

Vulkanisch glas onder de loep

Dichtheidsbepalingen van Ti-rijke maangesteenten bij hoge temperatuur en druk

door Eva Kelderman
eva.kelderman@gmail.com

Vulkanisch glas is aangetroffen op het maanoppervlak, terwijl dit door het hoge titaniumgehalte een relatief hoge dichtheid heeft. Meestal komen gesteenten met een hoge dichtheid niet op het oppervlak terecht. De vraag is dus hoe dit heeft kunnen gebeuren.

Om hierop een antwoord te vinden, heb ik zwart glas van de Apollo 14-missie en rood glas van de Apollo 15-missie geanalyseerd, waarbij ik heb gekeken naar de variatie van de dichtheid bij verschillende drukken. Daarnaast heb ik droge smelten (zonder water) vergeleken met smelten die een klein beetje water bevatten (2 gewichtsprocent water).

Mijn onderzoek kan bijdragen aan een beter begrip van de evolutie van het binnenste deel van de Maan. Ik heb hierbij voortgebouwd op het maanonderzoek van Bart Davids en ben hierbij begeleid door onder andere Wim van Westrenen en Edgar Steenstra, beiden verbonden aan de Vrije Universiteit Amsterdam.

Geschiedenis: de Apollo-missies

“That’s one small step for a man, one giant leap for mankind.” Deze woorden van Neil Armstrong, de eerste mens op de Maan, zijn woorden die niemand ooit zal vergeten. Voor het eerst sinds het bestaan van de mensheid was het de NASA in 1969 gelukt om mensen naar de Maan te brengen.

Minder bekend is dat deze reis onderdeel was van het Apollo-programma, met als één van de speerpunten het veilig laten landen van mensen op de Maan. De missies vonden plaats tussen 1961 en 1972, waarvan in totaal elf bemande vluchten (Apollo 7 t/m Apollo 17).

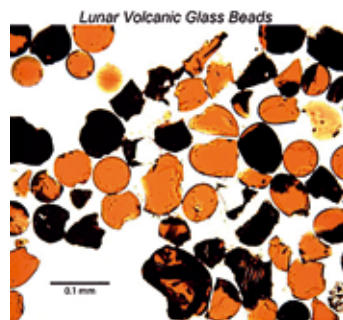
De Apollo-missies hadden ook als doel om onderzoeksinstrumenten naar de Maan te brengen voor het verkrijgen van informatie over gesteentes en gassen en om de Maan in kaart te brengen.

Apollo 14 en 15 richtten zich op een langer verblijf van de mens op de Maan en op het vergroten van de mobiliteit van onderzoeksinstrumenten en mensen op de Maan. Met behulp van maanvoertuigen (rovers) werd het mogelijk om grotere afstanden af te leggen en waardevolle (geologische) informatie te verzamelen. Bij iedere Apollo-missie werd er gesteente mee terug genomen naar de aarde voor verder onderzoek, in totaal ongeveer 380 kg.

Vulkanisch glas in alle kleuren

Wat na analyse van de teruggebrachte maanstenen vooral opviel, was het vulkanisch glas, dat in vele kleuren aanwezig was. Rood, groen, zwart, oranje en zelfs geel vulkanisch glas werd aangetroffen! Afb. 1. Deze kleurverschillen worden veroorzaakt door aanwezige chemische elementen in het vulkanisch glas. Zo bevat groen glas meer siliciumoxide (SiO_2), terwijl oranje en geel glas meer ijzerionen (FeO) bevat, wat voor de rode kleurcomponent zorgt.

Sommige monsters bevatten opvallend hoge concentraties titaniumoxide (8,6-16,4 gewichtsprocent). Wetenschappers verklaarden deze hoge concentraties aan de hand van de ontstaanswijze van deze gesteentes. Waarschijnlijk ontstond het vulkanisch glas vanuit primaire smelten, die ontstaan wanneer gesteente in de mantel smelt tijdens de vroege evolutie van de Maan. Deze smelten zijn niet-gedifferentieerd en kunnen daarom informatie verschaffen over de evolutie van de mantel van de Maan.



