

Zwaan, P.C. & G. Kortenbout van der Sluys, 1971: Vivianite crystals from Haren, Noord-Brabant Province, The Netherlands, Scripta Geol., 6, 1-17.

### Verklarende woordenlijst

**Collaps:** Het uitelkaar vallen van een kristalrooster, veelal gevolgd door een hernieuwde ordening van de atomen in het kristalrooster.

**Dimorf:** Mineralen met een identieke chemische opbouw kunnen in kristallografisch opzicht verschillen (Polymorf). Dimorfe soorten kristalliseren in twee kristal-systemen.

**DTA:** Differential Thermal Analysis, een thermische analyse methode. Energie-opname en afgifte (endo- en exothermen) door fluctuaties van de temperatuur van het te onderzoeken object.

**Elementaircel:** De basis-bouwsteen van kristallijne stoffen waarin alle symmetrie kenmerken aanwezig zijn. Vanuit deze bouwsteen kunnen diverse kristalroosters worden opgebouwd.

**Hydrothermaal:** uit waterige oplossingen ontstane afzettingen. De afzetting en kristallisatie vindt bij lage temperatuur plaats.

**Idiomorf:** Een nagenoeg geheel vrij uitgegroeid goed ontwikkeld kristal, voldoende ruimte tijdens de groei is hiervoor een vereiste.

**Isotypie:** De plaats van de atomen in het kristalrooster kan worden ingenomen door 'vreemde' atomen. Dit kan in zeer geringe mate zijn (sporen), maar ook zodanig dat er mengreeksen ontstaan. Structuur van het kristalrooster en de atomen onderling vertonen bepaalde overeenkomsten.

**Monokliene stelsel:** De kristallografische assen (A,B en C) zijn ongelijk van lengte;  $A \neq B \neq C$ , de hoek tussen de assen B en C geen  $90^\circ$ ;  $\beta \neq 90^\circ$ .

**Mössbauer:** Spectroscopie: (nuclear gamma resonance), analyses van radio-actieve isotopen, enigszins vergelijkbaar met infrarood-spectroscopie.

**Oktaëdrisch:** Kristalvorm die bestaat uit twee met het grondvlak tegen

elkaar liggende pyramides, waarbij het grondvlak een vierzijdige omtrek heeft.

**Partiële oxydatie:** Stof die reageert met zuurstof (oxydatie) waarbij een gedeelte niet zuurstof reageert.

**Röntgen-diffractie:** Met behulp van Röntgenstralen kunnen kristalvlakken en de onderlinge afstanden (d) worden bepaald door breking van de Röntgenstralen. In een speciale camera kunnen de gebroken stralen vastgelegd worden. Op de film ontstaan lichtgebogen lijnen met verschillende afstanden en intensiteiten. Deze geven informatie over de kristalstructuur.

**SEM:** Scanning Electron Microscopy

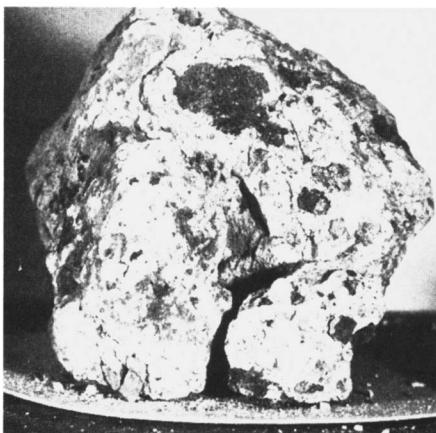
**Tetraëdrisch:** Een vorm die bestaat uit vier (gelijkzijdige) driehoeken, die samen een viervlak vormen.

**Trikliene stelsel:** kristalstelsel met zeer geringe symmetriekenmerken. Lengten van de assen:  $A \neq B \neq C$ , geen enkele hoek die de assen met elkaar maken is  $90^\circ$ .

