eeuw hoopten dat Venus een wereld zou zijn van dampende oerwouden en zompige moerassen, bevolkt door allerlei levensvormen.

Afb. 7. Panoramische opname van het Mars-oppervlak vanaf de Pathfinder. De landingsplaats is een breed dal (Ares Vallis) dat omstreeks 3,5 miljard jaar geleden door een stortvloed van water is uitgeschuurd. De basaltische steenblokken zijn door snelstromend water gedeponeerd. Naast het grote steenblok staat het robot-laboratorium Sojourner. (NASA, 1997).



Mars

Op Mars heersen eveneens barre condities: een ijle CO₂-dampkring met een druk aan de basis van omstreeks 7 millibar, 0,6 % van die op Aarde, waar dezelfde luchtdruk heerst op 40 kilometer hoogte.

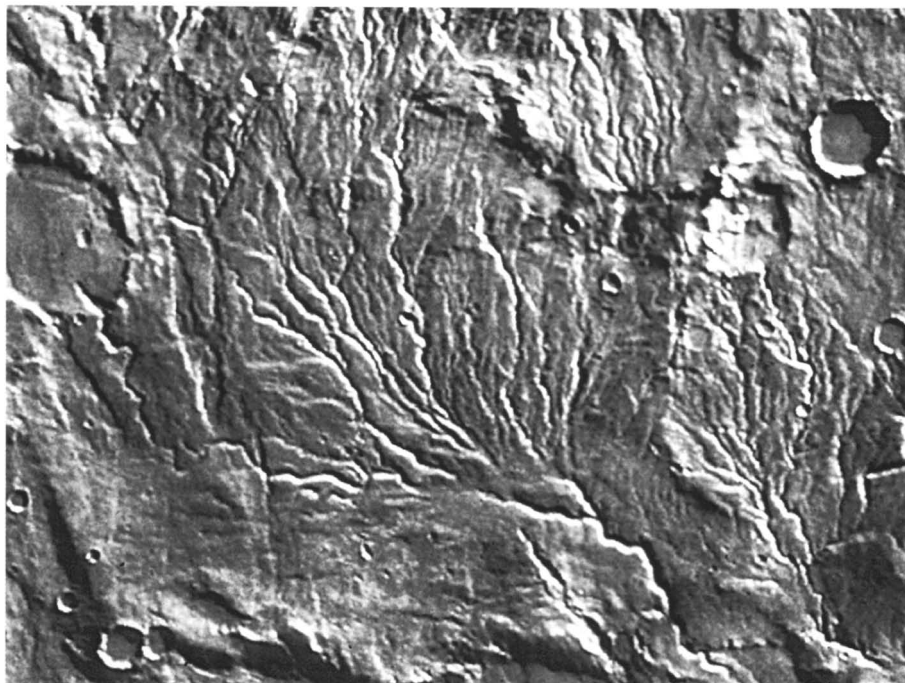
De temperatuur aan het oppervlak is overal beneden het vriespunt van water en op de Zuidpool zelfs permanent beneden het vriespunt van CO₂, -123°C. De luchttemperatuur kan plaatselijk in de middagzon oplopen tot bijna 0°C. Er is water, maar bij de lage temperatuur en ijle dampkring uitsluitend als damp en vooral als ijs: in de polaire ijskappen samen met CO₂-ijs, als rijp in de vroege ochtend, en als permafrost – bevroren bodemwater, zoals we op Aarde kennen van de toendra's in polaire gebieden. Hoewel de condities op Mars van alle planeten het meest overeenkomen met die op Aarde, zijn zij voor onze begrippen toch uiterst vijandig: koud, droog en een ijle CO₂-dampkring met felle zandstormen. Er is geen ozonlaag (O₃-moleculen) die de gevaarlijke ultraviolette straling van de zon absorbeert, en ook geen magnetisch veld dat het oppervlak beschermt tegen zonnewind en kosmische straling. Desondanks hebben experimenten in laboratoria aangetoond dat sommige archaebacteria (de genera *Pseudomonas* en *Aerobacter*) de martiaanse condities zouden kunnen overleven en er zich zelfs vermenigvuldigen.

