

# Waar zijn de vluchtige elementen in de Maan gebleven?

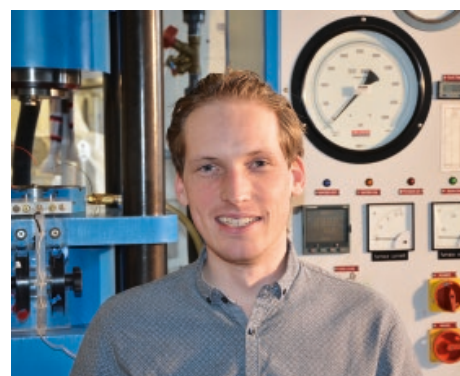
**Maanstenen bevatten vluchtige elementen zoals waterstof, koolstof, zwavel en antimoon, net als Aardse stenen, maar in minder grote hoeveelheden. De vraag of deze elementen in de Maanstenen terecht zijn gekomen na de vorming van de Maan door inslagen van planetoïden of kometen, of dat de elementen niet geheel ontgast zijn naar de ruimte bij het ontstaan van de Maan uit de Aarde is het onderwerp van de promotie van Edgar Sikko Steenstra.**

De vorming en vroege geologische evolutie van onze Maan zijn nog slecht begrepen. De meest aangehangen hypothese over de vorming van de Maan is dat een andere planeet op de jonge Aarde insloeg en daarbij aards mantelmateriaal in een baan om de Aarde bracht. Dit materiaal condenseerde en vormde de Maan zoals we die nu kennen. Dit proces moet bij zeer hoge temperaturen plaatsgevonden hebben (meer dan 2000°C) en ontgassing van vluchtige elementen (elementen die liever in de gasfase blijven dan condenseren bij temperaturen onder de 1000 graden) naar de ruimte lijkt dan onvermijdelijk. In de tientallen jaren sinds de Apollo-missies naar de Maan werd lang beweerd dat de Maan inderdaad veel

minder vluchtige elementen bevat dan de Aarde. Recent gedetailleerd onderzoek heeft echter aangetoond dat Maanstenen toch duidelijk meetbare hoeveelheden vluchtige elementen bevatten – weliswaar minder dan in Aardse stenen, maar toch.

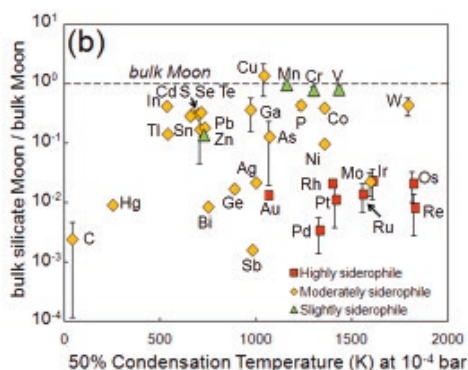
## Ijzerminnende elementen

Voor het beantwoorden van de vraag of deze elementen zijn toegevoegd na de vorming van de Maan, of afkomstig zijn van de Aarde, is kennis nodig over het chemisch gedrag van vluchtige elementen bij hoge druk en temperatuur. Experimenten laten zien dat het overgrote deel van de vluchtige elementen onder bepaalde omstandigheden ijzerminnend (siderofiel) gedrag gaat vertonen. Dat betekent dat die elementen tijdens de vorming van de kern van een planeet of maan geconcentreerd worden in de kern en verarmd raken daarbuiten. Dit suggereert dat de gemeten verarmingen van deze elementen in Maanstenen mogelijk versterkt, of zelfs geheel veroorzaakt, zijn door hun voorkeur voor de metaalfase tijdens de vorming van de kleine metalen Maankern. Mijn promotieonderzoek, onder leiding van prof. dr. Wim van Westrenen, kwantificeert de verarmingen van vluchtige elementen in de Maan en andere kleine hemellichamen als gevolg van kernvormingsprocessen. Ik onderzoek deze processen door experimenten uit te voeren met synthetische maanstenen en metalen bij hoge druk en temperatuur in het hoge-druk-lab van de Afdeling Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam. Met deze experimenten probeer ik te bepalen wat de effecten van druk,