Afb. 1. Oranje glas van de Apollo-17 missie. Bron: Katherine L. Robinson en G. J. Taylor, *Heterogeneous distribution of water in the Moon*, 2014. Universiteit van Hawaii. In: *Nature Geoscience*.

Theorieën over de Maanvorming

Over het ontstaan van de Maan bestaan verschillende hypothesen en er wordt een levendig wetenschappelijk debat over gevoerd. Vóór de aanvang van de Apollo-missies waren er drie populaire theorieën: de *capture-theorie*, de *fission-theorie* en de *condensatie-theorie*. Het voert te ver deze hier verder uit te leggen. Door de bevindingen van de Apollo-missies werden al deze theorieën ontkracht.

In 1975 werd een theorie gelanceerd die op dit moment de meeste steun krijgt: de *giant-impact-theorie*. Deze theorie gaat ervan uit dat de Aarde in botsing kwam met een soortgelijke kleinere planeet, waaruit de Aarde en Maan zijn gevormd zoals wij die nu kennen. Deze theorie komt echter niet volledig overeen met bepaalde isotoopconcentraties op beide hemellichamen.

Er blijft dus nog veel onzekerheid over het ontstaan van de Maan. Wat we wel zeker weten, is dat de Maan na zijn vorming snel is gedifferentieerd: d.w.z. dat kern, mantel en korst snel zijn gevormd als gevolg van de dichtheidsverschillen in de aanwezige smelt.

Mijn onderzoek

Zoals hierboven al beschreven, is het doel van mijn onderzoek om dichtheidsbepalingen uit te voeren, om zo de aanwezigheid van vulkanisch glas met een relatief hoge dichtheid te kunnen

verklaren. Om experimenten met (hoge) druk te kunnen uitvoeren, moest ik eerst vulkanisch maanglas namaken. Het glas van de Apollo-missies is namelijk te kostbaar om voor dit type experimenten te gebruiken. Door verschillende oxiden samen te voegen en dit mengsel tot 1500 graden te verwarmen en daarna meteen af te koelen, ontstond



Afb. 2. Freddy, de hogedrukkers die is gebruikt tijdens mijn onderzoek op de Vrije Universiteit Amsterdam. Bron: Bristol University

er donkerrood glas. Dit werd verpulverd en vervolgens werd het poeder overgebracht in kleine capsules (3,7 mm hoog en 1,6 mm breed), die in een hogedrukkers werden geplaatst. Deze pers (met de bijnaam Freddy, een Bristol-type endloaded-piston cylinder press, afb. 2) kan in theorie een druk leveren tot maximaal 3 GPa, wat overeenkomt met de druk op een diepte van ongeveer 600 km onder het maanoppervlak!

Dichtheidsbepaling met behulp van olivijn

Om de dichtheid van vulkanisch glas te bepalen heb ik gebruik gemaakt van relatieve dichtheidsbepalingen. De capsule met kunstmatig geproduceerd rood vulkanisch glas bevatte ook twee olivijnkorrels (één bovenin de capsule en één onderin), waarvan de dichtheid bekend was. We brachten de capsule onder zeer hoge druk en lieten tegelijkertijd ook de temperatuur toenemen. Bij een bepaalde druk zal het vulkanisch glas gaan

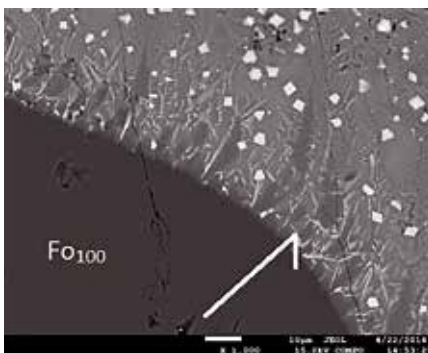


Afb. 3. Verscheidene situaties van de olivijnkorrels met zwart glas. A. Sink: dichtheid olivijn > dichtheid glas; olivijnkorrels zakken. B. Neutral buoyancy. C. Float: dichtheid olivijn < dichtheid glas; olivijnkorrels drijven.