Toch verliep de vroegste ontwikkeling van het milieu op Mars ongeveer hetzelfde als op Aarde.

Er was een dichtere CO₂-dampkring en aan het oppervlak heersten temperaturen waarbij vloeibaar water kon bestaan. Nog steeds zijn op Mars de 'fossiele' dalen te zien die toen door rivieren zijn ingesneden – rivieren die lang geleden regenwater naar zee hebben afgevoerd. Afb. 7 en 8. Het is mogelijk dat er in de martiaanse zeeën primitief microbiëel leven was, zoals terzelfder tijd onder gelijke condities op Aarde. Omstreeks 3,5 miljard jaar geleden ging het echter mis op Mars. De planeet verloor het grootste deel van zijn dampkring en aan het oppervlak kon geen vloeibaar water meer bestaan. Men neemt aan dat er nog wél water diep onder het oppervlak is.

De eventuele embryonale biosfeer verdween, hoewel men het mogelijk acht dat microbiëel leven zich tot de dag van vandaag in de diepte en misschien zelfs op beschutte plaatsen aan het oppervlak heeft kunnen handhaven, bijvoorbeeld nabij vulkanische warmtebronnen. Onlangs zijn ook op Aarde op een diepte van ruim 1.000 meter onder het landoppervlak voordien onbekende bacteriële ecosystemen ontdekt, die hun energie voor levensfuncties onttelen aan chemische reacties tussen water en gesteente.

De ineenstorting van het vroege martiaanse milieu wordt wel toegeschreven aan een zeer zware inslag, waarbij een groot deel van de dampkring naar de ruimte verdween. Dit kan de opvallende verrijking van zware isotopen van onder andere waterstof, stikstof en argon in de martiaanse dampkring verklaren:

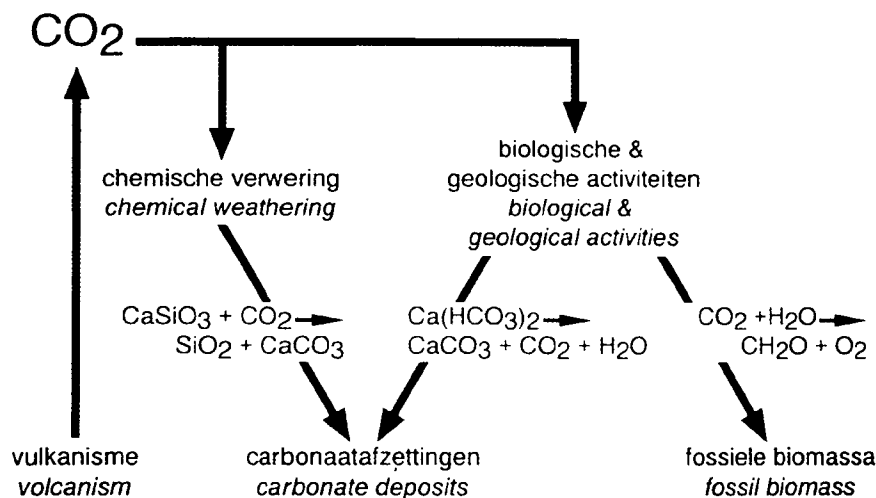


Afb. 8. Het patroon van droge, diep ingesneden dalen getuigt van water dat omstreeks 3,5 miljard jaar geleden over het oppervlak van Mars stroomde. Het afgebeelde gebied is 160 km breed. (NASA Viking Orbiter, 1975).

bij de ontsnapping van de atmosferische gassen naar de ruimte trad een preferentieel verlies op van de lichtere isotopen. De mega-inslag wordt ook in verband gebracht met de opvallende noord-zuid asymmetrie. Ten noorden van omstreeks 35°NB is het Mars-oppervlak een vlak laagland met enorme (dode?) vulkanen en weinig inslagkraters, dat door een kilometers hoog klif is gescheiden van hoger gelegen land, dat bezaaid is met inslagkraters en dus ouder moet zijn. Op Venus en Aarde kunnen zich ook mega-inslagen hebben voorgedaan, maar door hun grotere massa en dus grotere zwaartekracht hebben die daar niet tot significante atmosferische erosie geleid – de ontsnappingssnelheid is respectievelijk 10,3 en 11,2 kilometer per seconde, tegen 5,0 kilometer per seconde op Mars.