# Ouderdomsbepalingen van Maanstenen

Dr. J. van Diggelen

**Alle astronomen waren het er roerend over eens: de Maan moest zeer oud zijn. Nog voor er ooit een landing op de Maan had plaatsgevonden, was men daarvan overtuigd. Het onveranderlijk en oud uitziende krateroppervlak van onze satelliet was er een duidelijk bewijs voor. Nadat astronauten en onbemande ruimtevaartuigen gesteenten van de Maan naar de Aarde hadden gebracht, was het mogelijk hier absolute ouderdomsbepalingen aan te doen. Op die manier kon er eindelijk een antwoord gegeven worden op de vraag hoe oud de Maan nu eigenlijk wel was.**



Volgens tegenwoordig algemeen aanvaarde gegevens is ons Zonnestelsel, inclusief Aarde en Maan, bijna 4,6 miljard jaar oud. Op de Maan hoopte men gesteente van bijna deze ouderdom te vinden. Zo vonden de astronauten Conrad en Bean van de Apollo 12 bijvoorbeeld de slechts acht cm grote

**De door de Apollo 17 meegebrachte Maanbreksie 79 135 vertoont een donkere matrix die zeer broos is met allerlei barsten en insluitels. Dergelijke breksies bevatten soms zeer oude insluitels.**

steen, genummerd 12013, waarvan later is vastgesteld dat deze sterk radioactief is. Ook de chemische samenstelling wijkt sterk af. De steen bevat 20 keer zoveel uranium, thorium en kalium als andere stenen van de Maan. De kleur van de steen is wit en hij weegt 83 gram. Er zijn aanwijzingen, dat hij echter niet afkomstig is uit het gebied waar hij is gevonden, dat Oceanus Procellarum genoemd wordt.

Uit de rubidium-strontiumverhouding volgt dat de steen 4 miljard jaar geleden kristalliseerde. De steen is destijds

de 'Genesissteen' genoemd. Het is echter allerm minst een extreem oude steen.

## Gesmolten gesteenten

De moderne radio-actieve dateringsmethoden berusten op het volgende proces. In een gesmolten gesteentemassa bevinden zich behalve stabiele, ook onstabiele radio-actieve elementen. Zo'n smelt begint af te koelen en dan te kristalliseren. Dan vormen zich allerlei mineralen en in sommige daarvan komen ook radio-actieve elementen terecht.

Zodra het gesteente volledig is gestold, wordt het vervalproces van de radio-actieve elementen meetbaar.

Directe metingen van de hoeveelheid radio-actief materiaal of een vervalproduct ervan, die na een zekere tijd in een gesteente of mineraal aanwezig is, kunnen het tijdstip van de kristallisatie van het gesteente vastleggen.

Aangenomen wordt, dat korte tijd na het ontstaan van de Maan een groot deel van het Maangesteente gesmolten is. De mineralogische samenstelling veranderde hierdoor sterk. Het is daarom niet mogelijk het tijdstip van het ontstaan van de Maan zelf met behulp van radio-actieve processen te dateren. Met moment van het stollen en van het einde van de chemische veranderingen is echter wel vast te stellen.

Omdat er verschillende radio-actieve processen voorkomen, kan men in sommige gevallen met meer dan één methode ouderdomsbepalingen uitvoeren. Kloppen de uitkomsten hiervan binnen de te verwachten foutmarge, dan spreekt men van concordante resultaten. Uitgezet in een grafiek liggen de meetpunten dan op een concordialijn. Vaak is dit echter niet het geval en dan worden de resultaten discordant genoemd.

Enkele van de meest gebruikte absolute dateringsmethoden zijn de kalium-argonmethode, de rubidium-strontiummethode en de uranium- en thorium-loodmethode.

## Dateringsmethoden

Kalium is een element dat in de Maankorst vrij veel voorkomt, al is het op de Maan heel wat minder dan op Aarde. Een zeer klein deel van de kaliumatomen (iets meer dan 0,01%) is het radio-actieve kalium-40, dat tot argon-40 vervalft. Een probleem bij deze methode is, dat het geproduceerde argon (een edelgas) door diffusie uit het gesteente kan verdwijnen. Soms was

er ook tijdens de kristallisatie al argon-40 in het kristalrooster ingesloten. Dit is afkomstig van eerder vervallen kalium-40 dat in de smelt ontstond voordat het gesteente stold. Ook kan deze argon-40 afkomstig zijn uit ouder gesteente dat mee is gesmolten. Door deze processen kunnen dan te hoge ouderdommen worden gemeten.

Bij de tweede methode wordt uitgegaan van rubidium. Dit element bestaat voor meer dan een kwart uit het radio-actieve isotoop rubidium-87. Dit element vervalft met een halveringstijd van 48,8 miljard jaar tot strontium-87. De halveringstijd is de tijd die verlopen is als de helft van de hoeveelheid atomen van rubidium-87 is vervallen. Rubidium komt niet in mineraalvorm in de natuur voor, maar wel in het kristalrooster van sommige kaliummineralen. Hierin is een deel van het aantal kaliumatomen dan door rubidium vervangen.

