



In het Utrechtse Eurotanklaboratorium wordt in een zand- en waterbak van 6,5 bij 13 meter de vorming van delta's op Mars nagebootst.

Credits Postma, Kraai, Van Dijk en Kleinhans

GEOLOGEN ZOEKEN VERLEDEN VAN DE AARDE IN DE RUIMTE

ONS VERLEDEN LIGT OP MARS

Tot 3,8 miljard jaar geleden lijken de aarde en Mars onwaarschijnlijk veel op elkaar. Daarna gaan ze hun eigen weg. Op Mars vernietigen zonnewinden de atmosfeer, de voornaamste bestanddelen – water en kooldioxide – stromen de ruimte in, en de watercyclus komt tot stilstand. Dat de aarde niet hetzelfde lot heeft ondergaan, danken we aan plaattektoniek.

Door Annemieke VAN ROEKEL

'Leg een blok basalt op een stuk ijs en er gebeurt niets. Leg datzelfde blok in water en het verveert in de loop van de tijd tot kleiige mineralen', zegt planetair geologe Tanja Zegers. 'Die klei zien we op Mars, dankzij recente beelden van een moderne spectrometer die de mineralogie kan bepalen. We kunnen eruit afleiden dat er zeker tot 3,5 miljard jaar geleden veel vloeibaar water op het oudste, zuidelijk deel van de rode planeet moet hebben gestroomd.' Volgens Zegers, betrokken bij de Mars Express-missie van het Europese ruimtevaartgenschap ESA, maakt de

De aarde had net als nu oceanen, maar die waren behoorlijk zuur. Er was een atmosfeer met vooral kooldioxide, mogelijk ook zwaveldioxide en nauwelijks zuurstof en er was nog geen ozonschild dat de aarde tegen UV-straling beschermde. Er waren in die periode nog geen kalkafzettingen of andere sedimentaire gesteenten. 'Het principe *The present is the key to the past*, waarmee hele generaties aardwetenschappers zijn opgevoed, gaat voor het archeicum helemaal niet op', aldus Zegers. 'Processen die zich toen aan het aardoppervlak voltrokken, hebben geen analogie in

Toen Mars 3,8 miljard jaar geleden zijn dichte atmosfeer van kooldioxide kwijtraakte, belandde de planeet in een diepgevroren toestand. 'We denken dat de atmosfeer is geërodeerd door een verzwakking van het magneteveld, dat Mars beschermde tegen vernietigende zonnewinden', aldus Zegers. Zo'n magneteveld ontstaat door convectiestromingen in de vloeibare ijzeren kern, die als een geodynamo functioneert. 'Het idee is dat de extreem dikke korst van Mars, gemiddeld zo'n 40 kilometer, werkte als een isolatiedeken. Daardoor liep de temperatuur in de mantel op. Omdat convectie alleen optreedt als het temperatuurverschil tussen de vloeibare, (hete) kern en de (koude) mantel groot genoeg is, stopten de convectiestromen en verdween het magneteveld. Het enige magnetisme dat Mars nu nog heeft, wordt veroorzaakt door in het verleden gemagnetiseerd gesteente, maar dat is heel zwak en alleen direct boven het Marsoppervlak meetbaar.'

De losse platen waaruit de korst bestaat, zorgen ervoor dat de aarde zijn warmte kwijt kan

aanwezigheid van deze mineralen de oude hooglanden op Mars ineens een stuk interessanter. Anders dan op de noordelijke vlaktes bestaat de bodem van het bergachtige zuiden niet alleen uit basalt, maar uit een diversiteit aan gesteentes zoals we die ook op de aarde tegenkomen, met bijvoorbeeld klei en gips. 'De aandacht van de Marsmissies is tot nu toe vooral uitgegaan naar de piepjonge vulkanische gebieden in het noorden. Mogelijk gaat de nieuwe Europese ExoMars-missie, die in 2013 van start gaat, bodemanalyses uitvoeren op het oudste deel.'

Het is de vurige wens van Zegers, niet alleen om een beter beeld te krijgen van de begintijd van Mars, maar vooral om onze eigen aarde tijdens de eerste twee miljard jaar van haar bestaan beter te begrijpen. Want het archeicum – het eerste geologisch tijdvak na het ontstaan van de aarde, pakweg tussen 4,5 en 2,5 miljard jaar geleden – is voor geologen nog steeds een raadselachtige periode.

het heden. Onderzoek naar de geologie van planeten kan bij het ontrafelen van de oudste aarde daarom uitkomst bieden.'

