

Mars vanuit een aards perspectief

door dr. Anne Rutger Fortuin en prof. dr. Jan Smit
Faculteit voor Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam
anne.fortuin@falw.vu.nl; jan.smit@falw.vu.nl

Vanwege de afwezigheid van zichtbaar leven is Mars eigenlijk niets anders dan een kille en dorre planeet, één grote woestijn. Een planeet getekend door duizenden meteorietinslagen. Echter met hier en daar zeer indrukwekkende landschappen vanwege spectaculaire hoogteverschillen en bijzondere reliëfvormen. Want Mars is geen dode klomp steen zoals de Maan. Nieuwe waarnemingen maken steeds duidelijker dat het Marsreliëf tot tenminste een paar miljoen jaar geleden gevormd werd door lavastromen, stromend water en ijs. Juist omdat het verre verleden van Mars wel wat op dat van onze planeet lijkt, is de bestudering van de oppervlakte van groot belang om onze eigen planeet te begrijpen.

Inleiding

Kan je vanuit ervaring met aardse veldgeologie iets zinnigs zeggen over de geologie van Mars? De Gea-redactie stelde de samenstellers van deze bijdrage voor, om op basis van een selectie van foto's van het Marsoppervlak, te kijken of wij, als geologiedocenten, daarmee uit de voeten kunnen en of er aardse equivalenten te bedenken zijn. Het leek ons een spannend idee. Als docenten zijn we gewend om studenten te begeleiden op hun ontdekkingsstochten in de wereld van de sedimentaire gesteenten. Een beetje 'veldwerk' op Mars doen van achter ons computerscherm is weer eens iets heel anders.

"Waar beginnen we aan" is al gauw een opkomende gedachte nadat een serie foto's de revue is gepasseerd en je je een beetje verdiept hebt in de Mars-achtergronden. Mars is zo afwijkend van onze Aarde, dat de meest ervaren experts waarschuwen voor directe vergelijking daarmee. Met name de sterk verschillende grootte (halve diameter van Aarde), de veel ijlere en zuurstofarme atmosfeer, de stofrijke en waterloze gebieden en de vele inslagkraters dragen daaraan bij. Bovendien cirkelt Mars in een sterk ellipsvormige baan om de zon en schommelt de draaiingsas dermate onregelmatig, dat de intensiteit van de zonneschijn - en daarmee het Marsklimaat - in de loop der tijden sterk gevarieerd moeten hebben. Al deze facetten zullen de Mars-specialisten nog jaren bezighouden, dus bescheidenheid onzerzijds is zeer gepast. Als niet-Marsonderzoeker wapen je je natuurlijk wel met enige achtergrondkennis, net zo goed als dat nodig is voor een aards veldwerk. Nu moeten we wel eerlijk zeggen dat er inmiddels zoveel informatie gepubliceerd is in wetenschappelijke literatuur en op het web, dat we ons daar zeer goed op konden oriënteren. Nu dat is gebeurd gaan we op Mars!

Fotomateriaal en literatuur

Veel door ons bestudeerde foto's zijn afkomstig van de ESA, het Europese ruimte-agentschap (European Space Agency). Sinds januari 2004 draait de ESA Mars Express satelliet zijn waarnemingsrondes om Mars. Deze satelliet is uitgerust met meerdere meetinstrumenten en een zeer bijzondere hoge resolutie camera (HRSC), die in staat is om ruimtelijke beelden te ontwerpen van het oppervlak van Mars tot een nauwkeurigheid van 10 m (voor speciale gevallen zelfs tot 2 m). Bovendien worden 3D foto's en daarvan afgeleide digitale hoogtemodellen gemaakt. Voor analytische doeleinden is er een infrarood spectrometer aan boord (OMEGA voor Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité). Dit instrument is in staat om waarnemingen te doen aangaande

de aanwezigheid van ijzer, water, kleimineralen, kalken, nitraten etc. Van bijzondere betekenis is ook MARSIS, een instrument dat radargolven van lage frequentie naar de planeet stuurt en reflecties weer opvangt. Daar deze golven ook in de ondergrond doordringen en diepere grenslagen reflecteren kan inzicht verkregen worden in de afwisseling en opbouw van gesteentepakketten. De ESA is zo vriendelijk om veel fotomateriaal in publiekelijk toegankelijke websites te plaatsen, zie bijvoorbeeld http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/.

Traditiegetrouw heeft NASA al een grote naam als gegevensverschaffer. Velen hebben via de media (bijvoorbeeld National Geographic, zie de editie van februari 2001 met Marskaart, of die van juli 2005) kennis kunnen nemen van indrukwekkende Marsbeelden gemaakt door de Mars Global Surveyor. Daarnaast heeft NASA twee explorerende robotwagens, de Spirit en de Opportunity, sinds begin 2004 op het Marsoppervlak in actie. Deze robots waren geconstrueerd voor een beperkte levensduur en het feit dat ze nu al ruim twee jaar actief zijn overtreft alle verwachtingen. Ze kunnen samen weliswaar maar een fractie onderzoeken van wat een getraind Mars-geoloog in dezelfde tijd zou kunnen (aldus National Geographic), maar hun bijdragen zijn van eminent belang. Daarnaast presenteert de Global Surveyor satelliet zowel hoogtegegevens via de MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), naast gewone hoge-resolutiefoto's van het oppervlak. Een andere belangrijke missie voert het ruimtevaartuig Mars Odyssey uit. Sinds 2002 inspecteert en fotografeert deze het Mars-oppervlak met drie verschillende instrumenten. De Gamma Ray Spectrometer (GRS) levert de gegevens voor de relatieve hoeveelheden van chemische elementen in de ondergrond, zoals waterstof, chloor, kalium, thorium e.d. Zo kunnen bijvoorbeeld de relatief waterrijke en waterarme gebieden van Mars op een kaart getoond worden, of de in het oog lopende chemische verschillen tussen het oppervlak van Aarde en Mars (zie <http://grs.lpl.arizona.edu/latestresults.jsp>). Vervolgens leveren een temperatuurgevoelige sonde (THEMIS, THERMAL EMISSION IMAGING SYSTEM) en een stralingsgevoelige (MARIE, voor Mars Radiation Environment Experiment) aanvullende gegevens. Zij die op de hoogte willen blijven van de Amerikaanse Marsbeelden worden verwezen naar website <http://www.msss.com/>.

Vanwege de vloed aan hoogwaardige nieuwe gegevens publiceren belangrijke wetenschappelijke tijdschriften, zoals bijvoorbeeld Nature en Science, de laatste jaren regelmatig nieuwe resultaten van de Amerikaanse en Europese onderzoeksteams. Zoals gebruikelijk bij wetenschappelijk onderzoek bestaan er naast de nodige algemeen aanvaarde inzichten ook meningsverschillen tussen onderzoeksgroepen. Bijvoorbeeld over de rol van en de mate van vroegere aanwezigheid van water op Mars. Wij laten die discussies voorlopig voor wat ze zijn en we gaan zelf gewoon een beetje 'rondkijken'. Een probleem daarbij is de vaak grote schaal van het geheel.

Windafzettingen

Grote delen van Mars zijn bedekt door een laag stof en/of zand met stenen. Op andere plaatsen zien we juist het vaste gesteente aan het oppervlak. Willen we proberen analoge aardse situaties aan te wijzen, dan zullen dat meestal fenomenen uit woestijnen zijn, polaire of anderszins. De Marslan-



Afb. 1. Een Marslandschap als gefotografeerd door verkenner Spirit in de Gusev krater.

De wielsporen geven de schaalverhoudingen aan. De woestijnachtige bodem is bezaaid met donkere, tamelijk hoekige stenen van waarschijnlijk bazaltische samenstelling. Sedimentaire gelaagdheid is te zien; de lagen vertonen een zekere helling van de camera af.

De zandiger plekken vertonen windribbels en plaatselijk kleine stuifduintjes. (Foto NASA/JPL-Caltech)

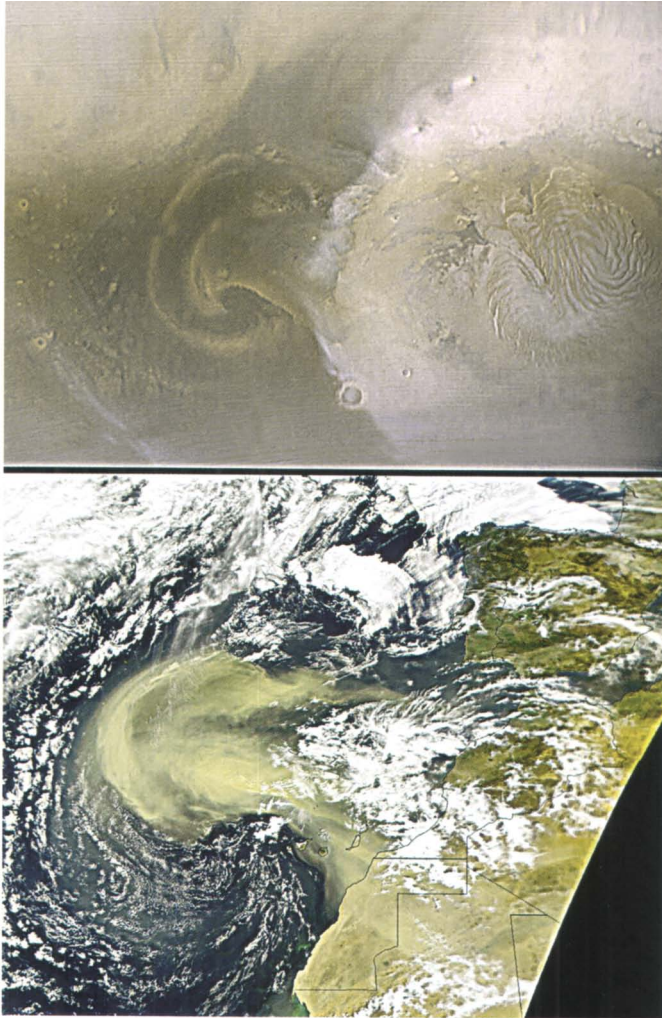
ders zijn neergezet in relatief vlakke gebieden met weinig stof. Het oppervlak blijkt daar rijk aan hoekige gesteentefragmenten en zand. Afb. 1 is een romantische foto door het zichtbare spoor van de Spirit in de Gusev krater. We zien iets hellende lagen van vermoedelijk vulkanische oorsprong. Het zand en de stenen lijken vooral van bazaltische samenstelling te zijn. Helaas is er nog geen apparatuur aanwezig die de precieze chemisch-mineralogische samenstelling kan onderzoeken. Op sommige plaatsen ligt zand met door de wind veroorzaakte ribbels, elders is juist veel steenslag. Zulk terrein is goed vergelijkbaar met wat je in aardse woestijnen, waar geen of nauwelijks sedimentatie plaats vindt, kunt zien. Langdurige verwerking (vooral door dagelijkse sterke temperatuurverschillen en wind) zorgt er voor de vergruizing van gesteente. Als de windkracht toeneemt zullen zand- en stofdeeltjes in beweging komen. Stof gaat vooral de atmosfeer in terwijl de meeste zandkorrels dicht bij de grond blijven. Sedimentpartikels rollen over de bodem, bewegen zo snel dat ze de lucht ingeworpen worden door botsingen (salteren),

of ze gaan in suspensie door menging met de turbulente luchtmassa. Tot dusverre is overigens gebleken dat Marswinden minder grove korrels blijken te kunnen suspenderen dan aanvankelijk werd verondersteld.