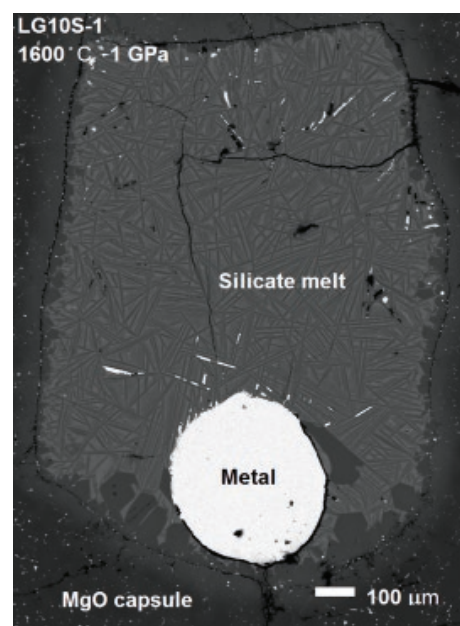


Edgar Sikko Steenstra.

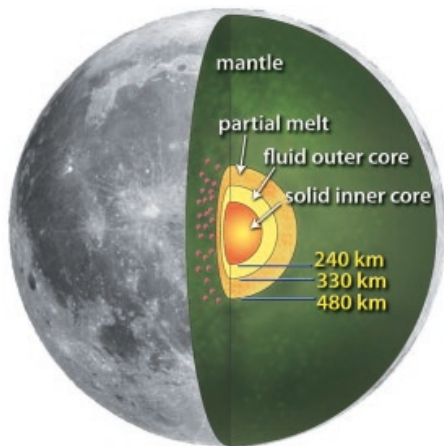
temperatuur en samenstelling van de stenen mantel en metalen kern zijn op de verdeling van ijzerminnende elementen tussen metaal (kern) en steen (mantel). De chemische samenstellingen van de geproduceerde steen- en metaalfase wor-



**De verarming van siderofiele (ijzer-minnende) elementen in de mantel van de Maan ten opzichte van de samenstelling van de hele Maan (Steenstra en Van Westrenen, 2016). Elementen links van het element goud (Au) worden als vluchtig beschouwd.**



Voorbeeld van een hogedruk-experiment waarbij kernvorming in de Maan is gesimuleerd.



Schematische voorstelling van de inwendige structuur van de Maan.

den na het experiment gemeten met een elektronenmicroscop en een massaspectrometer gekoppeld aan een lasersysteem (LA-ICP-MS). Met deze metingen berekenen we de verdelingscoëfficiënten voor elke set van omstandigheden die we onderzoeken. Deze resultaten combineren we met de gemeten samenstellingen van Maanstenen om inzicht te krijgen in de rol van de Maankern als belangrijk reservoir voor vluchtige elementen. Dit biedt nieuwe randvoorwaarden voor de theorieën over de vorming van de Maan.

### Kernvorming

Mijn resultaten tot nu toe laten zien dat veel van de gemeten verarmingen van vluchtige elementen in de maanmantel gemakkelijk verklaard kunnen worden door kernvorming in een geheel gesmolten magma-oceaan op de Maan (Steenstra et al., 2016a, 2017a, b). De verdelingscoëfficiënten wijzen ook uit dat de Maankern veel koolstof bevat en

relatief weinig zwavel. Dit is belangrijk voor modellen voor de ontwikkeling van een magnetisch veld in de Maan. Het is een mogelijke verklaring voor de relatief lange periode dat een magnetische kerndynamo in de Maan actief was. Recente experimentele data tonen aan dat zelfs de alkalimetalen onder bepaalde omstandigheden ijzerminnend gedrag vertonen (Agmon et al., 2017). Het gehalte aan alkalimetalen in planetaire mantels wordt nu nog gebruikt als indicator voor de rol van het verlies van vluchtige elementen vroeg in de geschiedenis van die planeet. Het is echter mogelijk dat een gebrek aan alkalimetalen in planetaire mantels juist aangeeft dat de kern in die planeet die metalen in zich heeft opgenomen. Een grote opname van het alkali-element kalium in de Maankern zou mogelijk ook de huidige gesmolten toestand van de Maankern kunnen verklaren en significant bijdragen aan het bestaan van een vroeg magnetisch veld, omdat kalium door radioactief verval hitte produceert.