Aarde

Aarde onderscheidt zich van haar twee zusterplaneten door het bezit van een bipolair magnetisch veld, een chemisch-reactieve



Afb. 9. Vulkanisme brengt voortdurend koolzuurgas (CO₂) in de dampkring. Daartegenover staat dat koolzuurgas continu uit de dampkring verdwijnt door de opslag in sedimenten van carbonaten en organische koolstofverbindingen (biomassa), de producten van respectievelijk biologische en chemische carbonaatvorming, en biologische fotosynthese.

dampkring (hoog niveau van zuurstofgas en extreem laag CO₂-gehalte), een overvloed van vloeibaar oppervlaktewater, en het bezit van een uitgebreide biosfeer. Het aardmagnetisch veld wordt opgewekt door convectieve bewegingen in de gesmolten buitenste laag van de hete metallische kern. In de buurplaneten doen die zich kennelijk niet (meer) voor, maar er zijn aanwijzingen dat Mars in het geologische verleden ook een magnetisch veld had.

De andere unieke kenmerken van het aardse milieu hangen met elkaar samen. Zo hadden alle drie planeten aanvankelijk een CO₂-dampkring, maar alleen op Aarde is die door interactie met biosfeer en water en door allerlei geologische processen gemodificeerd tot de huidige, in chemisch opzicht absurde dampkring. De in de loop van de geologische tijd uitgestoten CO₂ is niet, zoals op Venus, in de dampkring gebleven, maar is grotendeels daaruit verwijderd door opslag in carbonaatgesteenten en fossiele biomassa. Afb. 9.

De belangrijkste carbonaatafzettingen zijn de enorme hoeveelheden kalksteen (calciumcarbonaat of calcium-magnesiumcarbonaat) die in zee zijn gevormd door rifbouwende diertjes en de opeenhoping van

tallose minuscule skeletjes van (micro)organismen. Afb. 10. Op land worden carbonaten geproduceerd door de interactie van chemische processen, bacteriën en water. Fossiele biomassa is het resultaat van biologische fotosynthese en de opslag in sedimenten van een klein deel van het daarbij door cyanobacteriën en planten gevormde organisch materiaal, als gevolg van geologische processen. De hoeveelheid koolstof die zo in de loop van de geologische tijd in carbonaatgesteenten, fossiele biomassa en sedimenten is opgeslagen, vertegenwoordigt 200.000 maal zoveel CO₂ als wat er in dampkring en oceaanwater aanwezig is. Als dat in de dampkring was gebleven, zou de Aarde thans dezelfde dichte CO₂-dampkring hebben als Venus.

Dezelfde processen die leiden tot de vorming van fossiele biomassa zijn ook verantwoordelijk voor de chemisch-reactieve dampkring van de Aarde – een gasmengsel dat spot met de wetten van chemisch evenwicht. Er is immers op het land en in de oceanen een overvloed van reducerende bestanddelen, die voortdurend zuurstofgas binden. Alleen al door reactie met de gesteenten aan het land-oppervlak zou alle zuurstofgas in enkele duizenden jaren uit de dampkring kunnen worden verwijderd, vooral door oxidatie van tweewaardig ijzer. De aardse dampkring is chemisch-instabiel en kan alleen blijven bestaan dank zij enerzijds de continue toevoer van zuurstofgas als afvalstof bij de biologische fotosynthese, en anderzijds de begraving van dode organismen. Dit in tegenstelling tot de CO₂-dampkring van Venus en Mars, die wél in een toestand van chemisch evenwicht verkeren.