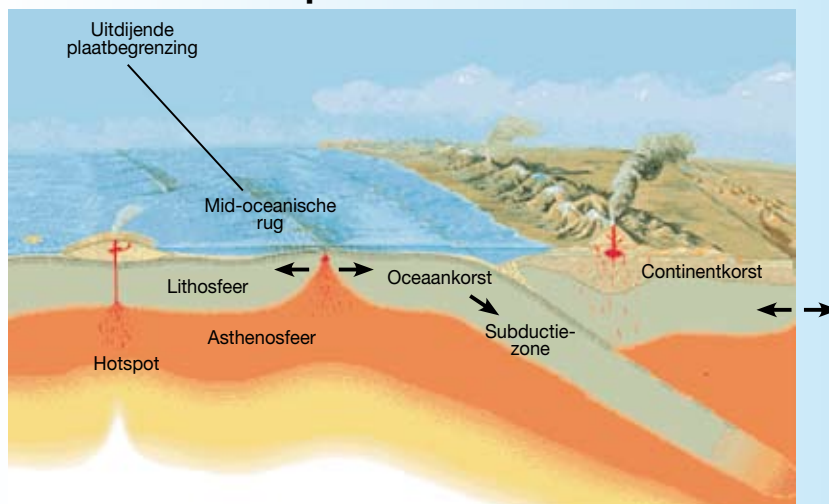
ISOLATIEDEKEN

Zeker is dat zowel de aarde als Mars in de beginperiode van het ontstaan van ons zonnestelsel een gelijke weg heeft bewandeld. Net als Venus en Mercurius hadden beide planeten een kern van ijzer en nikkel en ook het mantelmateriaal was vergelijkbaar. Zegers: 'Zowel de aarde als Mars had toen een atmosfeer van kooldioxide, dat een broeikas-effect veroorzaakte zodat de planeten hun warmte vasthielden.' Die vroege Marsatmosfeer moet behoorlijk dicht geweest zijn. Dat leiden geowetenschappers af uit de aanwezigheid van vloeibaar water. De luchtdruk op Mars bedraagt nu een fractie van wat die ooit geweest is. Daardoor gaat het water dat in de vorm van ijs aanwezig is, bij een hogere temperatuur direct over in waterdamp.

VENTILATIE

Ook de aarde heeft ooit zo'n superdikke basalten korst gehad. Met modellen kunnen aardwetenschappers berekenen hoe dik de korst van de primitieve aarde geweest moet zijn bij een gegeven temperatuur, druk en grootte van kern en mantel. Voor de moderne aarde komen ze uit op een gemiddelde dikte van de oceanische korst van zeven kilometer, wat klopt met de huidige situatie. De korst van de primitieve aarde blijkt, net als op Mars, gemiddeld veertig kilometer dik te zijn geweest. Zegers: 'Naarmate de mantel warmer is, begint de productie van basalt – het hoofdbestanddeel van de oceanische korst – uit magma al op veel grotere diepte. Daardoor krijg je een dikkere laag basalt. Uitgaande van die veel dikkere korst had de aarde dus net als Mars een andere tempera-

Plaattektoniek op aarde



subductiezone: een oceanische aardplaat schuift onder een continentale aardplaat.