Ook hier is de moeilijkheid dat er al strontium-87 in het gesteente aanwezig was toen het vervalproces begon. Het aantal strontiumatomen dat is ontstaan, is alleen vast te stellen door correcties toe te passen. Dat wordt gedaan met behulp van het mineraal plagioklaas, waarin geen rubidium-87 opgesloten zit. De hoeveelheden rubidium-87 en strontium-87 worden gemeten ten opzichte van het isotoop strontium-86. Hun verhouding wordt in een grafiek uitgezet. Als de verhoudingen

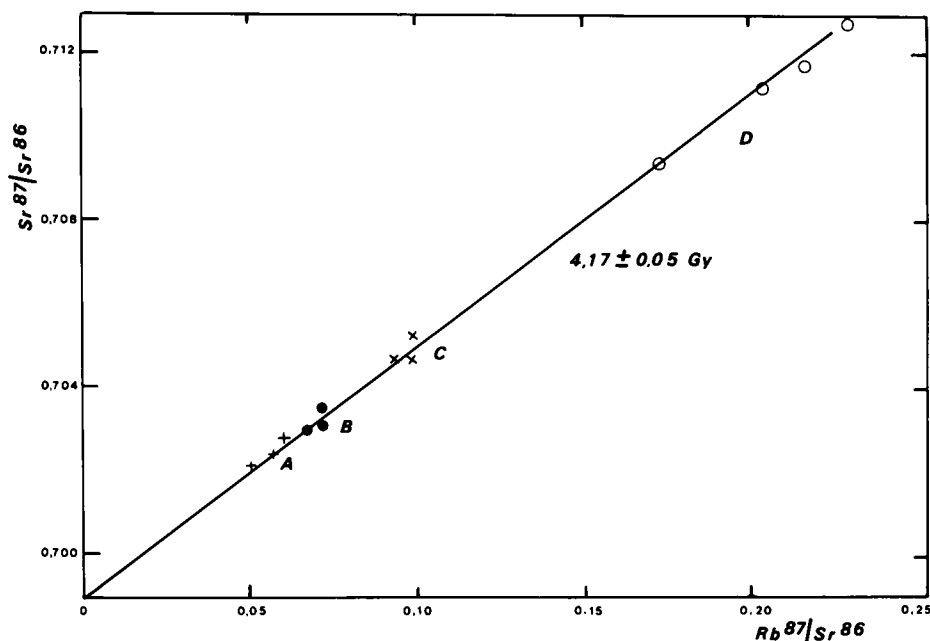
van verschillende mineralen uit dezelfde steen tegen elkaar worden uitgezet, dan wordt een rechte lijn verkregen (isochroon). Uit de helling van die lijn kan dan de ouderdom van de steen worden bepaald.

De derde methode berust op het verval van uranium-238 en 235 en van thorium-232 tot lood.

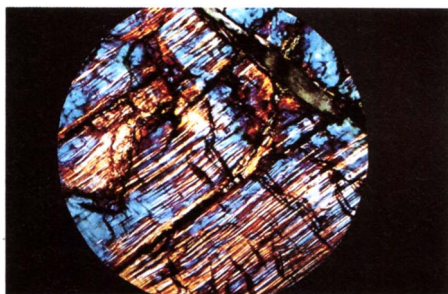
Bij het vervalproces van uranium-238 ontstaat lood-206. Bij dat van uranium-235 ontstaat lood-207 en uit thorium-232 ontstaat lood-208.