smelten, waarbij het zich - net als de olivijnkorrels - in de capsule gaat verplaatsen. Wanneer de dichtheid van het glas lager is dan die van de olivijnkorrels, zullen de olivijnkorrels op de bodem gaan liggen. Dit noemen we een *sink* (afb. 3A). Wanneer de olivijnkorrels op dezelfde plek blijven liggen, is de dichtheid van de smelt gelijk aan die van de olivijnkorrels (Engels: *neutral buoyancy*, 3B) en weet je dus de precieze dichtheid; deze is namelijk gelijk aan die van olivijn. Wanneer, ten slotte, de dichtheid van het vulkanisch glas hoger is dan de dichtheid van de olivijnkorrels, zal de olivijn gaan drijven (Engels: *float*, 3C). Met deze data kun je uiteindelijk een grafiek opstellen waarin je de dichtheid van het vulkanisch glas kunt plotten en vervolgens de invloed van water (in het vulkanisch glas) kunt aflezen.

Electron microprobe

Ter controle van de experimenten zijn de glasmonsters naar de Universiteit van Utrecht gestuurd. Op de Nationale Geologische Faculteit zijn de monsters gemeten in de EMPA (*electron microprobe*) ter controle van de compositie. Ook zijn de monsters hier gefotografeerd (afb. 4). Op de foto zijn de olivijn, de smelt en molybdeen te zien. Molybdeen komt in de smelt voor omdat de capsule hiervan gemaakt is en er altijd enige uitwisseling plaatsvindt tussen de capsule en de smelt. Op de grens van de korrel en de smelt is een reactiering te zien waarin uitwisseling plaatsvindt tussen korrel en smelt. Gelukkig is deze ring klein genoeg om de resultaten van het experiment niet te beïnvloeden (de dichtheid van de korrels verandert niet door de reactie).



Afb. 4. Close-up van de reactiering om een olivijnkorrel (Fo100). Hierop is de olivijnkorrel (Fo100) te zien, met daaromheen in lichtgrijs de smelt, met witte korrels van molybdeen afkomstig uit de capsule.

Dichtheid droog glas neemt sneller toe

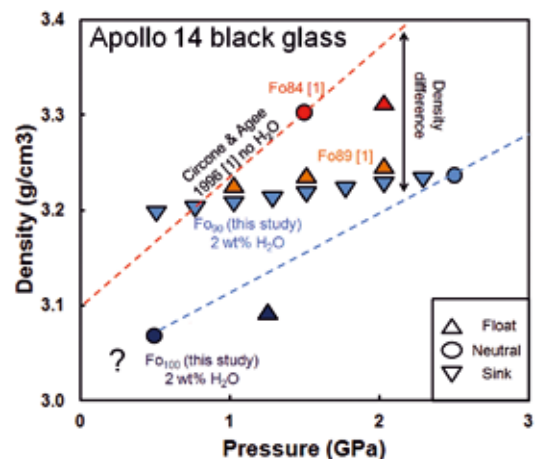
Na het uitvoeren van alle experimenten, waarin constant is gekeken naar de relatieve dichtheid van de smelt, zijn er twee

belangrijke grafieken op te stellen. Allereerst de grafiek voor Apollo 14 zwart glas. In deze grafiek (afb. 5) zijn verschillende onderzoeken samengevoegd, om zo de resultaten te kunnen vergelijken. De lichtblauwe driehoekjes/rondje is het resultaat van de studie met het zwarte glas met water. Donkerblauw is het zwarte glas met water, maar dan met olivijnkorrels met een lagere dichtheid. De rode lijn is het resultaat van een onderzoek uit 1996, waarin de onderzoekers Circone en Agee watervrij

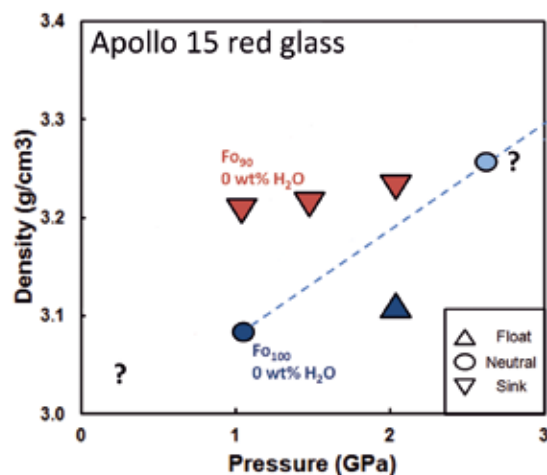
zwart glas hebben onderzocht. Daarnaast zijn er verschillende soorten olivijnkorrels gebruikt (Fo₁₀₀, Fo₉₀, Fo₈₅), die in dichtheid variëren.