Waar zand zich ophoopt vormen zich windribbels en/of kleine duintjes. Iedereen die wel eens langs een winderig Noordzeestrand heeft gewandeld weet dit uit eigen ervaring. Als de aardse woestijnwind maar veel blaast ontstaat een door losse stenen gedomineerd geheel omdat het zand wel verplaatsbaar is (afb. 2) en op Mars zal het niet veel anders zijn. De Mars-atmosfeer is erg ijl. Waar bij ons de luchtdruk op de grond rond de 1013 mbar is, is die op Mars een 150 keer minder (6.7 – 8 mbar). Het belangrijkste gas (ruim 95%) is kooldioxide, terwijl vrije zuurstof maar in zeer geringe mate voorkomt (0.13%). In deze ijle atmosfeer zullen sedimentpartikels minder makkelijk getransporteerd worden. Toch zijn wel grote gebieden met duinvorming of juist winderosie waargenomen. Metingen wijzen op windsnel-

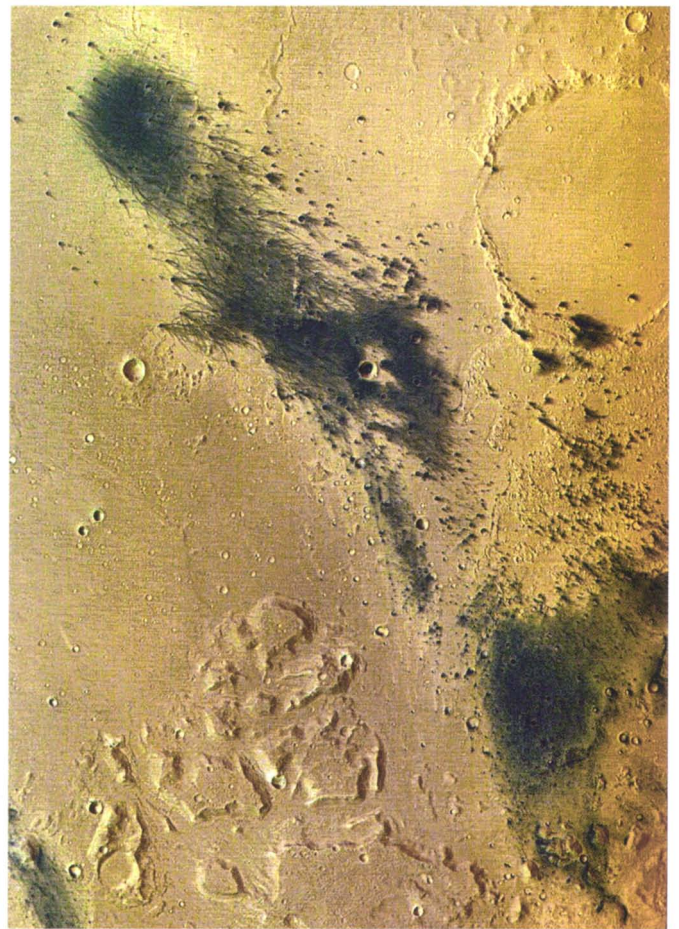
Afb. 2. Ter vergelijking met afb. 1 een aardse woestijnbodan, gefotografeerd bij Nazca in de zeer droge kustwoestijn van Peru. Ook hier valt de slechte afronding van de stenen op door het weinige transport (foto ARF).





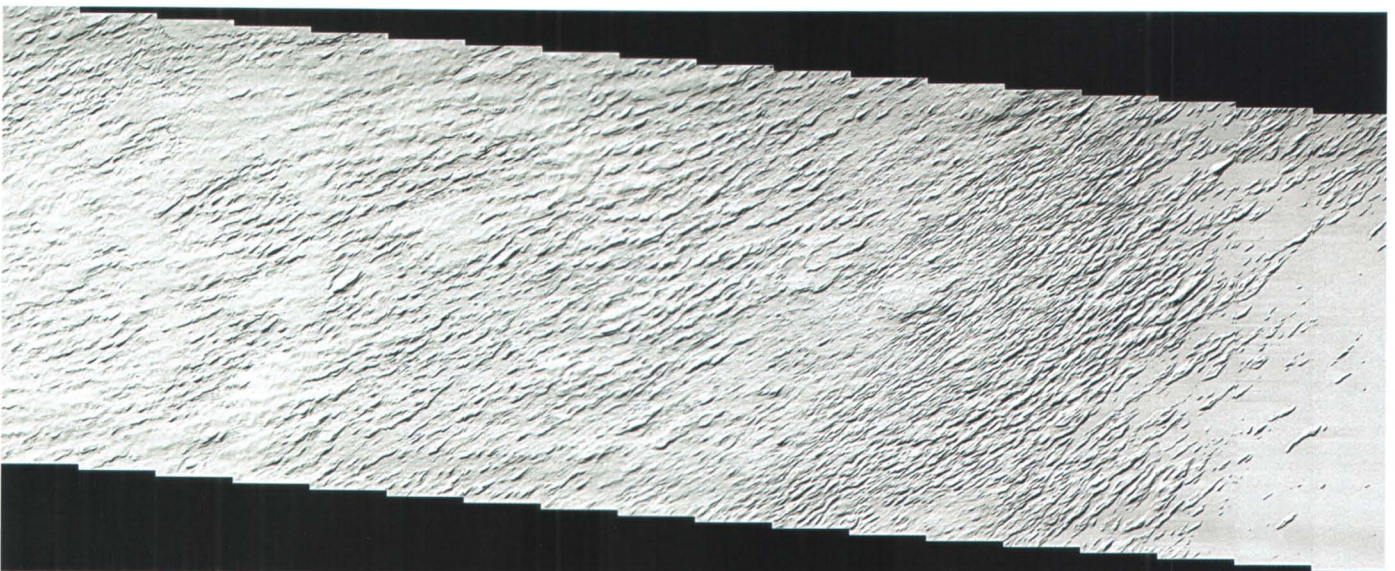
Afb. 3. Stofstormen op Mars en op Aarde. Boven: Op Mars gaat het om winden vanuit de poolstreken. Onder: Op Aarde zijn het stofstormen die vanuit de Sahara hun sediment in de Atlantische Oceaan zullen achterlaten. (Foto NASA/JPL-Caltech)

heden tot 600 km/u. Bij snelheden van 100 km/u kan nog geen zand getransporteerd worden. Stofstormen kunnen gigantische afmetingen aannemen (afb. 3). Op rustige momenten kunnen zich net als op Aarde regelmatig 'stofduivels' ontwikkelen, onschuldige windhozen. Dergelijke draaiwinden blijken de zonnepanelen van de Marsrovers af en toe ontdaan te hebben van neergedwarreld stof, wat bijdraagt aan hun reeds 'lange' levensduur.

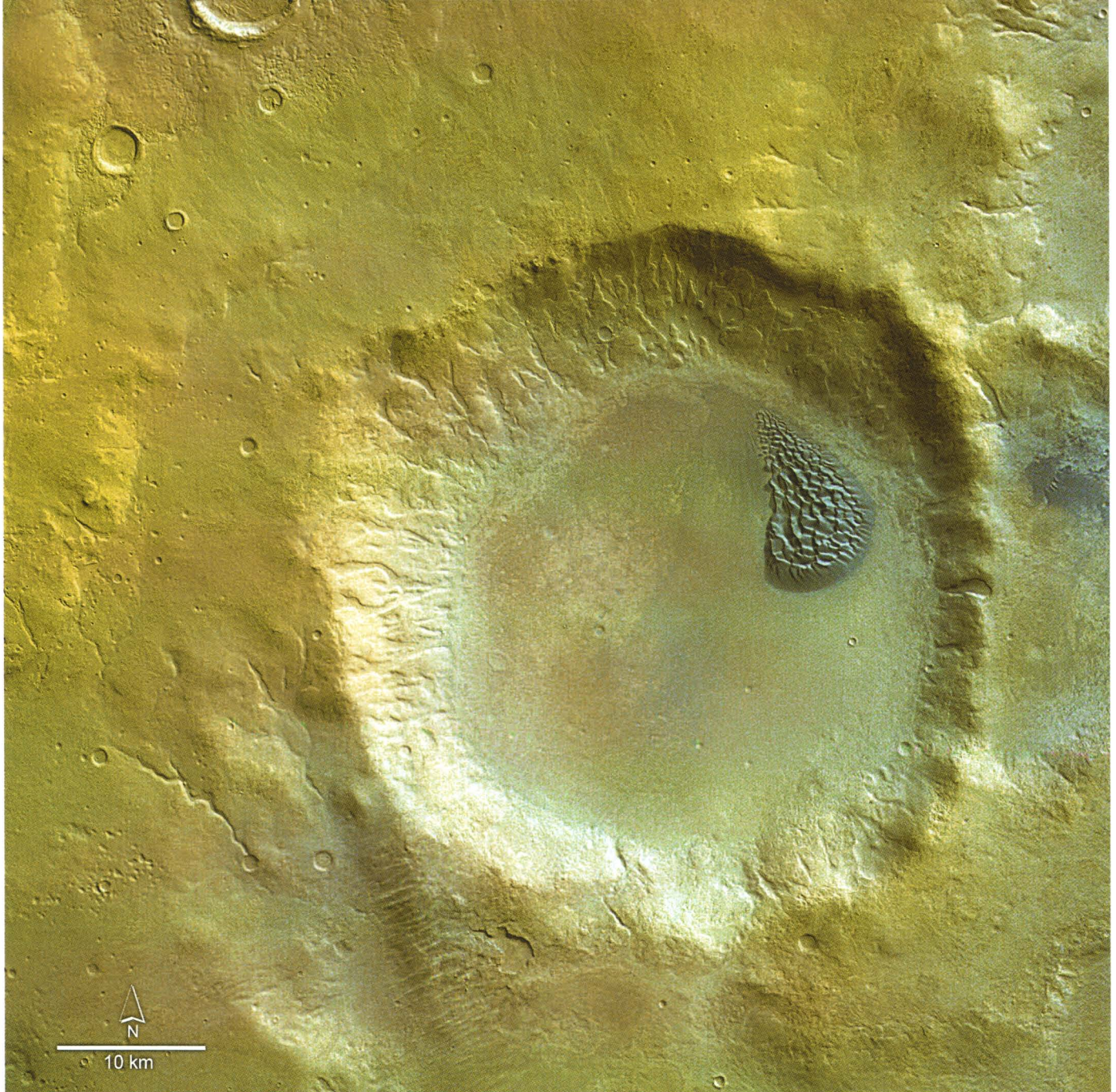


Afb. 4A. Het zuidoostelijke deel van de grote Gusev-krater (het gebied waar de Spirit zijn verkennerswerk doet) laat merkwaardige donkere lijnen in onduidelijke concentraties en met 'rare vegen' zien. Waarschijnlijk zijn deze patronen ontstaan door kleine windhoosjes, die het rossige Marsstof opnamen, zodat de donkere vulkanische ondergrond zichtbaar werd. Het totale veld bestrijkt 66x45 km. (Foto THEMIS-HRSC)

Afb. 4A van een deel van de Gusev krater, waar de verkenners Spirit is neergekomen, laat rare donkere, streepachtige patronen zien. De streping loopt in grote lijnen diagonaal door de foto. Het wordt geïnterpreteerd als de sporen van



Afb. 4B. In de equatoriale zone van Amazonis Planitia strekt zich over meer dan 1000 km een gelaagd en matig verhard gesteente uit (de Medusae Fossae Formatie; vulkanisch?), dat op veel plaatsen danig moet zijn aangetast door winderosie. De foto (N is rechts) toont talloze langwerpige ruggen, waarbij de steilere en scherpere reliëfpunten naar de overheersende windrichting wijzen. Het meest noordelijke deel is vlakker en sterker geërodeerd. (NASA/JPL/Arizona State University).