Fotosynthetiserende bacteriën deden wellicht al omstreeks 3,5 miljard jaar geleden hun intrede in de aardgeschiedenis (afb. 11), maar tot ongeveer 2,5 miljard jaar geleden werd het bij de biologische fotosynthese geproduceerde zuurstofgas weer gebonden, voornamelijk door oxidatie van tweewaardig ijzer in oceaanwater. Hiervan getuigen de enorme afzettingen van 'gebandede ijzerformaties' uit die tijd. Toen begon de productie van zuurstofgas door de biosfeer de verwijdering



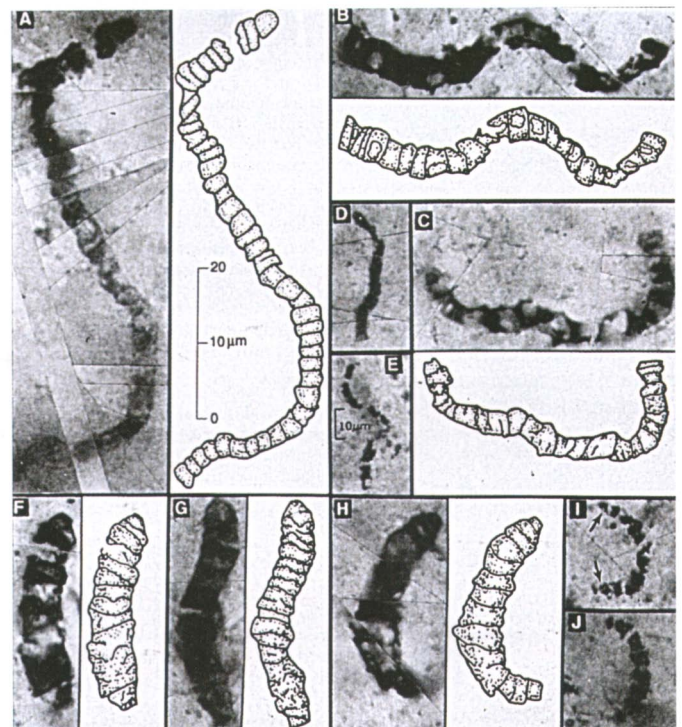
Afb. 10. Kalksteenklim aan de Oostzeekust van het Deense eiland Møn. De kalksteen is ongeveer 75 miljoen jaar geleden gevormd door de afzetting van kalkskeletjes van mariene micro-organismen in de warme Krijt-periode.

uit dampkring en oceaanwater te overtreffen en ontstond de unieke aerobe dampkring van de Aarde. Waarschijnlijk was dit het gevolg van de drastische gedaanteverandering die onze planeet van 3,0 tot 2,5 miljard jaar geleden onderging, door de massale toename van het volume van continentale korst – zo'n 60 tot 80 % van de huidige continentale korst is in die tijd gegenereerd. De voorheen 'oceanische Aarde', grotendeels bedekt met oceanen, veranderde in de 'moderne Aarde' met haar verdeling in continenten (40 % van het aardoppervlak) en oceanen.

Dynamische planeet

De Aarde is een dynamische planeet. Nog steeds verandert het aanzicht van onze planeet voortdurend als gevolg van *platen-tectoniek*, een regiem van onderling samenhangende processen dat sinds ten minste 2,2 miljard jaar geleden operationeel is. Door de ongelijke verdeling van warmte ontstaan kringlopen (convectiestromen) in de mantel, waarbij stroken plastisch (voor enkele procenten gesmolten) mantelmateriaal, dat warmer is dan zijn omgeving en dus een lager soortelijk gewicht heeft, vanuit de diepe mantel opstijgt. Boven in de mantel stromen zij horizontaal naar beide zijden weg en koelen af, om tenslotte afgekoeld en dus soortelijk zwaarder elders weer naar beneden te zakken. De buitenste 300 km van de Aarde is van boven naar beneden verdeeld in achtereenvolgens een ongeveer 80 km dikke, mechanisch starre, rigide en relatief koude laag, de *lithosfeer*, bestaande uit de oceanische en de continentale korst en de buitenste schil van de mantel, en daaronder een laag waar het mantelgesteente bij de daar heersende temperatuur en druk