## Halo's

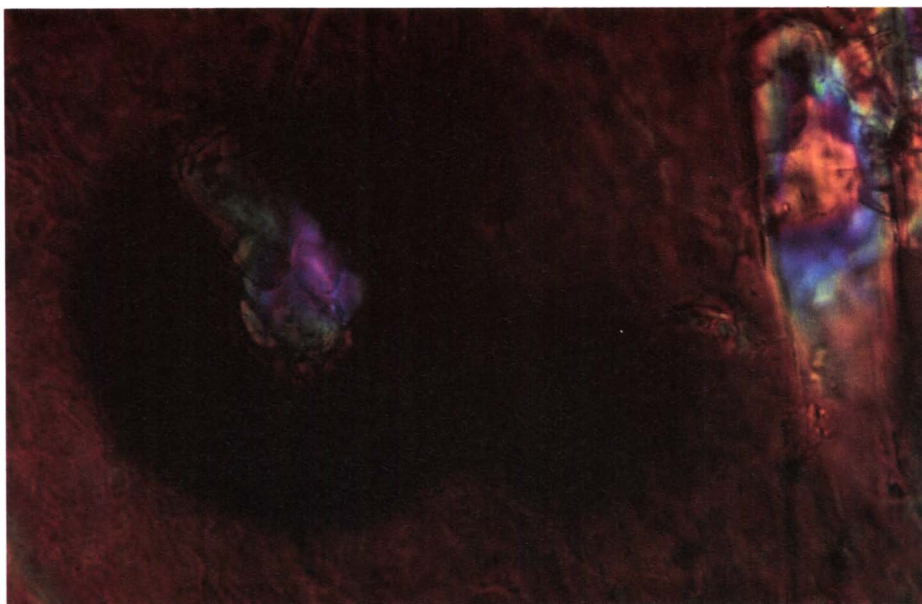
In slijpplaatjes van Aardse granieten is dit laatste vervalproces mooi te zien aan de zogenoemde pleochroïtische halo's in het mineraal biotiet. Hierin zien we soms zirkoonkristalletjes die in het omringende materiaal een beschadiging van het kristalrooster veroorzaken door de straling die zij uitzenden. Het zirkootje en het omringende bestraalde gesteente is onder de polarisatiemicroscopie te zien als een veelkleurige halo. Niet de grootte, maar de intensiteit ervan is een maat voor de ouderdom van het gesteente. Dit komt omdat de pleochroïtische halo's om zirkoonkristalletjes ontstaan door het stapsgewijs optreden van uraniumvervalprocessen. Het gastmineraal dat het zirkootje bevat, wordt door continue bestraling met alfadeeltjes zo beschadigd dat verkleuringen optreden. De halo is opgebouwd uit bolschillen waarvan elke schil overeenkomt met



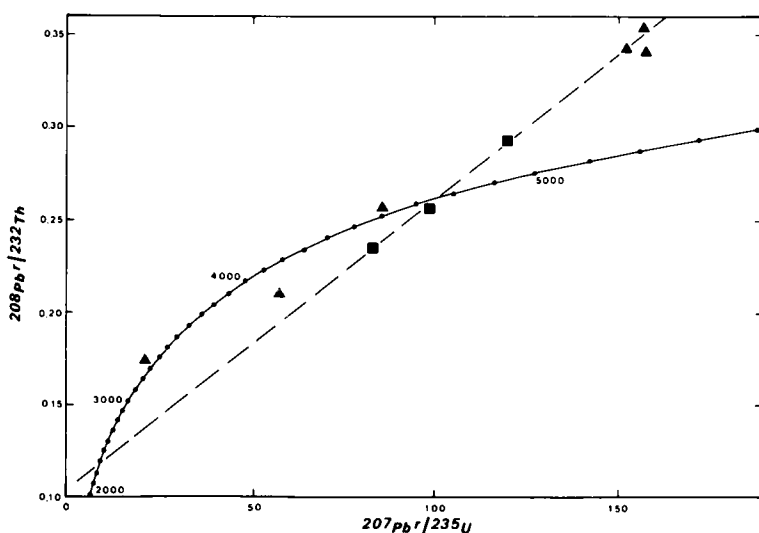
In deze isochroon is de hoeveelheid van het chemische element strontium-87 uitgezet voor verschillende mineralen van Maansteen 72 255, meegebracht door de Apollo 17 tegen de hoeveelheid rubidium-87. Rubidium-87 is een element dat radio-actief vervalft en daarbij strontium-87 produceert. Hoe meer rubidium een van de mineralen bevatte, hoe meer strontium er uit is ontstaan. Daarom liggen de meetpunten ook op een rechte lijn. De helling van die lijn is een maat voor de ouderdom van de steen (4,17 miljard jaar).



Reusachtige inslagen kunnen de structuur van de mineralen drastisch wijzigen. Men noemt dat schokmetamorfe omzettingen waardoor in dit pyroxeen het streepjespatroon is ontstaan. Uit de gevormde structuur is de schokdruk van de inslag af te leiden. Bij zeer hevige inslagen ontstaat er ook glas, zoals het oranje gekleurde glas dat de Apollo 17 aantroef.