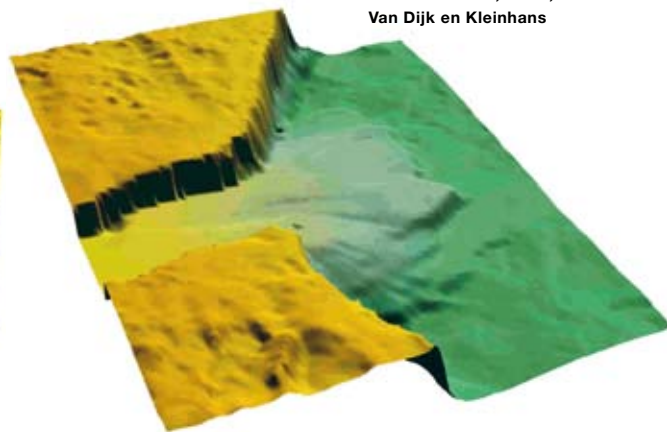
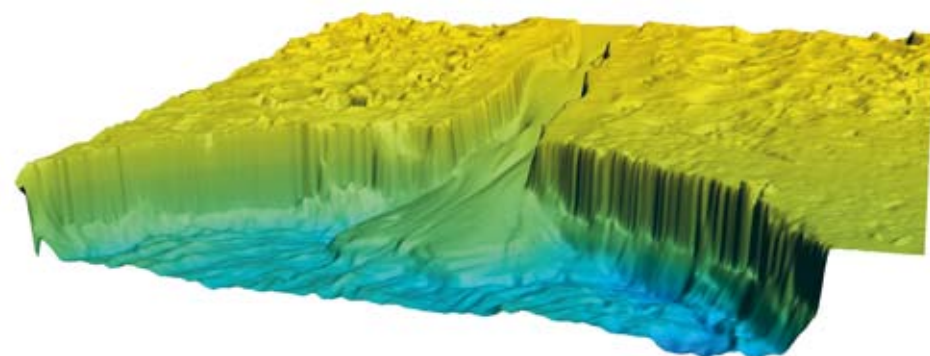
lithosfeer: het buitenste gedeelte van de aardkorst. (ongeveer 80 km dik).

asthenosfeer: een laag in het binnenste van de aarde (tussen 80 en 300 km diepte).

hotspot: een plek op een planeet waar vulkanisme plaatsvindt.



Credits Postma, Kraal,
Van Dijk en Kleinhans



De grote, door water gevormde outflow channels die in delta's in inslagkraters uitlopen, wijzen erop dat Mars vanaf 3,5 miljard jaar geleden vooral een droge planeet is geweest.

tuursverdeling in de mantel kunnen hebben en dat had tot het einde van het magneetveld kunnen leiden.' Als dat gebeurd was, zou de evolutie van de aarde heel anders verlopen zijn. Het is de plaattektoniek (zie infografiek op de vorige pagina) die de aarde 'gered' heeft van een diepgevroren bestaan.

De losse platen waar de korst uit bestaat, werken als enorme transportbanden die ervoor zorgen dat de aarde zijn warmte kwijt kan. Op sommige plaatsen bewegen die platen naar elkaar toe. De oude, zware korst zakt dan opnieuw de diepte in (een proces van subductie). Op andere plaatsen schuiven de platen net van elkaar weg (de mid-oceanische ruggen). De ruimte tussenin wordt opgevuld door nieuw magma, met een snelheid van een paar centimeter per jaar. Dit constante proces van verjonging heeft ervoor gezorgd dat de oudste oceanische korst op aarde niet ouder is dan 180 miljoen jaar, wat voor geologische begrippen extreem jong is. Dit ingenieuze 'ventilatiesysteem' zorgt ervoor dat het temperatuurverschil tussen kern en mantel groot genoeg blijft en de 'geodynamo', en dus het magnetisch veld, intact blijft.

De meeste geologen denken dat plaattektoniek in z'n huidige vorm op aarde 2,7 miljard jaar bestaat. Zegers: 'Vanaf die tijd komen voor het eerst langwerpige gebergtestructuren voor, die ontstaan op plaatsen waar de aardkorst 'onderduikt'. In het algemeen geldt deze subductie als een bewijs voor plaattektoniek. Moderne langgerekte gebergteketens zien we bijvoorbeeld in de Himalaya, de Alpen en in Zuid-Amerika. De oudste gebergten met zo'n langgerekte vorm vinden we in het Canadese Abitibi en het Australische Yilgarn in de oude *greenstone belts*, geologische zones met een combinatie van basalt en graniet die typerend zijn voor de oudste continenten.'

Geregeld duiken in de pers berichten op dat de plaattektoniek veel ouder, of juist veel jonger zou zijn. Geologen zoeken het bewijs hiervoor in fossiele brokken oceaankorst, de ophiolite-

ten, die in subductiezones of langs mid-oceanische ruggen ontstaan. Maar alleen de gesteentesamenstelling als bewijs van subductie is discutabel, omdat het gesteente ook onder andere omstandigheden ontstaan kan zijn.