(omstreeks 1250°C en 25.000 - 29.000 bar) voor enkele procenten is gesmolten tot basaltisch magma en zich daardoor plastisch gedraagt, de *asthenosfeer*. De lithosfeer is verbrokken in een mozaïek van een twintigtal grotere en kleinere platen, te vergelijken met de stukken van een legpuzzel. Die stukken, lithosfeerplaten, 'drijven' als het ware op de onderliggende asthenosfeer en bewegen ten opzichte van elkaar en over de aardbol met snelheden in de orde van enkele centimeters per jaar, meegesleurd door stromingen in de asthenosfeer. Waar twee lithosfeerplaten zich van elkaar verwijderen, welt basaltisch magma op uit de mantel. Zo wordt continu nieuwe *oceanische korst* gevormd, die met de lithosfeerplaat wegschuift om tenslotte in een *subductiezone*, waar twee lithosfeerplaten tegen elkaar botsen, weer in de mantel te zinken. De oceanische, uit basalt bestaande korst vernieuwt zich zo voortdurend en is nergens ouder dan 100 miljoen jaar. Diep in de subductiezone wordt door partieel smelten van het weggezonden materiaal (een mengsel van basalt, peridotiet, oceanisch sediment, en door reacties met oceaanwater gevormde waterrijke mineralen) magma gegenereerd met een dioritische (andesitische) samenstelling. Dit magma, dat rijker is aan silicium en alkaliën (natrium en kalium), stijgt op en vormt de *continentale korst*. Zo is het grootste deel van de continentale korst gevormd, die 40 % van het aardoppervlak beslaat. Omdat dioritisch gesteente soortelijk lichter is dan basalt, ligt de



Afb. 11. Indirecte bewijzen voor leven worden al in de oudste sedimenten (3,75 miljard jaar) op Aarde gevonden. Structuren die duidelijk van organische oorsprong zijn worden echter pas aangetroffen in sedimenten die zo'n kleine twee miljard jaar jonger zijn. 'Fossielen' in oudere sedimenten zijn omstreden, zoals de beroemde, hier afgebeelde, 'microfossielen' in een 3,5 miljard jaar oude laag van *silex* (sedimentair siliciumoxide) in West-Australië. Volgens J.W. Schopf (Science 260, 1993) zijn dit fossiele blauwalgen (100-200 micron lange draden van samengevoegde bacteriën); naast elke foto geeft de auteur een tekening van het organisme. Op basis van nieuwe gegevens menen sommige onderzoekers echter dat het hier zou gaan om chemische, abiotische groeisel.

continentale korst gemiddeld 3.900 meter hoger dan de oceaanbodem. Het aardoppervlak heeft hierdoor als enige planeet een bimodale hoogteverdeling. In tegenstelling tot oceanische korst is continentale korst te licht om weer in de mantel te zinken. Continentale korst is derhalve permanent, hoewel onderhevig

aan voortdurende verandering en omvorming. Hierbij ontstaat een heel scala van gesteenten, in ouderdom variërend van recent tot maximaal 4 miljard jaar.

Platentektoniek speelt ook een belangrijke rol in de kringloop van CO₂ en water in het 'Systeem Aarde'. Die interrelatie van tektoniek en (bio)geochemische cycli is eveneens een unieke eigenschap van onze planeet. Op Mars en Venus is géén platen-tektoniek. Voor Mars ligt dit vermoedelijk aan de veel kleinere massa, waardoor de planeet een geheel ander warmtebudget heeft. Op Venus is het vermoedelijk de waterschaarste die mantelgesteente minder makkelijk partieel doet smelten, waardoor het gesteente onvoldoende plastisch wordt voor grootschalige stromingen. Beide planeten onderscheiden zich dan ook van de Aarde door de afwezigheid van een continentale korst van het aardse type, en dus ook van de bimodale hoogteverdeling van het planetaire oppervlak.