Onder een polarisatiemicroscopie tonen de ronde vlekjes in de biotiet een kleurenpatroon dat pleochroïtische halo genoemd wordt. Deze is ontstaan doordat de radio-actieve straling van het zirkoon de omgeving beschadigde.



Een concordia-discordia-diagram van een aantal Maanstenen verzameld tijdens de Apollo 14 expeditie. Als men de hoeveelheid lood-206 uitzet tegen de hoeveelheid lood-207 in die stenen zou men een isochroon moeten krijgen. Sommige stenen volgen echter die rechte lijn niet, maar een gebogen lijn, de discordialijn. Dit komt omdat er na reusachtige inslagen rekristallisatie van de gevormde breksies plaatsvond. Dit ging gepaard met loodverlies. Uit het snijpunt van de rechte lijn (de concordialijn) met de discordialijn, is het tijdstip van de rekristallisatie te bepalen.

een bepaald soort energetische deeltjes die voornamelijk aan het einde van hun traject ('dracht') werkzaam zijn. Zowel in zeer oude als in jonge stenen zijn die halo's even groot en dat wijst erop dat de snelheid van het vervalproces bij deze processen in de loop van miljarden jaren niet veranderd is. De halo is alleen in intensiteit toegenomen.

### Concordia- en discordiagrafieken

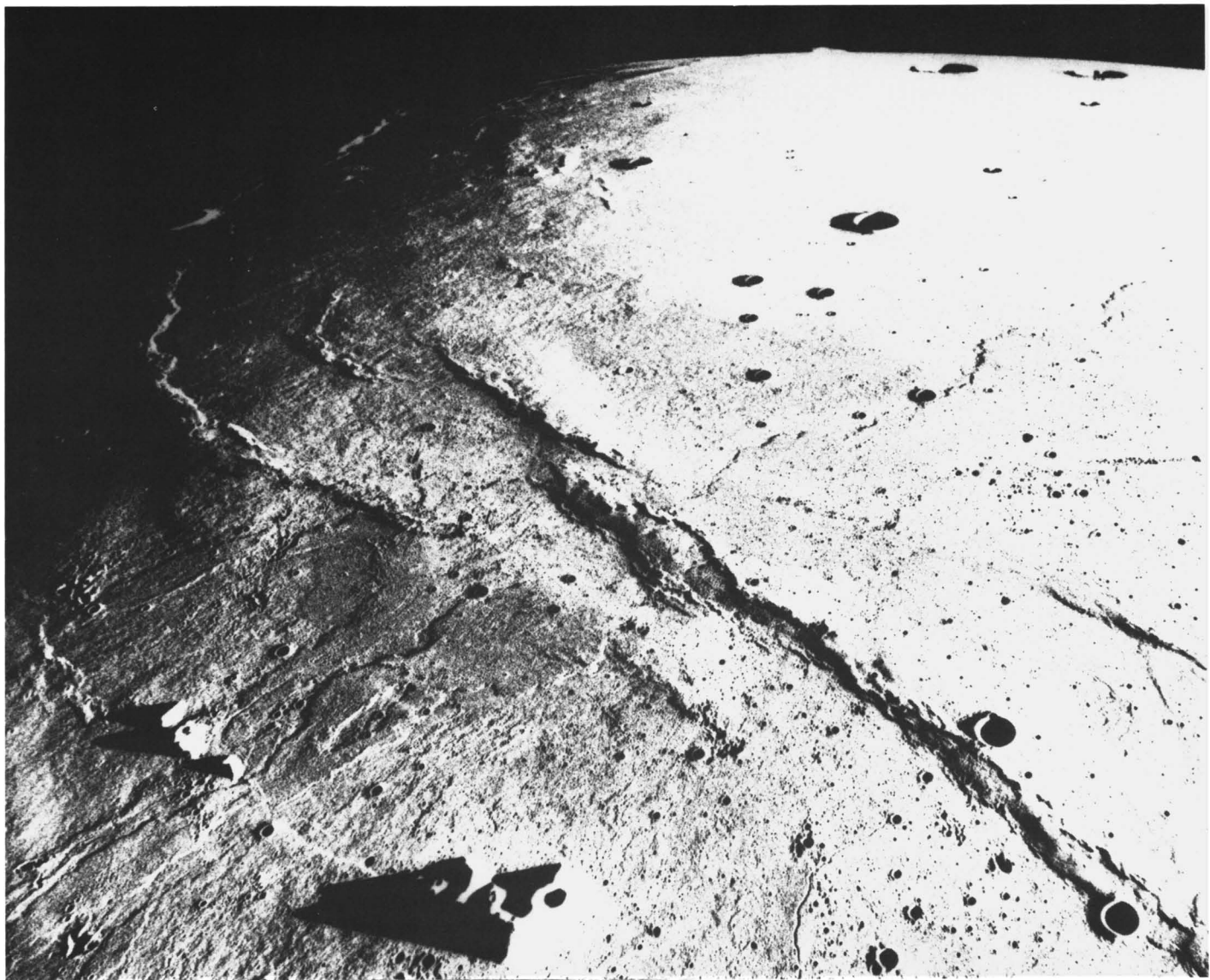
In sommige gevallen kan de ouderdom van een mineraal worden be-