Afb. 5A (boven): In deze oude krater, gelegen in het noordwestelijke deel van het Argyre Planitia-kratergebied, is een ruim 10 km lang, komvormig duinenveld ontwikkeld. De richting van de kammen varieert. De duinen zijn het hoogst aan de zuidkant en verlopen in noordwestelijke richting. Ze lijken door twee windrichtingen te zijn beïnvloed, die zowel zandbeweging in de richting van de punt, als meer naar het kratercentrum veroorzaakten (zie detailfoto 5B). Geulachtige insnijdingen in de wanden van de krater wijzen op vroegere erosie, mogelijk onder invloed van water. (Foto's ESA)

windhozen. De windhozen nemen de bovenste stoflaag mee en het daaronder gelegen donkere vulkanische gesteente komt bloot te liggen.

Waar krachtige winden langdurig uit dezelfde richting waaien is de wind in staat om merkwaardige reliëfvormen te scheppen. Vooral als er gelaagd gesteente, met afwisselend hardere en zachtere lagen, jaar in jaar uit door de wind geteisterd wordt ontstaan er grillige, langgerekte en puntvormig uitlopende heuvels (afb. 4B). In woestijnen zijn ze geen zeldzaamheid. De gangbare naam voor deze reliëfvormen, *yardang*, komt uit China, waar winderosie een belangrijke rol speelt. De term werd er al in de vijfde eeuw nader omschreven. De beroemde sfinx van Gizeh wordt door geomorfologen ook wel als een door mensenhanden verfraaide yardang gezien.

Zandduinen, de meest bekende woestijnvormen, zijn goed te zien in afb. 5A en B. Foto 5A toont een krater van ca. 40 km in doorsnede in Argyre Planitia. De westelijke kraterwand is aangetast door hellingprocessen, die ervoor gezorgd hebben dat deze minder steil is geworden. Het bijzondere is dat zich in de kratervlakte een bijna kommavormige duinenrij heeft ontwikkeld. Afb. 5B. Waarom alleen op die plek? Denk aan onze herfstwinden, die bladeren ogenschijnlijk her en der verspreiden, maar na enige tijd blijkt het blad zich vooral op de luwere plekken op te hopen. Vermoedelijk is de plek voor de steile noordoostelijke kraterwand de plek waar het zand enigszins tot rust komt, maar waarbij erosie optreedt aan de zuidkant en nieuwvorming plaats vindt aan de lagere noordkant. Merk op dat de steile wanden van de krater duinenrij blijven.

Vulkanisme

Vulkanen zijn niet zeldzaam op Mars, maar actief vulkanisme is (nog) niet waargenomen. Het vermoeden is dat vulkanen in een niet al te ver verleden zeer actief geweest zijn, dat wil zeggen tussen grofweg 100 en 200 miljoen jaar geleden. Op Aarde zijn vulkanen vooral gekoppeld aan plaattektonische processen, zoals langs spreidingsruggen en boven subductiezones. Daarnaast kennen we *hot spot*-vulkanisme en vulkanen langs diepe (rek)breuken. Op Mars is geen plaattektoniek aangetoond. Het is er vermoedelijk afwezig en het merendeel van de vulkanen lijkt gekoppeld aan gebieden boven *hot spots*. Men vermoedt dat het merendeel van de vulkanische gesteenten van basische tot ultrabasische samenstelling zal zijn.

Er is een aantal regio's met zeer grote vulkanen op Mars; de allergrootste is treffend Olympus Mons gedoopt. Deze vulkanen zijn van het type schildvulkaan. Dat wil zeggen dat ze zijn opgebouwd uit goed vloeibaar magma, zodat zich brede, en zich langzaam verheffende kratersbouwsels vormden. We kennen ze ook van Hawaii. Maar de grootste vulkaan daar (Mauna Loa) zinkt in het niet bij de Olympus, die een basis van 550 km doorsnede heeft en gemiddeld 22 km in hoogte varieert tussen basis en top. De Mauna Loa verheft zich 'slechts' 9 km boven de oceaanbodem. De Olympus is voorzien van een enorme, iets ovale caldera, die 3 km diep is en ca 90 km lang (afb. 6). Een caldera (Portugees voor ketel) is een flinke ringvormige depressie aan de top van de vulkaan, die ontstaat door instorting van de zich dicht onder het oppervlak bevindende magmakamer, nadat die zich geleegd heeft als gevolg van een uitbarsting. Ook op Aarde zijn grote caldera's bekend. Zo is het Toba Meer op Sumatra een met water gevulde caldera van 30 x 100 km. Het laatste Toba-vulkanisme vond 70.000 jaar geleden plaats, waarbij 2800 km³ tefra werd uitgestoten tot ver in de Indische Oceaan. De Amerikaanse *hot spot*-caldera van Yellowstone National Park in de USA is van een vergelijkbare omvang, ook qua volume van in het verleden uitgestoten materiaal.

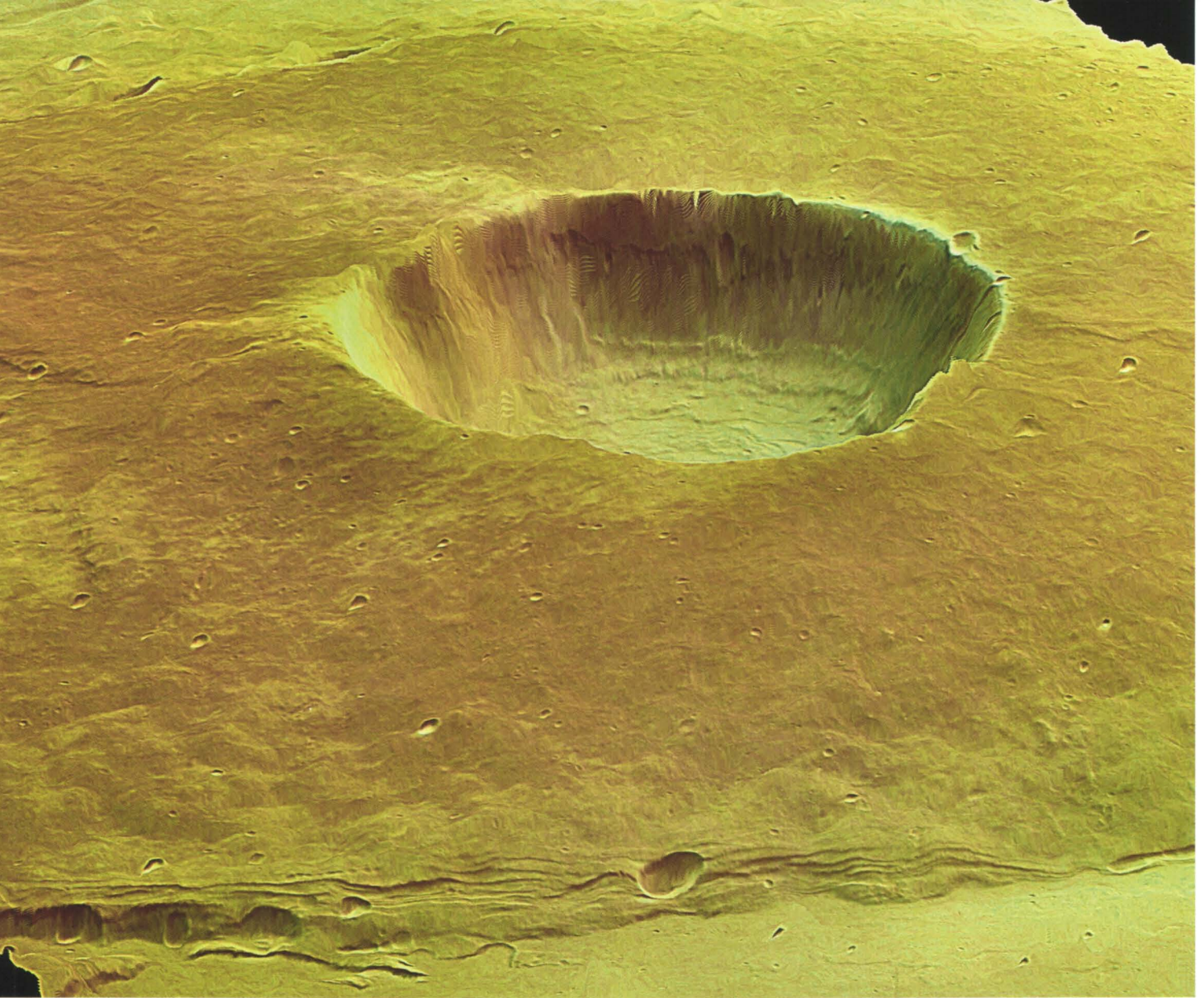
De bouw van de Olympus krater wijst op vijf collapsfasen van de magmakamer (Neukum et al., 2004; afb. 6). Volgens

de gangbare dateringsmethode (op basis van de relatie tussen de cumulatieve inslagkraterfrequentie per oppervlakte-eenheid, afgezet tegen de kraterdiameter) zou de oudste caldera rond 200 miljoen jaar geleden gevormd zijn en de jongste rond 100 miljoen jaar geleden. Andere grote vulkanen geven weer andere ouderdommen, bijvoorbeeld tussen 1 miljard jaar geleden en 100 miljoen jaar geleden voor Hecates Tholus. De meeste lava's op de flanken van deze supervulkanen geven echter uitvloeiingen aan tussen 3.8 miljard en 100 miljoen jaar. Op de lagere flanken van Olympus Mons zijn jonge ouderdommen berekend tussen 115 miljoen en 2.4 miljoen jaar (Neukum et al., 2004), wat het vulkanisme dus behoorlijk recent maakt en impliceert dat het nog niet hoeft te zijn afgelopen.



Afb. 6. De caldera van Olympus Mons, de grootste Marsvulkaan en alle aardse vulkanen in afmetingen verre overtreffend. De caldera vertoont vier duidelijk in hoogte verschillende vlakken die wijzen op meerdere fasen van uitstromen van de magmakamer, gevolgd door instorting daarvan. De centrale grootste ring wordt gedateerd op vorming 140 Myr (miljoen jaar) geleden (Neukum et al., 2004). De kleinere ronde caldera's aan respectievelijk de boven- en onderkant van de foto worden gedateerd op vorming 200 Myr geleden. Het resterende een-na-grootste calderaveld zou 170 miljoen jaar geleden zijn ingestort. Tenslotte is nog een minder opvallende 'maansikkelvormige' calderavlakte te zien aan de rechterrand. Deze is gedateerd op 100 Myr. Met name de grootste calderavlakte vertoont cirkelvormige breuken, die te maken zullen hebben met verdere afkoeling en inzakking. (Foto ESA)

De vulkaan Albor Tholus heeft geen samengestelde caldera. De opname van deze caldera (afb. 7) is spectaculair, omdat er juist veel stof over de rand van de caldera naar beneden stuift. De caldera heeft een diameter van 30 km en is 3 km diep, tweemaal dieper dan de Grand Canyon! Ter vergelijking een veelbezochte aardse caldera (afb. 8), namelijk die waarop de Bromo-vulkaan is gelegen. Dit is een relatief kleine stratovulkaan binnen de Tengger-caldera op Oost-Java, die 16 km in doorsnede is. Veel toeristen trekken in de vroege ochtend naar de kraterwand van de Bromo in de hoop een



Afb. 7. De caldera van Albor Tholus. Deze opname is bijzonder vanwege de grote hoeveelheden stof die langs de 3 km hoge calderarand naar beneden dwarrelt. De onregelmatig verloopende richels op de steile calderahelling zouden wel eens te maken kunnen hebben met het geleidelijke uitzakken van aangevoerd stof en zand onder invloed van de zwaartekracht. (Foto ESA)



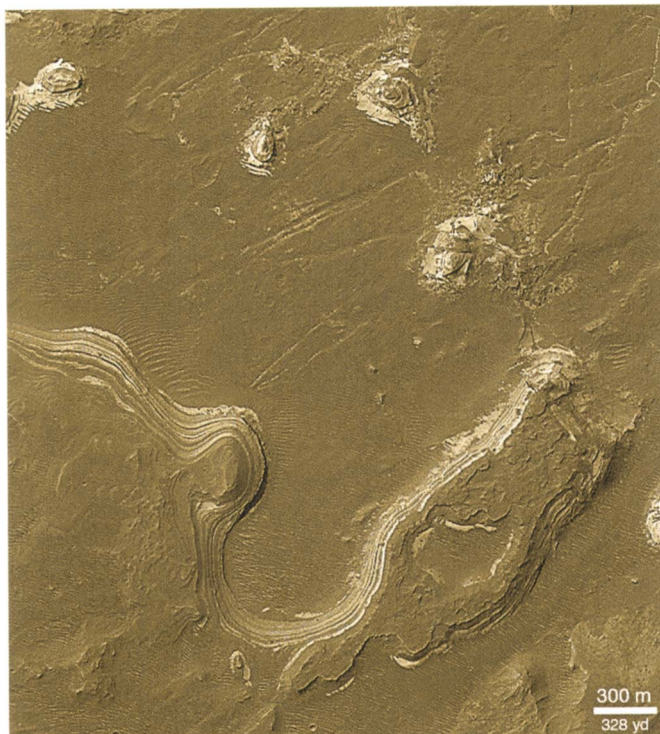
Afb. 8. De Tengger-caldera, Oost-Java, gezien in het vroege ochtendlicht vanaf de rokende en toeristentrekkende Bromo-vulkaan (foto ARF).