Leven

Alleen de aarde heeft een biosfeer die een prominent geologisch agens is. Alle levensvormen, met inbegrip van de menselijke soort en diens activiteiten, zijn door stromen van energie, water en voedingsstoffen met elkaar en met de materiële wereld van gesteenten, lucht en water verweven tot een eenheid, het 'Systeem Aarde'. In sommige opzichten is dit zelfregulerende systeem te vergelijken met een levend organisme: alle organen werken samen en vormen tezamen een geheel dat méér is dan de som van de samenstellende delen. De biosfeer, in al zijn aspecten, is een bepalende factor in ontwikkeling en functioneren van dit 'orgaan'.

De breed- en diepverspreide biosfeer is wel het meest intrigerende aspect van het 'Systeem Aarde'. De oudste sedimentgesteenten laten zien dat er ten tijde van hun afzetting, 3,75 miljard jaar geleden, in zeewater al microbiële (bacteriële) leven was. Dat bleef zo tot omstreeks 2 miljard jaar geleden, toen ook meercellige organismen hun intrede deden. Die vereisen een omgeving met ten minste enig zuurstofgas, zodat hun evolutie pas op gang kon komen toen moleculair zuurstof (O₂) een substantieel bestanddeel van de dampkring werd. Bacteriën zijn echter tot de dag van vandaag de essentie van de biosfeer blijven uitmaken. Daarnaast is slechts een bescheiden rol weggelegd voor wat wij in het dagelijkse spraakgebruik 'de' fauna en flora noemen. Bovendien kunnen de complexe, meercellige organismen die de zichtbare levende natuur vormen slechts dank zij de symbiose met allerlei soorten bacteriën bestaan.

Is leven een exclusief kenmerk van de Aarde? Tenzij men aanneemt dat leven een metafysisch verschijnsel is dat los staat van de universele natuurwetten, moet men er wel van uitgaan dat leven ook elders in het heelal voorkomt. Voor zover het ons zonnestelsel betreft, zal in de komende decennia worden uitgemakt of een of andere vorm van microbiële leven ook op andere hemellichamen te vinden is, ook al is het nu al duidelijk dat een eventuele biosfeer nergens een zo prominente rol is gaan spelen als hier. Maar ook als leven zou worden aangetoond op Mars, de Jupiter-manen Europa en/of Ganymedes, en/of de Saturnus-maan Titan (de hemellichamen die het meest in de belangstelling staan bij de speurtocht naar eventueel extraterrestrisch leven), blijven er nog tal van fundamentele vragen. Is leven afzonderlijk op elk hemellichaam ontstaan door 'chemische evolutie' uit abiogene bouwstenen? Of was er biogenese op één hemellichaam en kolonisatie van hieruit? Het ruimteonderzoek van de laatste decennia heeft aangetoond dat interplanetaire migratie van bacteriën, in de vorm van sporen of 'slappende cellen' die door cysten zijn ingekapseld, zeker mogelijk is. Er is wel eens gesuggereerd dat het aardse leven afkomstig is van Mars, omdat de fysische condities daar in het vroegste begin gunstiger voor het ontstaan van leven zouden zijn geweest dan op onze planeet. Vooralsnog blijft dit alles speculatie. Toch begint zich het beeld af te tekenen van Leven als een verschijnsel dat inherent is aan de materiële werkelijkheid: het zou een universeel principe zijn dat de moleculen die de chemische bouwstenen van het leven vormen en breed verbreid zijn in het heelal, zich

overal tot leven organiseren waar de fysische omstandigheden dat mogelijk maken. Als dat kan worden aangetoond, zullen de wereldbeschouwelijke consequenties van dezelfde orde zijn als die van de copernicaanse en darwiniaanse revoluties in voorgaande eeuwen.