OERCONTINENTEN

De precieze datering van de vroegste plaattektoniek heeft weer gevolgen voor de datering van een ander geologisch fenomeen: het ontstaan van de oude kratons, de voorlopers van de oercontinenten. Sommige geologen menen dat continenten alleen door subductie kunnen ontstaan en dat plaattektoniek er dus al moet zijn geweest voordat de kratons bestonden. In Australië en Zuid-Afrika bestudeerde Zegers de 3,5 miljard jaar oude kratons die daar nog ongeschonden zijn. Ze concludeerde dat deze *greenstone belts* niet

niek zijn geweest die die korstfragmenten bij elkaar bracht. Misschien werkte dat systeem door kleinschalige subductiecellen of door mantelpluimen, grote bellen heet magma die naar het oppervlak stijgen en daar voor afkoeling zorgen, vergelijkbaar met wat we nu op Venus zien.' Het ontstaan van plaattektoniek met subductie, zoals we dat vandaag kennen, dateert hij net als Zegers rond 2,7 miljard jaar geleden. 'Dat neemt niet weg dat er voor die tijd een vreemd soort plaattektoniek kan hebben bestaan, waarbij de eerste oercontinentjes rondobberden in een gesmolten massa, zonder dat er sprake was van lange, lineaire subductiezones zoals je die nu bijvoorbeeld ziet bij de Andes.'

Passchier, ook hoogleraar Tektonofysica aan de Duitse Johannes Gutenberg Universität, werkt momenteel aan de reconstructie van

Net wanneer Mars verandert in een bevroren planeet, moet op aarde het leven zijn ontstaan

door subductie zijn ontstaan, maar doordat de korst veranderde in een zwaarder deel (met het gesteente eclogiet) en een daarboven gelegen lichte laag. Uit dit proces zouden de eerste kratons zijn ontstaan. Ook toonde ze aan dat beide kratons een miljard jaar lang een geheel vormden voordat ze in stukken braken en uit elkaar dreven. Nu liggen ze deels in Afrika (Kaapvaal) en deels in Australië (Pilbara).

'Drie miljard jaar geleden vinden we al supercontinenten die zijn samengesteld uit stukken korst die duidelijk onafhankelijk van elkaar zijn ontstaan', zegt Cees Passchier, bijzonder hoogleraar Precambrische Geologie aan de Vrije Universiteit in Amsterdam. 'Rond die tijd moet er dus al een soort tekto-

de plaatbewegingen van drie oerkratonen die nu in Namibië liggen, uit de tijd dat Zuid-Amerika en Afrika nog aan elkaar vast zaten. Een van de drie kratons, de Rio de la Plata-kraton, ligt deels aan de overkant van de Atlantische Oceaan, in Argentinië en Uruguay. 'We willen weten in welke volgorde de oercontinenten bewogen en hoe. Helaas is het in de geologie niet mogelijk om experimenten met gesteenten te doen in het laboratorium. Observaties aan andere planeten zijn voor ons daarom van groot belang. Afhankelijk van hun grootte, samenstelling, leeftijd en afstand tot de zon, zijn de planeten – en hun manen – in verschillende stadia van ontwikkeling blijven steken. Daar kunnen we voor reconstructies van de vroege aarde veel van

leren.' Vooral Io, de binnenste maan van Jupiter, intrigeert Passchier. 'Het is het enige hemellichaam in ons zonnestelsel waar waarschijnlijk een soort vulkanisme voorkomt dat ook op de vroege aarde heeft bestaan. Dit 'komatienvulkanisme' ontstaat onder invloed van een soort getijdewerking door de korte afstand tot de reuzenplaneet, bij een extreem hoge temperatuur tussen de 1600 en 1800 graden Celsius. Komatieten zijn extreem magnesiumrijke basaltachtige gesteenten met langgestrekte olivijnkristallen die op aarde te vinden zijn in de oudste *greenstone belts*. Hun samenstelling en structuur wijzen op veel hogere temperaturen in de oude aardmantel dan nu het geval is.'

MARS, DE BLAUWE PLANEET

Precies op het 'moment' waarop Mars transformeert naar een 'bevroren planeet', 3,8 miljard jaar geleden, moet op aarde het leven zijn begonnen. De oudste voor het oog zichtbare *fossil record* van kalkstructuren op aarde, die door blauwalgen zijn gemaakt, stamt van 3,5 miljard jaar terug. Van de nog oudere bacteriën, de eerste levensvormen op aarde, zijn chemische fossielen het voornaamste bewijs. Het zijn restanten van chemische processen van levende organismen die met isotopenonderzoek kunnen worden aangetoond. Als er nauwelijks iets op Mars is veranderd nadat 3,8 miljard jaar geleden de atmosfeer verdween, zoals Zegers suggereert, is het aanne-

melijk dat, als er op Mars microbiëel leven is geweest, dat in de vorm van fossielen nog ergens in het Marsgesteente aanwezig is. Anders dan op aarde is het gesteente niet grotendeels met de lopende band van de plaattektoniek naar grote diepten getransporteerd of door erosie verdwenen. Op Mars heeft winderosie het aanzien van de planeet weliswaar veranderd, maar de watererosie was er veel minder agressief dan op onze aarde.