Afb. 9. De zuidelijke flank van de grote vulkaan Ascraeus Mons vertoont merkwaardige oppervlakte-sculpturen. Deze kunnen het beste worden geïnterpreteerd als ingestorte lavatunnels. Opvallend is dat er twee bijna loodrecht op elkaar staande hoofdstroomrichtingen geweest lijken te zijn. Sommige tunnels werden tientallen kilometers lang. HRSC-opname vanaf 271 km hoogte. (Foto ESA)

spectaculaire zonsopgang mee te maken, zo ook een keer ARF. Met name de afdaling en rondwandeling in het vroege ochtendlicht over de calderavlake buiten het toeristenpad deed haast buitenaards aan met een dampende Bromo in de rug en het kale kraterlandschap, dat door een stevige ochtenbries die het fijne naaldevormige vulkaanstrand tot halverwege het lijf deed stuiven, bij tijd en wijle mensonvriendelijke proporties aannam.

De bovengenoemde ouderdommen wijzen erop dat vulkanisme op Mars zich heel anders gedraagt dan op Aarde, waar vulkanen doorgaans een kort leven (van niet meer dan hooguit enkele miljoenen jaren en meestal veel minder) is beschoren. Wat de precieze redenen zijn voor deze verschillen is niet helemaal duidelijk, maar de plaattektoniek van onze Aarde zal hier ongetwijfeld mede debet aan zijn.



Afb. 10. Deze detailopname toont horizontaal gelaagd gesteente. In de vlaktes tussen de hierdoor gevormde tafelbergen is in duinvorming te onderscheiden. (Foto ESA)

Een speciale *feature* van het Marsoppervlak in vulkanische gebieden is het voorkomen van lavatunnels (*lava tubes*). Op Aarde zijn deze bekend van vulkanen die goed vloeibare lava produceren. Toeristen op La Palma of op Hawaii kunnen met dit fenomeen kennis maken; er zijn daar hobbyisten die aan tunnelverkenning doen. Een tunnel komt neer op een leeggestroomd afvoerkanaal van lava. Uitstromende lava koelt aan de bovenkant sneller af, er wordt daar dus een trager bewegende korst gevormd, die verder afkoelt, terwijl daaronder snellere stroming doorgaat. Als de magmatoevoer stopt loopt vanzelf de aldus ontstane tunnel leeg. Hete lava kan bovendien de ondergrond doen opsmelten en zo tunnellopen verdiepen, zodat een complex gangenstelsel ontstaat. De oppervlak-nabije tunnels zullen bij flinke breedte instorten en zo in het reliëf opvallen als een dal. Dat laatste lijkt het geval in afb. 9 van de flank van Ascraeus Mons, de noordelijkste vulkaan van de bij de equator gelegen Tharsis-groep. Deze Marsvoorbeelden van tunnels zijn qua afmeting echter vele malen groter dan hun vermoedelijke Aardse equivalenten. Het moeten op Mars zeer breed uitstromende lava's geweest zijn, zodat het lavadak onmogelijk in stand kon blijven.

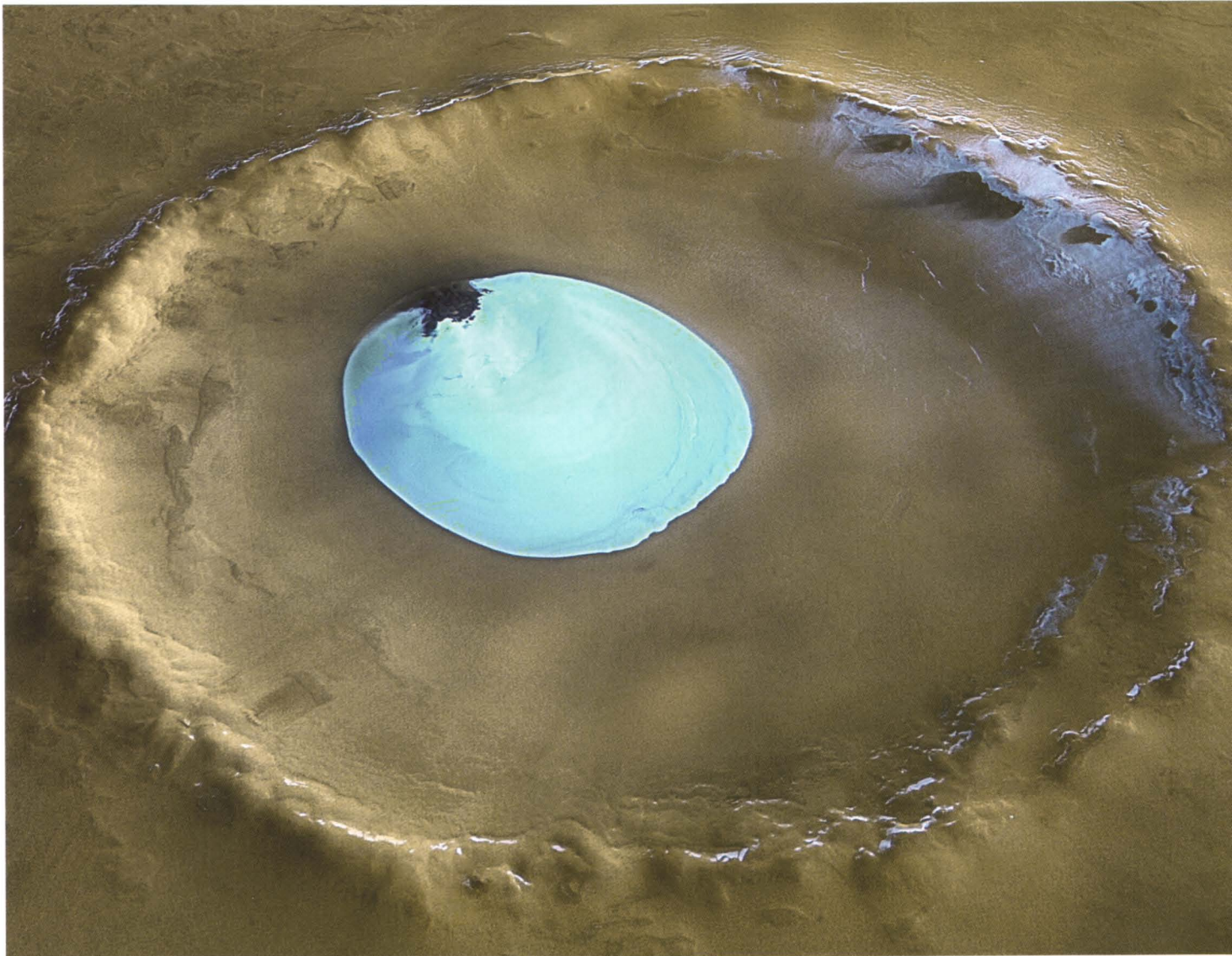
Gelaagd gesteente

Heb je het geluk een goed plekje aan het raam van een vliegtuig te hebben bemachtigd en vlieg je over niet al te begroeid terrein, dan is zo van grote hoogte de gelaagdheid van sedimentaire gesteenten vaak goed te zien. Zeker in terreinen met dik gelaagde pakketten, zoals vaak bij kalkstenen het geval is, of met afwisselende lithologieën. Op Aarde zijn gesteenten vaak scheef gesteld, of geplooid. Plooibundels in kalere landschappen zijn goed op satellietfoto's te ontwaren. Op Mars zijn voor zover ons bekend geen door tektoniek geplooid gesteenteseries waargenomen, lokale uitzonderingen daargelaten. Kalkstenen zijn er op Mars waarschijnlijk evenmin, want voor de vorming van de aardse carbonaten zorgen vooral organismen die in waterrijke milieus leven. Gelaagdheid op Mars valt echter wel vaak te zien. Vaak is dat – vermoedelijk – op grote schaal uitgestoten vulkanisch materiaal, vulkanische tuffen en dergelijke. In onze fotocollectie is een fraaie opname van heel duidelijk horizontaal gelaagd gesteente (afb. 10). Waar is ons helaas niet bekend. Op het eerste gezicht lijken het reliëfliijnen zoals je die bijvoorbeeld ook ziet als een stuwmeer een verlaagd peil krijgt en de oude oeverranden als kleine steiltes in het drooggevalen talud zichtbaar worden. Hier lijkt het echter

om echte horizontaal liggende sedimenten te gaan. Dit patroon is zo consequent aanwezig, ook in de topjes van het plateau en in de resten van yardang-achtige ruggen in de laagvlakte. Het leuke van deze opname is dat er kennelijk een plateaurand met afwisselend iets hardere en zachtere lagen is geërodeerd door de wind. Wind erosie ligt voor de hand gezien de vele zandduinen die in de depressies aanwezig zijn. Overal zie je windsporen, geen enkele geul die periodieke afvoer van water suggereert. Het geheel lijkt zo uit een aardse woestijn te kunnen komen.