paald uit drie verschillende verhoudingen: lood-207/lood-206, uranium-235/lood-207 en uranium-238/lood-206. Soms vindt men dan concordante, maar vaak ook discordante resultaten. Door de vele reusachtige inslagen die op de Maan op uitgebreide schaal plaatsvonden, is schokmetamorfose opgetreden. Hierdoor zijn bepaalde mineralen in glas omgezet en zijn er breksies ontstaan. Aanwezig radio-actief materiaal, dat bij dit proces opnieuw in andere, nieuw gevormde, mineralen kan zijn opgesloten, begint dan weer te vervallen en metingen daarvan kunnen nu het tijdstip van de schokmetamorfose vastleggen.

Meestal is er dan tijdens dat proces loodverlies opgetreden. Dit is te controleren door meerdere mineralen in dezelfde breksie te meten. Als men de verhouding lood-206/uranium-238 uitzet tegen de verhouding lood-207/uranium-235, krijgt men een discordantielijn. Ook kan worden berekend hoe de concordia-relatie eruit zou moeten zien als er geen loodverlies waren opgetreden. De concordialijn kan van een ouderdomsschaal worden voorzien. Samen met de eerste lijn vormt ze een concordia-discordia-grafiek, waarbij de snijpunten van beide lijnen corresponderen met de tijdstippen waarop het gesteente kristalliseerde en waarop de schokmetamorfose optrad.

### Niet jonger dan 3,16 miljard jaar

Met behulp van deze methoden is een groot aantal ouderdomsbepalingen aan gesteenten van de Maan uitgevoerd. Merkwaardig is dat nergens nog Maangesteenten zijn gevonden die jonger zijn dan 3,16 miljard jaar. Dit terwijl alle ons bekende Aardse gesteenten jonger zijn van 3,75 miljard jaar. In ouderdom vormt het materiaal van de Maan een welkome aanvulling op de ons bekende gegevens van de Aarde. Blijkbaar is er de afgelopen drie miljard jaar weinig of geen gesteente gevormd op de Maan. Natuurlijk is het oppervlak wel veranderd door inslagen op kleine schaal. Plaatselijk zal er misschien wel gesmolten gesteente zijn gevormd en is schokmetamorfose opgetreden, maar er zijn geen directe aanwijzingen voor uitgebreidere vulkanische activiteit of basaltuitvloeiingen in de afgelopen drie miljard jaar. De ouderdom van de basalten op de vlakten (hier maries genoemd) is nauwkeurig bekend uit het materiaal van de Apollo- en Loenamissies. Het vulkanisme dat de ons bekende grote Maanvlakten met basalt overstroomde, was gedurende ca. 600 miljoen jaar actief. Mare Crisium, waar de Loe-