Het Einde

Volgens astrofysici heeft een ster als de zon een levensduur van ongeveer 10 miljard jaar. Daarvan hebben we de helft gehad. Na nog eens dezelfde tijd, waarin de biologische evolutie stellig nog vele verrassende levensvormen in petto heeft, zal de zon aan zijn doodstrijd beginnen. Dan worden de binnenplaneten van ons zonnestelsel in de expanderende zonnematerie opgenomen en zal dus toch nog het zo vaak geprofeteerde armageddon aanbreken. Zij het dat er over 5 miljard jaar al lang geen mensen meer zullen zijn die het Einde der Tijden kunnen ondergaan. Voor zover het ons zonnestelsel betreft, is dus een van de oudste natuurfilosofische twistpunten beslecht, dat van een eeuwige tegenover een in tijd begrensde materiële werkelijkheid. Er is een concreet begin en er is een concreet einde, met daartussen een tijdsinterval van 10 miljard jaar. Buiten de beperking van ons zonnestelsel zijn de oude vragen echter nog steeds actueel.

Enige literatuur

- Morrison, David, Planeten verkend. *Wetenschappelijke Bibliotheek Natuur & Techniek* (Beek, L.), 1996, ISBN 90 73035 503.
- Priem, Harry N.A., Aarde, een planetaire visie. *Van Gorcum & Comp.* (Assen), 1997, ISBN 90 232 2308 5.
- Priem, Harry N.A., & Vlaar, Nico J., Aardse Planeten. *Natuur & Techniek* (Maastricht), 1991, 59: 768-779.
- Schilling, Govert, Werelden naast de aarde – de planeten: ontstaan, evolutie, onderzoek. *Wereldbibliotheek* (Amsterdam), 1990, ISBN 90 284 1574 2.
- Westbroek, Peter, De dynamiek van de Aarde. *Uitgeverij Contact* (Amsterdam/Antwerpen), 1993.

Hoe oud?

Geologische tijdmeting berust voornamelijk op de in de natuur voorkomende radioactieve isotopen van uranium (²³⁸U en ²³⁵U), samarium (¹⁴⁷Sm), rubidium (⁸⁷Rb) en kalium (⁴⁰K). Deze elementen zijn breed verbreid in de gesteenten van het zonnestelsel, zij het, behalve kalium, in de regel in sporenhoeveelheden. Bij datering met behulp van deze elementen meet men in een gesteente of mineraal de verhouding van de hoeveelheden van het betreffende radioactieve isotoop en die van het door radioactief verval ter plaatse hieruit ontstane stabiele dochterproduct. Met behulp van de voor elk radioactief isotoop karakteristieke halveringstijd kan uit de verhouding de tijd (in aardse jaren) worden berekend, die is verstreken sinds het dochterproduct begon te accumuleren: de ouderdom van het gesteente of mineraal – bijvoorbeeld hoe lang geleden het gesteente uit een magma is gestold, of een mineraal is gekristalliseerd. De halveringstijden van de betreffende radioactieve isotopen zijn 4,467 miljard jaar voor ²³⁸U (dochterproduct: de loodisotoop ²⁰⁶Pb), 704 miljoen jaar voor ²³⁵U (dochterproduct: de loodisotoop ²⁰⁷Pb), 106 miljard jaar voor ¹⁴⁷Sm (dochterproduct: de neodymiumisotoop ¹⁴³Nd), 48,8 miljard jaar voor ⁸⁷Rb (dochterproduct: de strontiumisotoop ⁸⁷Sr) en 1,25 miljard jaar voor ⁴⁰K (twee vervalssystemen, met als dochterproduct respectievelijk de argonisotoop ⁴⁰Ar en de calciumisotoop ⁴⁰Ca). De gehele geschiedenis van het zonnestelsel kan ermee worden bestreken, met uitzondering van de laatste paar duizend jaar – in die korte tijd is er te weinig van het dochterproduct geaccumuleerd om meetbaar te zijn.