Water, ijs en massatransport

De aanwezigheid van water (en ijs) op Mars is overtuigend aangetoond. Dat is van fundamenteel belang voor de eventuele aanwezigheid van leven op de planeet. Vrij stromend water is nog nooit aangetoond, maar wel de sporen die stromend water in het verleden hebben achtergelaten. Dat geldt ook voor de sporen die stromend ijs, oftewel gletsjers achterlaten, terwijl ijs incidenteel ook nu voorkomt. Een bijzonderheid is dat glaciale sporen ook zijn waargenomen rond de equator, terwijl waterijs in vaste vorm lokaal in kraters is waargenomen (afb. 11). Dat landijs sporen ook in de equatoriale zones zijn waar te nemen wordt verklaard door te wijzen



Afb. 11. Deze flinke noordelijke inslagkrater in de brede vlakte Vastitas Borealis (70° N.Br.) heeft een doorsnede van 35 km, terwijl de kratervlakte 2 km onder de rand is gelegen (N.B.: reliëf 3 x overhoogd in deze opname). Het bijzondere van deze opname is de aanwezigheid van een restant waterijs, terwijl ook bevroren vocht zichtbaar is op de schaduwwijkere, zuidelijke, kraterrand. Omdat het ijs tot 300 m boven de bodem uitsteekt, zou dit volgens de deskundigen nooit alleen ijs kunnen zijn. Vermoed wordt daarom dat dit ijs zandduinen bedekt (analoog aan de duinen op afb. 5), die deels ook uitsteken boven het ijs. (Foto ESA)



Afb. 12. De overgang van landijs naar in zee uitlopende gletsjers op zuidoost Groenland, gezien van 10 km hoogte. Midden en links op de voorgrond monden gletsjers uit in zee, helemaal op de voorgrond. Een patroon van ijsschotsen is goed te zien in een randje open water (vergelijk met Mars, afb. 15). De donkere lijnen op de gletsjers die uit het achterland komen zijn middenmorenes; ook een bescheiden zijmorene is te zien (midden rechts). Waar de ijsstroom bij de kust versnelt door het afgaande reliëf vertoont de gletsjer talloze breuken loodrecht op de vloeirichting. Rechts op de voorgrond kalft een gletsjer af in zee. (Foto ARF)

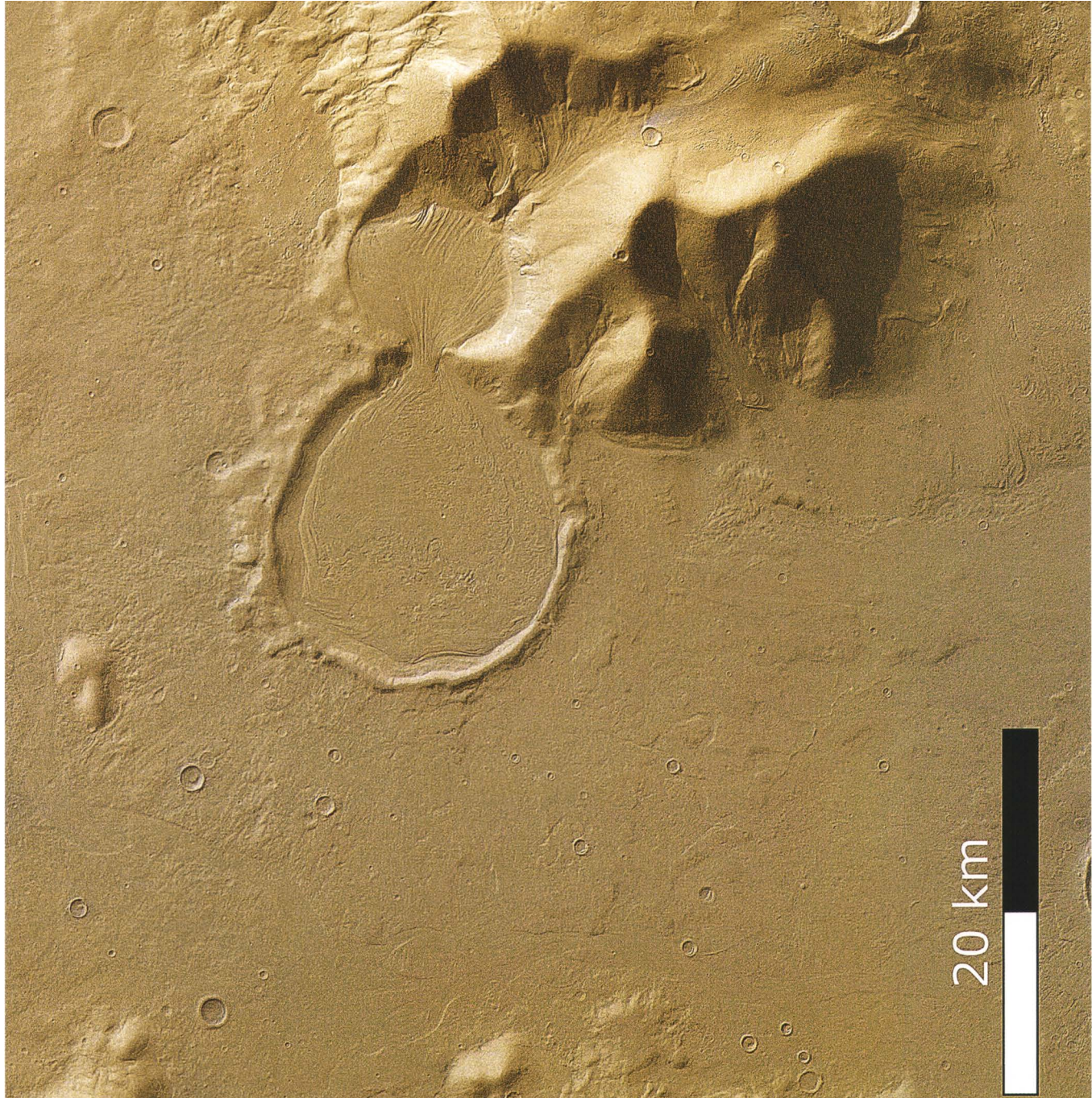
naar de - in vergelijking met de Aarde - extreme variabiliteit van de scheve stand van de rotatieas van Mars. Dit zou in periodes met voor de meer polaire gebieden gunstige zonne-inval verdamping daar bevorderen, met uiteindelijk bevrozing van de waterdamp in meer equatoriale streken (Neukum et al., 2004).

Hoewel de eerste satellietobservaties door Mariner 9 in 1972

al aanwijzingen over de uitwerking van water op het Mars-reliëf gaven, toonden met name de eerste Amerikaanse hoge resolutie-opnames door de Mars Orbiter Camera aan, dat er in elk geval nu geen stromend water meer bijdraagt aan de huidige reliëfvorming, maar dat dit in het verleden wel degelijk moet zijn gebeurd. Met name sijpelend grondwater wordt verantwoordelijk geacht voor relatief jonge geul-



Afb. 13. HRSC-opname van de westelijke flank van Olympus Mons. We zien een steile wand met een kilometers hoog reliëfverschil naar de lagere helling. Deze lagere helling vertoont langgerekte richels in de vorm van aureolen. Een mogelijk ontstaan zou of gletsjerwerking kunnen zijn, of lavavuitvloei, dan wel massatransport. Dichter onder de sterk ingesneden steilwand zijn gladdere hellingen (puinaccumulaties), die overgaan naar een ruwere topografie, wat goed veroorzaakt zou kunnen zijn door massatransport van hellingmateriaal onder invloed van glaciale activiteit (piedmont gletsjers). (Foto ESA)



Afb. 14. Een HRSC-opname van een tweetal kraters aan de oostelijke rand van Hellas Planitia. Deze diepst gelegen laagvlakte van Mars toont een tweetal kraters die achtereenvolgens met morenemateriaal gevuld zijn, dat afkomstig is van gletsjers gevoed door de beschaduwde bergwand bovenaan de foto en nog verder verwijderde aanvoerbronnen (zie tekst). De vlakte in het onderste deel van de foto vertoont een groot aantal langgerekte, ondiepe dalen, die sterk doen denken aan woestijnwadi's, oftewel periodieke waterafvoer in vroeger tijden. (Foto ESA)

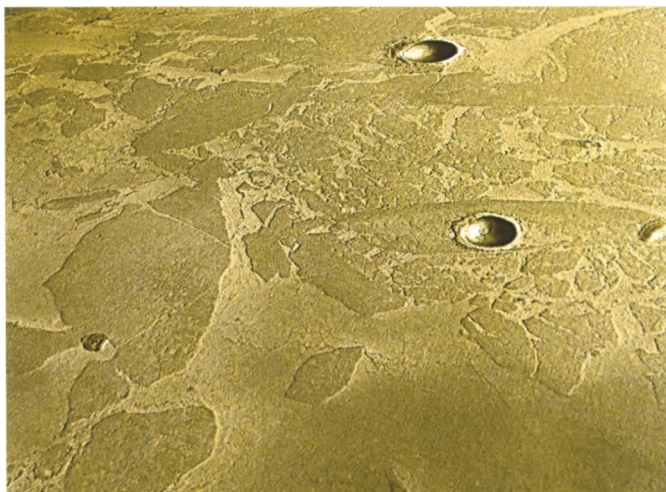
vorming langs hellingen. (Malin en Edgett, 2000, geven mooie voorbeelden, zie ook National Geographic, januari 2004). Recent aanvullend onderzoek door de HRSC (Neukum et al., 2004) geeft aan dat dit vrijkomende water vermoedelijk gekoppeld was aan hydrothermale activiteit dan wel gewoon aan opsmelten in samenhang met vulkanisme. Dit soort afvoerprocessen kan al of niet in samenwerking met solifluctie verlopen, het hellingproces waarbij materiaal door vriezen-dooien langzaam van een helling afstroomt. Solifluctie speelt in koude klimaten een uiterst belangrijke rol.

Dankzij mineralogische meetgegevens door de OMEGA-sonde van de Mars Express weten we nu ook uit andere bronnen dan geomorfologische inzichten, dat er ooit op Mars door vloeibaar water aangestuurde processen werkzaam waren. Of er in een ver verleden een stabiele hydrosfeer was is niet zeker, maar de aanwezigheid van bijvoorbeeld phyllosilicaten (een kleibestanddeel) wijst op de rol van water. Phyllosilicaten ontstaan bij de chemische verwerking van stollingsgesteenten onder langdurige inwerking van water. Ze moeten al in de oudste Marstijden gevormd zijn

(Noachien, ouder dan 3.8 miljard jaar). In aansluiting daarop suggereren recente THEMIS-resultaten (van de Amerikaanse sonde die multispectrale infraroodopnames maakt van het Marsoppervlak) dat Mars al heel lang een overwegend droge planeet moet zijn. THEMIS kijkt onder andere naar het voorkomen en de verspreiding van olivijnhoudende gesteenten. Olivijn is een veel voorkomend vulkanisch mineraal, dat relatief snel afbreekt bij aanhoudend contact met water. Er zijn inmiddels grote oppervlakken van olivijnhoudende vulkanieten, waarschijnlijk bazalten, gekarteerd (zowel in vaste als in uiteengevallen vorm). Deze gesteentes zijn gedateerd op ongeveer 3 miljard jaar oud. Dat er aan het Marsoppervlak dergelijke niet door verwerking aangetaste olivijnen voorkomen wordt daarom geïnterpreteerd als een bewijs voor een droge en koude planeet sinds die tijd.

Massatransport is het hellingafwaarts verplaatsen van sediment en/of vast gesteente onder invloed van de zwaartekracht.

Naast de al eerder genoemde vorm van glaciaal massatransport zijn vermoedelijk ook meer episodisch en catastrofaal



Afb. 15. Dit lijkt op met vulkanisch stof bedekt pakij, door de HRSC vastgelegd op de Elysium-vlakte, op slechts 5° N.Br. De foto beslaat enkele tientallen kilometers; de inslagkraters hebben een doorsnede van ongeveer 3 km. Murray et al. (2005) vermoeden dat door regionaal vulkanisme (o.a. Albor Tholus, afb. 7, ligt hier ten noorden van) veel grondwater is vrijgekomen dat zich kortstondig kon ophopen tot een meer, dat vervolgens bevroor. Het water verdween (door sublimatie, of in de vulkanische bodem weggezakt?), waardoor het pakij vastliep en dit typische pakijspatroom behouden is. Het ijs is waarschijnlijk nog aanwezig. (Foto ESA)



Afb. 16. Krater Aristarchos op de Maan. De ejectadeken wordt naar de rand toe geleidelijk dunner. (Foto NASA)

werkende processen van belang geweest voor de morfologie van het Marsoppervlak. De mogelijke rol van stromend water wordt echter in een andere bijdrage uitvoeriger toegelicht. Stel dat er het nodige (bevroren) grondwater aanwezig is in allerlei vulkaanlichamen. Zelfs oude, onder stof en/of tefra begraven, dus fossiele ijsafzettingen kunnen mogelijk zijn. Als een vulkaan actief wordt zal het water smelten, in beweging komen en zo mogelijk massaal in stromen de vulkaan-helling af komen zetten. Smelten en wegstromen is een veel gehoorde verklaring voor waargenomen geulpatronen op vul-

kaanhellingen. Voor een aards voorbeeld hoeven we maar te denken aan de beruchte ramp in de Colombiaanse Andes bij de Nevado del Ruiz, toen deze in 1985 tot uitbarsting kwam. Op de hellingen rond deze bijna 5400 m hoge vulkaan is een uitgebreid sneeuwdek aanwezig. Door een op zich niet catastrofale uitbarsting werden over dit sneeuwdek in korte tijd, maar in meerdere fasen, de nodige pyroclastica uitgestort. Sneeuw en as mengden zich. De sneeuw smolt zo snel en waterstroompjes kwamen de berg af. Deze verzamelden zich in een relatief klein drainagenetwerk. Door het sterke verval en de zwaartekracht werden de bijeenkomende waterstromen gebundeld tot een zeer krachtige en turbulente modderstroom in het bescheiden dal van de hoofdriever. Deze bulderende massa modder en stenen bedekte de op 70 km van de vulkaan gelegen, geheel argeloze stad Armero in een kwartier tijd met een modder- en puinlaag van 2-5 m dik. Deze modderstroom (of lahar) kostte 28.700 mensen het leven. In het aardse sedimentregister zijn dit soort afzettelingen bepaald niet zeldzaam en het wordt dus spannend om ze ook op Mars terug te vinden, met name in de grote geul-systemen.