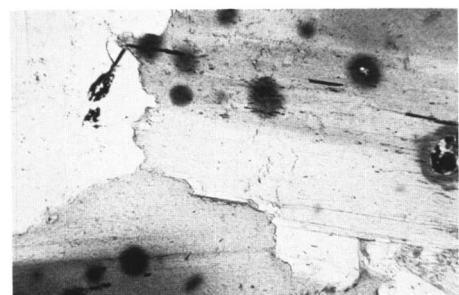
**De berg Lahire werpt een lange schaduw over de Maanvlakte Mare Imbrium bij zeer laagstaande Zon. Lavastromen steken als tongen met gebogen randen vooruit en zijn vlakbij de lichtgrens goed zichtbaar.**

na 24 landde, werd 3,26 miljard jaar geleden met basalt gevuld en is een van de jongste Maanvlakten. Nog iets jonger zijn sommige lavastromen in Mare Imbrium. De ouderdom van olivijnbasalten die de astronauten van de Apollo 15 aan de voet van het Apenninengebergte vonden, is 3,22 miljard jaar. Iets ouder (en ook iets minder rond in uiterlijk) is Mare Fecunditatis volgens de ouderdom van de Loena 16-basalten (3,45 miljard jaar). Nog iets ouder is Mare Serenitatis, namelijk 3,78 miljard jaar. De oudste vlakte is de eerste die door astronauten bezocht werd. De basalten in Mare Tranquillitatis zijn 3,92 miljard jaar geleden ontstaan. Al deze ouderdomsbepalingen zijn natuurlijk gemiddelden en de foutenmarge bedraagt ca. 0,05 miljard

jaar. Zo ontstond het oranje glas dat bij de landingsplaats van de Apollo 17 werd gevonden 3,86 miljard jaar geleden en is in goede overeenstemming met de ouderdom van de basalten. Er zijn sporen van een nog oudere inslag die voorlopig in verband wordt gebracht met de Mare Transquillitatis.

### **De cataclysmatijd**

Aan de periode van basaltuitvloeiingen gaat een tijd vooraf waarin grote basins ontstonden die pas later met basalt gevuld zijn. Dat tijdperk wordt gekenmerkt door zeer hevige inslagen waarvan sommige Maanstenen de sporen vertonen. In een voordracht tijdens de vijfde Maanconferentie in Houston vertelden Schaeffer en Hussain, dat zij er in waren geslaagd vijf reuzeninslagen te dateren. Deze konden voorlopig worden gecorreleerd met bekende basins. De periode waarin dit is gebeurd zou tussen 4,2 en 3,9 miljard jaar geleden geplaatst moeten worden. Volgens sommigen gaat hier



**Onder een microscoop zijn in het mineraal biotiet soms ronde donkere vlekjes te zien die een klein zirkoonkristalletje omringen.**

nog een tijd aan vooraf met talrijke inslagen en tegelijk voortdurende vulkanische activiteit. Hierbij onstond gesmolten gesteente en werden breksies gevormd tengevolge van de schokmetamorfe omzettingen van ou-



dere gesteenten. Volgens anderen is het zeer de vraag of het zinvol is beide laatste perioden los van elkaar te zien.

Een voorbeeld van de problemen die bij de ouderdomsbepalingen van Maanstenen optreden, is basaltmonster 75075 van de Apollo 17. Uit uranium, thorium en loodisotopen vindt men een concordadiagram waarin de discordialijn die uit de steen als geheel en de mineralen ilmeniet en pyroxeen volgt, de concordialijn snijdt bij tijden van 4,25 en 2,8 miljard jaar. Uit meerdere andere metingen in verschillende laboratoria weet men echter dat de kristallisatie-ouderdom van Apollo 17 basalt 3,78 miljard jaar bedraagt. Het blijkt nu onmogelijk de isotopsamenstelling van het aanvaankelijk in de steen aanwezige lood zo aan te passen dat deze ouderdom klopt met het concordadiagram. De aard van de veranderingen die ongetwijfeld in de steen moeten hebben plaatsgevonden is moeilijk vast te stellen.

Een geweldige uitbarsting vond 4,31 miljard jaar geleden plaats en produceerde basalten, anorthosieten en meer granitische gesteenten vlak onder of aan het Maanoppervlak in het gebied waar nu Mare Imbrium ligt. Later werden deze gesteenten versplinterd en ondergingen een aantal metamorfe processen, die eindigden en tevens hun hoogtepunt vormden in het ontstaan van Mare Imbrium.

Het blijkt dat tussen 4,4 en 4 miljard jaar geleden enorme inslagen en intens vulkanisme de Maankorst en zijn gesteenten drastisch hebben beïnvloed. De hierdoor veroorzaakte metamorfe omzettingen maken het vrijwel onmogelijk om het gedetailleerde verloop van die gebeurtenissen te achterhalen, laat staan om iets over de duistere tijd daarvoor te weten te komen. De tijd waarin de Maan en Maankorst onstonden. Misschien dat statistisch onderzoek van Maankraters ons iets verder helpt.