Belangrijk is om te zien dat de dichtheid van watervrij zwart glas veel sneller toeneemt (oranje lijn) dan de dichtheid van zwart glas met 2 gewichtsprocent water (lichtblauwe lijn). Mijn onderzoek laat zien dat de smeltdichtheid (de dichtheid waarbij gesteente gaat smelten) van Apollo 14 zwart glas (2 wt% water) 3,07 g/cm³ bedraagt bij een druk van 0,5 GPa en stijgt naar 3,24 g/cm³ bij een druk

van 2,5 GPa (een druk van 3 GPa is - zoals eerder aangegeven - vergelijkbaar met 600 km onder het maanoppervlak). Daarnaast is in deze grafiek ook goed af te lezen dat het verschil in dichtheid tussen watervrij zwart glas en waterhoudend



Afb. 5. Dichtheidscurve van Apollo 14 zwart glas.



Afb. 6. Dichtheidscurve van Apollo 15 rood glas.

zwart glas toeneemt. Dat betekent dus dat bij toenemende druk de dichtheid van droog glas sneller toeneemt dan die van waterhoudend glas.

Rood glas

Van rood glas zijn nog niet eerder dichtheidsbepalingen bij hoge druk en temperatuur uitgevoerd. In mijn onderzoek heb ik uitsluitend gekeken naar watervrij rood glas. De grafiek (afb. 6) laat zien dat we een neutral buoyancy (het glas heeft dezelfde dichtheid als olivijn) hebben gezien bij het gebruik van Fo100-korrels bij 1 GPa. Met olivijnkorrels van Fo90 hebben we helaas geen duidelijke neutral buoyancy gezien. Uitgaande van de resultaten van zwart glas en de plek in de grafiek van de neutral buoyancy van rood glas bij Fo90, vermoed ik dat de neutral buoyancy gevonden kan worden bij een druk van 2,5 GPa.

Nieuwe inzichten

Zowel mijn onderzoek naar zwart als rood vulkanisch glas afkomstig van de Maan hebben betere restricties opgeleverd over

de dichtheidsveranderingen bij bepaalde druk en temperatuur. Uit het onderzoek komt duidelijk naar voren dat de dichtheid tijdens de vorming van vulkanisch glas op de Maan lager kan liggen dan eerder werd aangenomen indien het glas 2 gewichtspercentage water bevatte.

Dit nieuwe inzicht maakt het begrijpelijk hoe vulkanisch glas (ondanks het huidige gewicht) tijdens het proces van differentiatie van de Maan toch naar het Maanoppervlak is gekomen.

Referentie

Eva Kelderman, Bart Davids, Yanhao Lin, Nachiketa Rai, Wim van Westrenen and Edgar S. Steenstra. *Compressibility and Density of hydrous high-Ti lunar red and black glass*. In: European Lunar Symposium 2016 (abstract).

Eva Kelderman is student aardwetenschappen aan de VU Amsterdam. De afbeeldingen in dit artikel zijn van de auteur, tenzij anders aangegeven.

Boekbespreking



Evolueren wij nog? Alles wat je wilt weten over ontwikkeling en evolutie van ons lichaam, door N.M. van Straalen en D. Roelofs. AUP 2017. ISBN 978 94 628 1300. 266 pagina's, 108 ill. Prijs € 24,95.

Een wonderlijke titel voor de fossielenliefhebber - immers blijft geen levensvorm op de lange duur dezelfde. De fossiele dieren uit het Krijt van Maastricht hadden weinig tot niets gemeen met wat er nu in tropische zeeën leeft. Hoezo zou de mens eender en dezelfde blijven? Onze eeuw kent intussen de ontwikke-

ling van genetische manipulatie, de mens vergroot de levensduur en houdt zich langer gezond - een nieuwe situatie in het evolutiegebeuren. Wie belangstelling heeft voor de menselijke biologie door de tijden heen, vindt in dit boek een boeiende, betrouwbare en niet steeds even gemakkelijke gids. Het is bijzonder dat zo'n degelijk werk voor Nederlandstalig publiek verschenen is, van de hand van gezaghebbende auteurs. Nieuwsgierige lezers vinden hierin onmisbare achtergrondinformatie die niet zonder deze begrrippen bij elkaar is te googelen.