De vroegere aanwezigheid van landijs wordt op satellietfoto's vooral verraden door vloeiende, langgerekte lijnen in het reliëf. Deze ontstaan doordat het afsmeltende ijs puin achterlaat, oftewel morenemateriaal. Grote, samengestelde aardse gletsjers zien er vanuit de lucht uit als witte ijsstromen, afgewisseld met donkere blokkenvelden op de contacten tussen twee van oorsprong verschillende stromen (afb. 12). In een zeer recente studie (Head et al., 2006) wordt overtuigend aangetoond dat op de huidige 37°N.Br. (op Aarde ter hoogte van het zuidelijke puntje van Spanje) gletsjers hun sporen nagelaten hebben. Op deze wijze bevestigen ze wat de astronomen reeds voorgerekend hadden, namelijk dat de scheefheid van de Mars-as tenminste 45° bedragen moet hebben op zeker moment in het Amazonian. Dit is de jongste van de drie perioden die op Mars worden onderscheiden. Vroegere glaciale activiteit is op vele plaatsen aantoonbaar. Wij kijken hierbij (afb. 13) naar de gigantische steile westelijke wand van de vulkaan Olympus Mons. De foto beslaat in N-Z richting een 180 km en omvat een reliëf met een hoogteverschil van 7 km. Van hoog naar laag valt de grote steilwand met scherp ingesneden dalen het meest op. Deze dalvorm wijst op vorming door vrijkomend smeltwater, vermoedelijk als gevolg van vulkanische activiteit. Tegelijkertijd wijzen de plaatselijk half cirkelvormige steilwanden op een ontstaan door glaciale erosie (kaarvorming). Naar onderen komen de 'stroomdal' uit in gladdere en minder steile hellingen, die ongetwijfeld relatief fijnkorrelige

sedimentwaaiers zijn. Deze waaiers lijken verder hellingafwaarts een ruwere topografie af te dekken die relict afzettingen van gletsjers en puin kunnen zijn (piedmont gletsjer). Er zijn geen kraters op te ontdekken, dus ze moeten relatief jong zijn. Het vlakke reliëf met boogvormige richels zijn wellicht oude lavadekken. Plaatselijk zijn er instortingen van holtes te zien.

Een bijzondere HRSC-opname (afb. 14) is die van de oost-rand van de Hellas-laagvlakte. We zien vanaf de beschaduwde bergflank op de achtergrond langgerekte lijnen, die vanuit

Afb. 17. Meteorite Crater, Arizona. Deze zeer goed bewaarde inslagkrater ontstond 50.000 jaar geleden door de explosieve inslag van een nikkelijzer-meteoriet van naar schatting 50 m doorsnede en een massa van 300.000 ton. Dankzij betrekkelijk weinig erosie is de kraterrand van ca. 50 m hoogte goed bewaard gebleven. De krater heeft een diameter van 1.5 km en is bijna 200 m diep. De vlakte rond de inslag lag bezaaid met fragmenten van meteorietijzer, waarvan er 30 ton verzameld is. In het kratercentrum zijn sedimentresten aanwezig van een Pleistoceen kratermeer (over wisselen de klimaten gesproken.....). (Foto ARF).



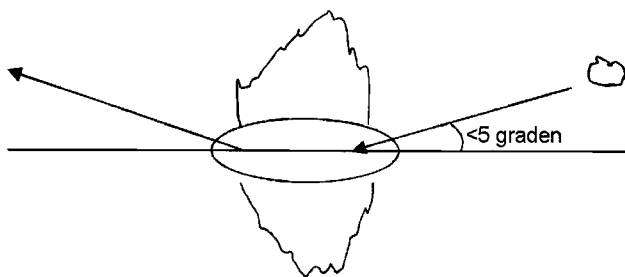
verschillende dalsegmenten bijeenkomen in het nauwste gedeelte. Dit wijst op de aanwezigheid van achtergelaten gletsjerpuin. Deze morenes laten zich nog verder omhoog vervolgen naar een U-vormig, oplopend dal (dicht onder de kleine krater op de rand van de foto). Het fijngestreepte dal-reliëf daar lijkt sterk op het gedrag van gletsjerijs op plekken met steile hellingen, omdat het ijs daar sneller stroomt en de gletsjer uit elkaar getrokken wordt. Verder naar beneden verzamelt het morenemateriaal zich in een kleinere, maar toch

9 km brede inslagkrater, die volledig opgevuld is. De gletsjers zijn vervolgens opgerukt naar een 500 m lager gelegen en twee maal grotere krater, die daarna ook grotendeels opgevuld is met gletsjerpuin. De rondlopende ruggen onder deze kraterrand zijn ongetwijfeld eindmorenes.

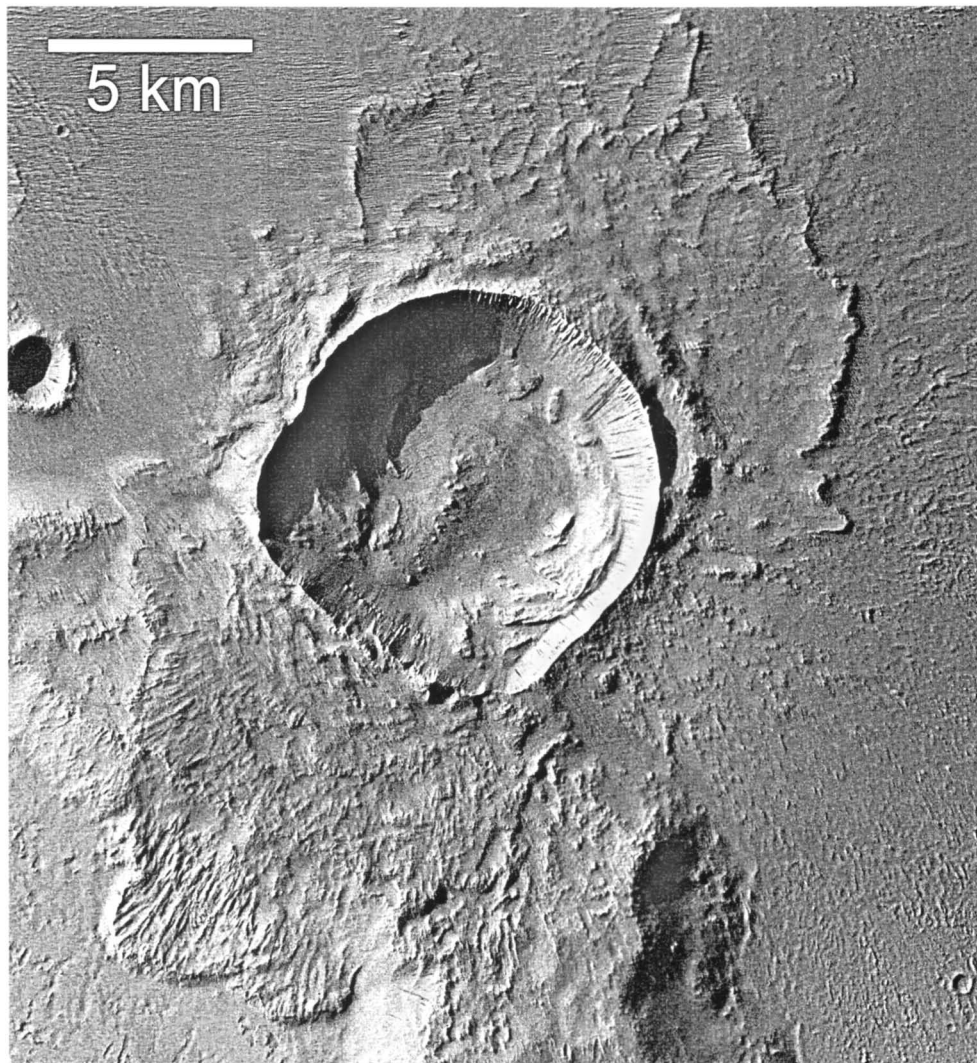
“Was er ooit pakijs?” Deze vraag kwam op bij John Murray en co-auteurs (Nature, 2005) bij het zien van terrein met de contouren van gebroken glas (afb. 15). De ‘scherven’ variëren



Afb. 18. Een ellipsvormige krater op Hesperia Planis (25 x 12 km). Zowel deze krater als de cirkelvormige in de omgeving vertonen een steile ejectarand. De ejecta van de elliptische krater laten twee vlinder-'lobben' zien. Die zouden veroorzaakt kunnen zijn doordat de inslaande meteoriet uit twee delen bestond, die vlak na elkaar onder een kleine hoek zijn ingeslagen. De vlinder rechtsonder lijkt de andere linksboven te overlappen, dus de richting van inslag zou van linksboven gekomen kunnen zijn. Maar als je goed kijkt, dan ligt er naar rechtsonder een cirkelvormige 'plak', waarvan de randen precies samenvallen met de onderste vlinder. Deze 'plak' is vermoedelijk het restant van een veel oudere krater, en beïnvloedde de vorm van de vlinders. Dat laat zien dat je niet te snel een conclusie moet trekken. (Foto ESA)



Afb. 19. Tekening van de vlinderstructuur, zoals bij afb. 18 beschreven. (Tekening J. Smit)



Afb. 20. Voorbeeld van een ejectadeken, waarbij een vlindervormige ejectadeken is gevormd als gevolg van een inslag onder een hoek kleiner dan 45° (Medusa Fossae). (HRSC-opname, foto ESA)

qua afmetingen van 30 m tot 30 km, in een patroon dat sterk aan ijsschotsen in zee doet denken. Bij nadere bestudering en vergelijking met aards pakij, blijkt het naar alle waarschijnlijkheid om ijsvorming in een voormalig meer te gaan, dat een afmeting had van 800 x 900 km. Het was gelegen aan de zuidelijke rand van Elysium Planitium, dicht bij de Mars-equator. Het meer zou maar kort bestaan kunnen hebben, gevoed door uitstromend water, dat waarschijnlijk gegenereerd werd door regionaal vulkanisme. Op basis van kraterdatering zou het 5 ± 2 miljoen jaar geleden in bevroren toestand geraakt zijn. Het peil in het meer moet vervolgens snel gedaald zijn, waardoor het pakij strandde en fossiliseerde, omdat het sindsdien met stof overdekt is geraakt. Als het ijs niet relatief snel bedekt zou zijn geraakt zou het ijs door sublimatie in de ijle Marsatmosfeer moeten zijn opgenomen. De auteurs merken op dat als er primitief leven op Mars

aanwezig is, deze geïnterpreteerde jonge ijsresten in principe in aanmerking komen om sporen van leven te bevatten.