Recent onderzoek wijst uit dat de kleimineralen op Mars zijn ontstaan bij temperaturen tussen 100 en 200 graden Celsius – omstandigheden die gunstig zijn voor de ontwikkeling van leven. Zegers: 'Tot ongeveer 3,8 miljard jaar geleden, en misschien zelfs nog langer terug, zien we kleimineralen in het Marsgesteente. We begrijpen nog niet precies bij welke geologische processen deze kleimineralen gevormd zijn. Wel is zeker dat voor de omzetting naar klei vele miljoenen jaren interactie tussen gesteente en vloeibaar water nodig is. Hoe lang die periode precies heeft geduurd is van belang voor de kans dat er zich op Mars ooit leven heeft kunnen vormen'.

De voor biogeologen meest uitdagende periode is wat dat betreft het noachisch tijdperk, de Marsvariant van het archeïcum op aarde, tussen 4,6 en 3,5 miljard jaar geleden. Want na die tijd, vanaf het hesperisch tijdperk (3,5-3 miljard jaar geleden), droogt de planeet langzaam op. De aanwijzing hiervoor vinden geologen onder meer in grote, door water gevormde *outflow channels* die uitlopen in delta's (zie figuur).

Maarten Kleinhans van de Universiteit van Utrecht analyseerde meer dan tien delta's op Mars die onomstotelijk door waterstromen – en niet door gruisstromen – gevormd zijn. Bijna alle delta's liggen in inslagkraters van meteorieten, omdat het smeltwater dan naar een lager gelegen gebied kon stromen. In het Utrechtse Eurotanklaboratorium, een zand- en waterbak van 6,5 bij 13 meter, worden de Marsdelta's nagebootst. Kleinhans en zijn collega's concludeerden dat alle delta's op slechts enkele jaren tijd, tijdens één gebeurtenis, gevormd moeten zijn, met een uitschietter van 500 jaar die in een paar vloedden is ontstaan. Kleinhans: 'Voor geologische begrippen is dat ongekend kort. Sommige delta's zijn zelfs in minder dan een jaar gevormd. Bevroren ijs in de bodem was de bron van het water, dat smolt door tijdelijke temperatuurverandering als gevolg van vulkanisme.' Weliswaar zijn er vanaf 3,5 miljard jaar geleden op Mars uitschietters in de vorming van vloeibaar water, voor kleivorming en gunstige condities voor microbiëel leven zullen geowetenschappers zich moeten richten op het alleroudste gesteente op de ooit (licht-)blauwe, rode planeet. ●

KRATERS TELLEN

Dat er op Mars, net als op de andere planeten, waarschijnlijk nooit plaattektoniek heeft bestaan, leiden geologen af uit de intensiteit van de inslagkraters van meteorieten. Zonder de werking van de enorme transportbanden, zoals op de aarde, wordt op de andere planeten de korst alleen vernieuwd in de buurt van vulkanen door verse lavastromen. De rest van het oppervlak blijft miljarden jaren vrijwel ongewijzigd. Door inslagkraters te tellen is ook bekend in welke periode de meeste meteorieten op de jonge planeten zijn ingeslagen. Op aarde zijn de meeste in-

slagkraters niet meer zichtbaar. Ze zijn verdwenen in subductiezones of onherkenbaar gemaakt door erosie. Mars ziet er door de immobiele korst al miljarden jaren ongeveer hetzelfde uit. Veranderingen in het landschap hebben zich vooral voorgedaan op het noordelijk halfrond, wat een vulkanisch actief gebied is. Dat de korst stabiel is, zie je goed aan de grote vulkanen op Mars, zoals de Olympus Mons. Door de vaste ligging van deze schildvulkaan en constante aanvoer van magma uit de mantel is hij uitgegroeid tot de grootste vulkaan van ons zonnestelsel.



Met zijn hoogte van 24 km en diameter van 500 km is de Olympus Mons op Mars de grootste vulkaan van ons zonnestelsel.