Fossiele mensen en hun werktuigen

Aardkundigen, verbaasd over de wonderlijke fossielenwereld en geboeid door de grootse geschiedenis van het leven op aarde waarvan de huidige mensheid een eindterm is, leren uit dit boek veel over biologische processen. Het is sterk in aspecten van embryologie, anatomie, genetika. Het is behoudend inzake de paleobiologie van de oudste fasen van het mensdom. Van Pliocene-ouderdom immers zijn de tot nog toe alleroudste menselijke stenen werktuigen, ontdekt in 2015 te Lomekwi aan de westoever van het Turkana-meer. Die werktuigen zijn grof en zwaar, en kunnen niet zijn gehanteerd door de bekende Lucy-achtigen en de "*Homo*" *naledi* die tot 250.000 jaar geleden voortleefden: de Australopitheken. Zij waren klein van gestalte,

en hadden een chimpansee-gelijke hersenpan die weinig ruimte bood voor bedenksels ten aanzien van het slaan en gebruiken van stenen werktuigen uit schelpvormig brekend materiaal - er is ook nog nooit een stenen werktuig gevonden in de nabijheid van hun fossielen. We moeten daarom afstand nemen van Ethiopische Lucy en haar Zuid-Afrikaanse verwanten. Vermoedelijk waren ze verre neven en nichten, en stammen wij niet van hen af.

Er is een goede kans dat de verder nog onontdekte Lomekwimensen een voorouder was van de beroemde *Homo erectus* - de grote ontdekking van onze landgenoot Eugène Dubois, de Javamensen. Een late *erectus* was dat trouwens die het op het geïsoleerde Java langer heeft volgehouden dan elders.

Het blijft een probleem - de oudste mens liet ongetwijfeld veel en veel meer stenen werktuigen na dan dat ene geraamte wat kon achterblijven. Fossiel worden is een voorrecht dat vooral zeeschelpen hebben; hun harde kalkskelet wordt niet zelden afgedekt door slib en blijft aldus, bewaard. Beenderen blijven maar zeer schaars op het land bewaard. Aan het strand kraken de schelpen onder onze zolen, maar in het oerwoud liggen de paden niet bestrooid met botten van apen, eekhoorns, vogels. Het zal dus lang zoeken blijven naar vooral de schedel van de Lomekwimensen, die er toch moet zijn geweest...

Een ander probleem, dat door de auteurs is aangestipt, vormen al die "soorten" van fossiele mensachtigen. Waar de evolutie van generatie op generatie veranderingen kan aanbrengen, wordt het soortbegrip hoogst problematisch - er bestaat geen sluitende definitie "biologische soort", en voor fossiele soorten geldt alleen maar "lijkt in hoge mate op eerder beschreven fossiel" als determinatie-kenmerk. De soortendiscussie begon al in de achttiende eeuw, toen de pedante classificator en creationist Linnaeus het huidige systeem van soorten, geslachten en klassen invoerde. Hij zag zichzelf als "de nieuwe Adam", die alle geschapen levende wezens benoemde. Zijn veel minder gelovige tijdgenoot, de graaf van Buffon, kwam hier tegenop, en vond dat die soortnamen alleen een schijnzekerheid suggereerden. Intussen is de Linneaanse werkwijze een onmisbaar middel geworden voor het streven naar overzicht van de veelvormige natuur. Maar al die zorgvuldig beschreven soorten zijn in het grote panorama van de lange geschiedenis van de levende wezens niet meer dan momentopnamen. Ze zijn schakeltjes in de bijna eindeloze ketens van evoluerende organismen. Soorten zijn niet minder en niet meer dan door toegewijde geleerden zorgvuldig beschreven portretten van individuele levensvormen uit einde-