Inslagkraters

In tegenstelling tot de kraters op de Maan, zijn er veel meer verschijningsvormen van inslagkraters op Mars. Dit heeft o.a. te maken met het type ondergrond waar de inslag plaatsvond en de hoek van de inslag met de Marsoppervlakte.

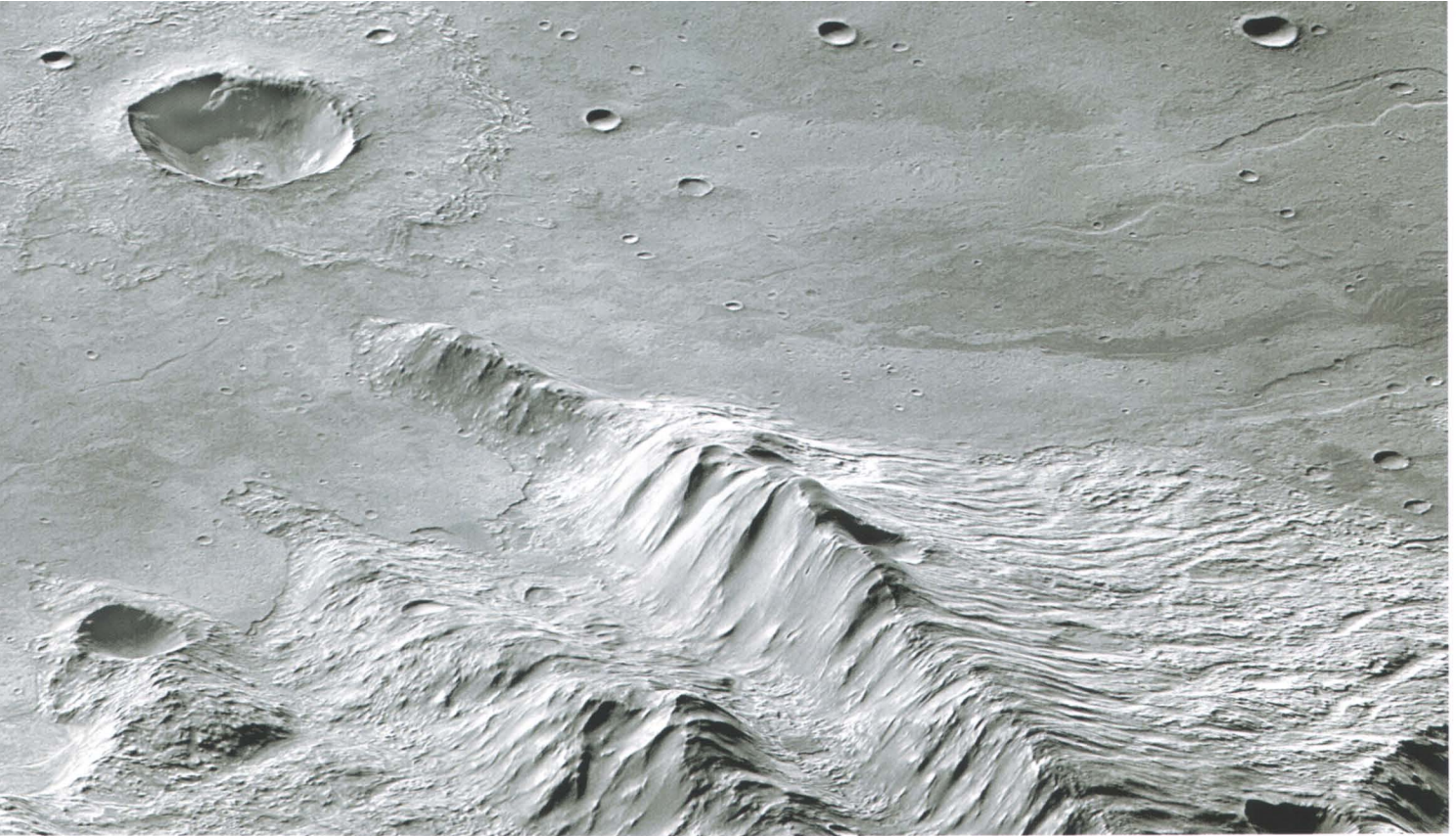
De belangrijkste oorzaak voor de verschillende vormen is de mate van erosie en afbraak van de krater, en de latere opvullingen door vulkanische tefra.

Op de Maan vindt vrijwel geen erosie plaats (een beetje door de zonnewind), en alle jongere kraters (d.w.z. jonger dan ca. 4 miljard jaar geleden) hebben nog hun oorspronkelijke vorm (afb. 16). Op Aarde zijn alle kraters geërodeerd; maar een kleine 200 zijn min of meer nog herkenbaar. Het aantal als zodanig herkenbare kraters is dus maar een fractie van de meer dan 5000 te verwachten kraters met een diameter van 10 km of meer en een ouderdom van minder dan 500 miljoen jaar. Een gunstige uitzondering vormt Meteorite Crater in Arizona, die ca. 50.000 jaar geleden gevormd werd in een semi-aride klimaat en daardoor tot op de huidige dag de krater vorm goed heeft kunnen bewaren (afb. 17). Mars neemt in vergelijking met Aarde en Maan een soort tussenpositie in. Omdat er in de vroegste geschiedenis van Mars water is geweest en landschappen ingrijpend zijn veranderd door stromend water zullen meteorietkraters mogelijk half in water zijn ontstaan, of met water zijn gevuld geweest en deels opgevuld.

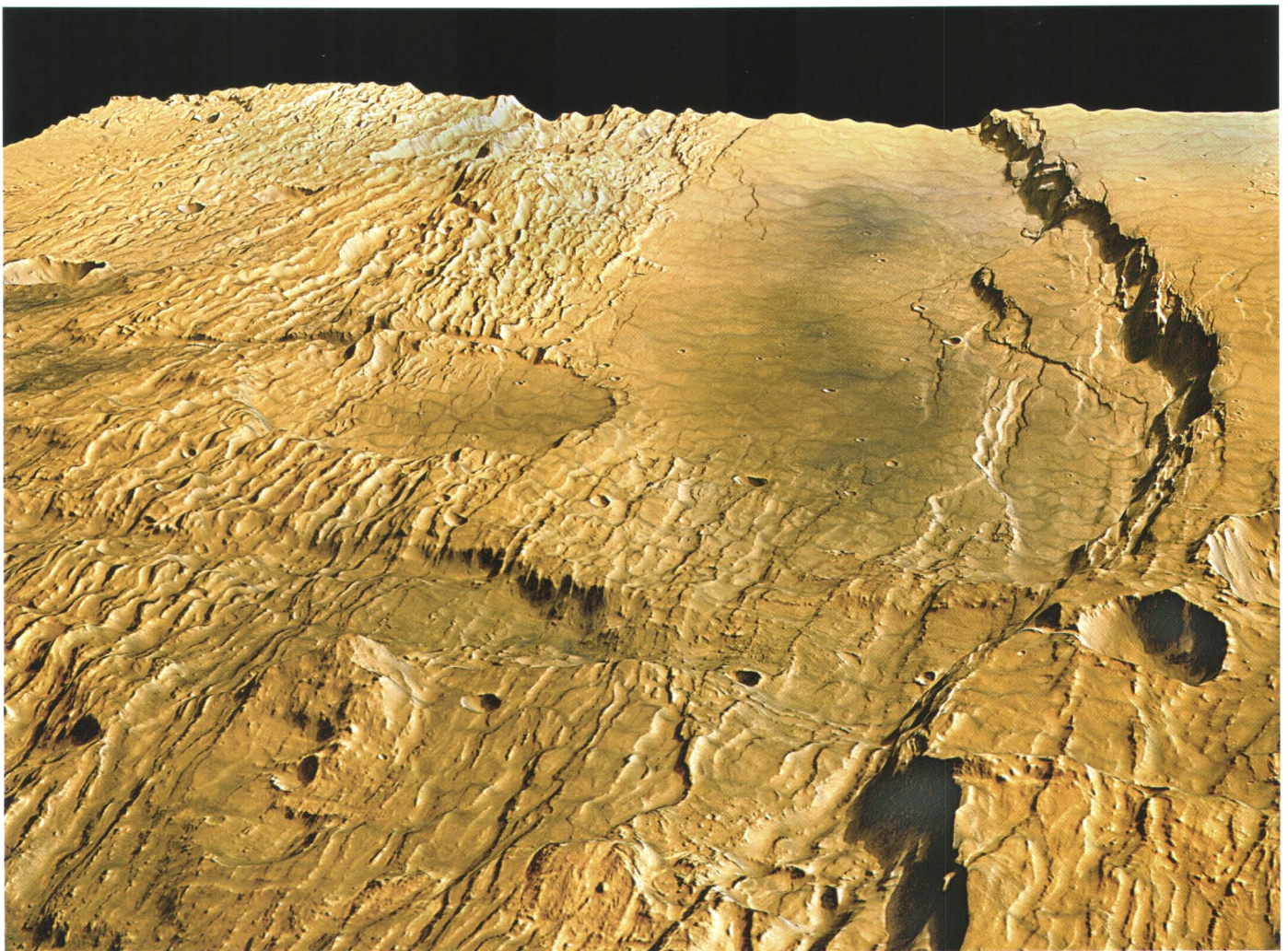
Op afb. 18 is een ovale krater te zien. De inslaghoek moet minder dan 5° geweest zijn (afb. 19), want minder dan 1% van alle kraters heeft een langgerekte vorm. Opvallend is, dat bij een aantal van die ellipsvormige kraters te zien is dat de ejectadeken een vorm heeft die

wel vlindervorm wordt genoemd: de ejectadeken staat dwars op de richting van inslag (afb. 20). Er is een soort *forbidden zone* waar die deken niet aanwezig is. Dat is wel te begrijpen voor de richting waar de inslag vandaan kwam, maar lijkt minder logisch de andere richting op. Je zou verwachten dat de inslag het ejectamateriaal naar voren stuwt en er dus in die richting meer materiaal moet terechtkomen, maar dat blijkt juist niet het geval.