**Het is nodig dat we in de komende jaren naar de Maan terugkeren om er stenen te verzamelen en opnieuw te zoeken naar de echte 'genessteen'.**

Adres van de auteur:  
Aetveldselaan 12  
1381 EA Weesp

## GEOVARIA

### **Reuzenmiereneter ook in Noord-Amerika tijdens IJstijdvak**

Met de vondst van het derde rechter middenhandsbeentje van een reuzenmiereneter (*Myrmecophaga tridactyla*) in het noorden van Mexico is voor het eerst aangetoond, dat dit dier ook in Noord-Amerika geleefd heeft. Tot nu toe bevond de meest noordelijke vindplaats van dit dier zich 3000 kilometer zuidelijker in Brazilië en Uruguay. Daarmee is de reuzenmiereneter de tiende familie van Zuid Amerikaanse origine die na het ontstaan van de Panamese landengte in Noord-Amerika is aangetroffen. Ongeveer drie miljoen jaar geleden ontstond de Panamese landengte en konden de fauna's van Noord- en Zuid-Amerika zich vermengen. In het algemeen waren de 'moderne zoogdieren' uit het noorden beter in staat zich een plaats te veroveren dan de zuidelijke. De miereneters uit Zuid-Amerika vertegenwoordigen een tamelijk primitieve groep van zoogdieren, zeer nauw verwant aan die van Australië. Bij deze zogenoemde buideldieren ontwikkelt het embryo zich na de conceptie gedurende enkele weken in het moederlichaam voordat het geboren wordt. De verdere ontwikkeling van het nog zeer jonge hulploze dier, vindt buiten het moederlichaam

plaats in een buidel. Het fossiel van de reuzenmiereneter is gevonden in Pleistocene afzettingen in El Golfo de Santa Clara, Sonora, Mexico. Dit tegenwoordig subtropische gebied had in het Vroeg-Pleistoceen een tropisch klimaat. Het voorkomen van de reuzenmiereneter in dit gebied draagt bij aan het beeld van de toenmalige natuurlijke omgeving. De streek daar was in die tijd veel vochtiger dan tegenwoordig. Het ligt nu aan de rand van een woestijn met hier en daar wat struikgewas. De reuzenmiereneter komt momenteel niet meer in dit gebied van Mexico voor.

Science, april 1989

### **Meteorietkrater in Tsjechoslowakije?**

Op Aarde zijn thans al meer dan honderd grote meteorietkraters geïdentificeerd. Sommige bezitten een diameter van vele tientallen kilometers. De meeste kraters zijn pas ontdekt na de komst van de kunstmanen, die de Aarde fotografeerden. Deze kraters zijn zo groot dat ze vanaf de grond niet op te merken zijn. Zelfs vanuit hoogvliegende straalvliegtuigen is het niet goed mogelijk een beeld van deze objecten te krijgen. Ze zijn niet alleen groot, maar ook vaak aangetast door erosie

en bedekt met vegetatie. Twee onderzoekers van de Boston University, Michael P. Papagiannis en Farouk El-Bas, menen thans één van de allergrootste kraters gevonden te hebben. De inslagkrater bevindt zich in het westelijk deel van Tsjechoslowakije. Foto-opnamen van de Meteosat 2 satelliet laten van dit gebied een concentrisch, cirkelvormig patroon van hoogteverschillen zien met het centrum vlak bij de hoofdstad Praag. De diameter van dit Praagse bekken meet ruwweg 320 km. Hiermee wordt het grootste deel van westelijk Tsjechoslowakije (Bohemen) bestreken. De veronderstelling dat zich hier een grote inslagkrater bevindt wordt ondersteund door een artikel van de Tsjechische geoloog Stanislav Vrana. Deze onderzoeker vond bij het plaatsje Sevetin, zuidelijk van Praag, een inslagstructuur. Met een ouderdom van ongeveer honderd miljoen jaar zou deze structuur heel goed deel uit kunnen maken van het veel grotere Praagse bekken. De onderzoekers uit Boston hopen in het bekken gesteenten te kunnen vinden die door schokmetamorfose zijn ontstaan. Soortgelijke gesteenten vond de geoloog Vrana namelijk bij Sevetin.

Sky and Telescope 77