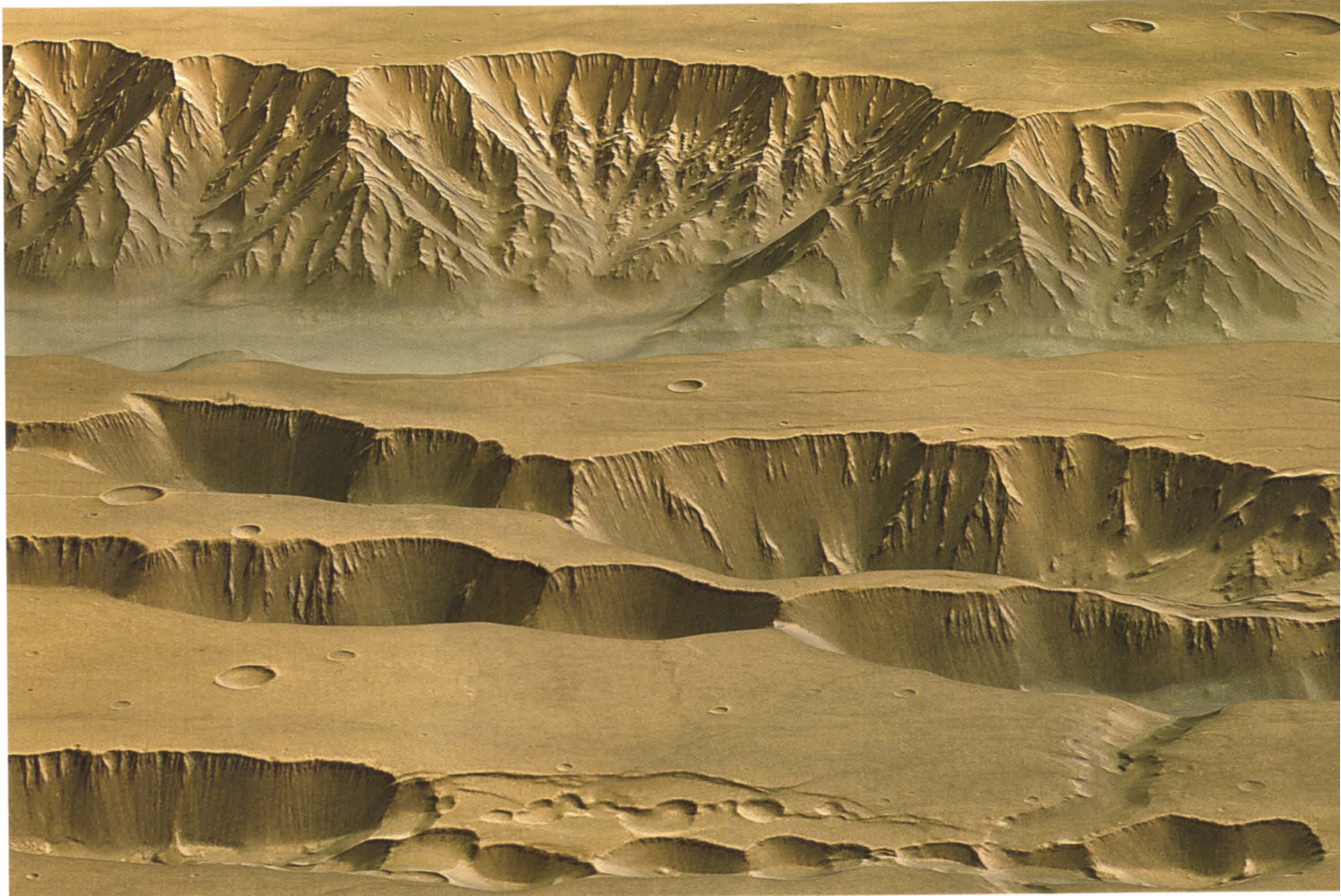
Op de afbeeldingen 20 en 21 is de ejectadeken goed te zien. Daarbij valt op dat deze een opstaande, hoge rand heeft. Geen enkele Maankrater heeft een dergelijke rand, dus de aanwezigheid ervan moet iets te maken hebben met de eigenschappen van de ondergrond. Maar niet in alle gebieden van Mars hebben de ejectadekens een duidelijke rand, zoals bijvoorbeeld de oude, met kraters bezaaide gebieden. Wat heeft dat dan te betekenen? De verklaring is dat de



Afb. 21. Voorbeeld van een inslagkrater met een duidelijk opstaande kraterrand en een goed ontwikkelde, gelobde ejectadeken (Claritas Fossae). Dit type ejectadeken wijst op inslag in een medium dat waterhoudend is. (Foto ESA)



Afb. 22. De slenkstructuur van Claritas Fossae. De opname is een perspectivische bewerking van een digitaal terreinmodel op basis van de stereokanalen in de HRSC en beslaat een enorm terrein: 150 km breed op de voorgrond en 550 km op de achtergrond. Het bijna 100 km brede slenkgebied is opvallend glad, mogelijk door lavabedekking. De grote oostelijke breukrand maakt een reliëfsprong van ruim 2000 m. Een oude 50 km brede inslagkrater is aanwezig links van het midden van de foto; de breuken lopen er deels gewoon doorheen, deels lijken ze bedekt door jonger materiaal. (Foto ESA)



Afb. 23. Een perspectivische bewerking van het horst- en slenksysteem van Coprates Chasma. De hoofdslenk op de achtergrond, ongeveer 60 tot 100 km breed, wordt hier amper getoond. Deze ligt wel 8 km beneden de begrenzende vlaktes, een bijna onvoorstelbaar hoogteverschil voor Aardbewoners. De steile wanden vertonen weinig tekening. Op Aarde zouden we – in analogie aan wat onze grootste riviercanyons tonen – verwachten dat de sedimentaire bedekking naar beneden zou overgaan in Precambriese gneizen. Een dergelijke geologische tweedeling lijkt hier afwezig, zoals ook eigenlijk wel te verwachten is bij een planeet zonder grootschalige deformatiefases. (Foto ESA)

ondergrond van Mars veel water in bevroren toestand bevat. Dat grondijs wordt vloeibaar bij een inslag en mengt zich dan ogenblikkelijk met de andere ejecta. Hierdoor ontstaat er een brij van materiaal, dat zichzelf tijdelijk 'drijvend' kan houden door de smering van het water in deze dynamische setting. Maar als het water er gaandeweg wordt uitgeperst, wordt er op een gegeven moment een kritische grens bereikt waarbij de eigenschappen plotseling veranderen. Dan haken plots alle gesteentefragmenten in elkaar, en neemt de onderlinge wrijving plotseling enorm toe. Hierdoor komt de ejectadeken, die nog in beweging is, plotseling tot stilstand, het eerst aan de rand. Het materiaal erachter gaat nog even door, maar stopt aan dezelfde rand.

Op de grote vulkanen zit kennelijk weinig ijs in de grond, en de inslagkraters op droge vulkaanhellingen vertonen deze ejectarand ook niet. Bij inslagen op Aarde op plekken waar veel grondwater aanwezig is, kunnen we hetzelfde verwachten. Dat lijkt bevestigd te worden door de vorm van de ejectadeken van de Chicxulub-inslag in Mexico, die veel organismen, waaronder de dinosauriërs, de das heeft omgedaan. De ejectadeken is op de grens van Belize en Mexico (Yucatan) nog 60 m dik, maar even verderop minder dan een meter. Adriana Ocampo van JPL in Pasadena (een promovendus van JS, die bij ESA in Noordwijk jaren aan de Mars Express gewerkt heeft) vergelijkt momenteel de Chicxulub-krater met de gerande krater-ejecta van Mars.

Op de curieuze afb. 18 is nog veel meer te zien. De krater-rand en vulkaanhelling zijn namelijk doorbroken door een

flink dal. Er moet dus ooit water uit de vulkaankrater gestroomd zijn. Misschien is er ijs gesmolten door de nabije inslag en is dit water vanuit de caldera in de elliptische inslagkrater gestroomd. Deze krater is in elk geval duidelijk gevuld met sediment dat uit de veel hogere vulkaan afkomstig is. Een andere verklaring is, dat latere vulkanische activiteit gesmolten ijs in water heeft omgezet, dat vervolgens uit het kratermeer gestroomd is in de inslagkrater. Door het rustige, bijna meanderende, karakter van het dal is het laatste waarschijnlijker.

Deze elliptische krater is ook curieus vanwege een vlinder-ejectavorm met randen. Door de verdeling van kraters met een ejectarand op Mars te bestuderen zou je dus kunnen zien waar water(ijs) in de grond zit (of heeft gezeten). Andere kraters hebben een meer geleidelijk dunner wordende ejectadekenrand, zoals je dat overal op onze Maan ziet (afb. 16); de ondergrond zal daar zeker droog geweest zijn.

Breuken in de Marskorst

Een foto die zeer overtuigend het bestaan van grote breuken aantoonst is afb. 22. Deze perspectivische opname is van Claritas Fossae, een bijna noord-zuid verlopend slenkgebied van ruim 1500 km lengte, gelegen ten zuiden van de grote schildvulkanen die de Tharsis-bergen vormen. We kijken in noordelijke richting. De oostelijke breukwand valt het meest op. Deze scheidt een wat minder versneden slenkdal van talloze kleinere parallel verlopende breuken naar de westelijke



Afb. 24. Een bijna Marsachtig aspect vertoont het oostelijke uiteinde van de Grand Canyon. De combinatie daar van grote steilwanden, hoogvlakte (Painted Desert) en tafelbergen aan de einder, doet aan de voorgaande afb. 23 denken. (Foto ARF)

NW-Europa hun ontstaan aan de rifting die leidde tot de opening van de noordelijke Atlantische Oceaan.

Het ziet er in Valles Marineris echter niet zonder meer naar uit dat daar een analoog van *sea-floor-spreading* heeft plaatsgevonden.

Valles Marineris lijkt al enkele miljarden jaren geleden te zijn 'opengetrokken', mogelijk gekoppeld aan het opkomen van de grote Tharsis-vulkanen.

Een onderdeel van Valles Marineris is Coprates Chasma. De perspectivische bewerking (afb. 23) toont de hoofdslenk op de achtergrond. Deze is tussen de 60 en 100 km breed, daarmee de grootste Aardse valleien een orde van grootte overtreffend. Op de voorgrond zijn nog wat kleinere slenken te zien. Deze zijn echter ook nog tussen de 5 en 22 km breed en tot 5 km diep. Het is spannend wat er voor gesteenten in deze diepe slenken aanwezig zijn. Sommige onderzoeksgroepen gaan ervan uit dat er in oude tijden water in heeft gestaan. OMEGA spectraalanalyses wijzen in elk geval op de aanwezigheid van gips en kieseriet (calcium- en magnesiumsulfaat met daaraan gebonden kristalwater). Anderen suggereren weer dat aan vulkanisme gekoppelde geochemische reacties dit soort voorkomens ook zouden kunnen verklaren. Het wordt tijd dat er echt veldwerk gedaan wordt en de eerste Marsreizigers adembenemende beschrijvingen van landschap en geologie doorgeven.

Een van de meest Marsachtige reliëfbeelden op Aarde is mogelijk de oostelijke uitgang van de Grand Canyon, waar de bezoeker aankijkt tegen een kolossale steilwand in de Paleozoïsche formaties, met daarachter de *Painted Desert*, een zijklouw en in de verte tafelbergen met Trias-sedimenten (afb. 24).

kant. In meer detail bekeken blijken er ook talloze kleinere dwarsbreuken. Op Aarde komen vergelijkbare structuren voor. Bekende slenken zijn de Rijndal Slenk (met zijn naar het NW gerichte uitloper, de Brabantse Roerdal Slenk, nog steeds tektonisch actief) en de Jordaan Slenk. Horst-slenk-systemen zijn het gevolg van rek in de korst. Waarom dat hier aanwezig is, is ons niet helemaal duidelijk, maar zou verband kunnen houden met de enorme opwarming die ten grondslag gelegen moet hebben aan de 8-10 km hoge Tharsis-vulkanen. De kaart van Mars laat zien dat dit breuksysteem een scheiding vormt tussen een vulkanische hoogvlakte in het oosten (Solis Planum) en een idem lagere vlakte in het westen, Daedalia Planum. Solis Planum breekt naar het noorden op door de aanwezigheid van de gigantische Valles Marineris, die met zijn lengte van 4000 km en diepte tot bijna 10 km de grootste slenk op Mars is. Er zijn dus op Mars tenminste enkele door breukzones begrensde korstblokken. We weten van de grote aardse slenkzones dat grote slenkssystemen (ook wel riftzones genoemd) verband houden met plaattektoniek. Zo danken de slenkssystemen van

Literatuur

- Head, J.W., Marchant, D.R., Agnew, M.C., Fassett, C.I. en Kreslavsky, M.A., 2006. Extensive valley glacier deposits in the northern mid-latitudes of Mars: Evidence for Late Amazonian obliquity-driven climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 663-671.
- Malin, M.C. en Edgett, K.S., 2000. Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, 288: 2330-2335.
- Murray, J., Muller, J.P., Neukum, G., Werner, S., van Gasselt, S., Hauber, E., Markiewicz, W., Head, J.W., Foing, B., Page, D., Mitchell, K. L., Portyankina, G. en HRSC Co-Investigator Team, 2005. Evidence for a frozen sea close to Mars' equator. *Nature*, 434: 352-355.
- Neukum, G., Jaumann, R., Hoffmann, H., Hauber, E., Head J. W., Basilevsky, A. T., Ivanov, B. A., Werner, S. C., van Gasselt, S., Murray, J. B., McCord, T. en het HRSC Co-investigator team (2004) Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera. *Nature*, 432: 971-979.