### Andere hemellichamen

Als onze theorie klopt, moet deze natuurlijk ook werken voor andere hemellichamen. Ik heb daarom mijn focus uitgebreid naar Mercurius (Putter et al., 2017), asteroïden zoals Vesta en het moederlichaam van de angrieten meteorietgroep (Steenstra et al., 2016b, 2017c) en de Aarde (Seegers et al., 2017). Het interessante is dat onze theorie ook de verarmingen van vluchtige elementen in deze lichamen verklaart. Dit bevestigt onze hypothese dat planeetkernen een belangrijke of potentieel dominante 'sink' zijn voor deze elementen, in plaats van ontgassing gedurende de vorming van de planeten. Vanaf eind juni zal ik mijn werk uitbreiden naar hogere drukken en temperaturen, om meer te weten te komen over kernvorming

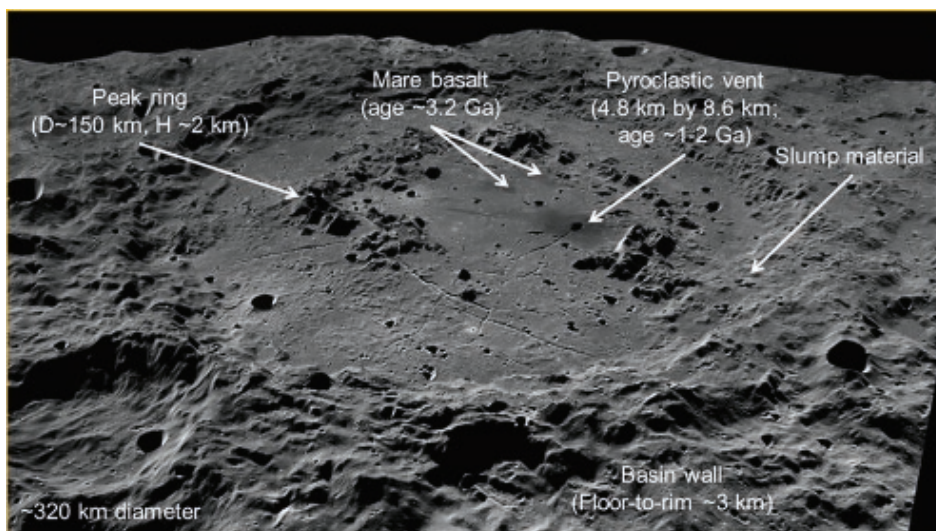
in Mars. Hiervoor zal ik een half jaar gaan werken in het Geophysical Laboratory van het Carnegie Institution of Washington DC. Mijn interesses binnen het planeetonderzoek zijn zeer breed. In het eerste jaar van mijn promotieonderzoek heb ik vier maanden gewerkt bij het Lunar and Planetary Institute bij Houston, in samenwerking met het NASA Johnson Space Centre (JSC) en ESA. Daar kon ik in een internationaal team werken aan een ESA-NASA missieconcept met betrekking tot robotische verkenning van het Schrödinger inslagbekken op de Zuidpool van de Maan (Steenstra et al., 2016c). Dit alles heeft me bijzonder enthousiast gemaakt en mij doen beseffen dat ik mijn carrière wil voortzetten op het gebied van het planeetonderzoek. Voor mijn huidige onderzoek heb ik twee prijzen gekregen: de Pierazzo International Travel Award van het Planetary Science Institute en de Lunar and Planetary Institute Young Career Development Award. Mijn droom is om een eerste postdoc te doen bij NASA-JSC waarvoor ik in september een onderzoeksvoorstel zal indienen. Naar verwachting verkrijg ik mijn PhD titel in oktober 2018.

Edgar Sikko Steenstra

Edgar Steenstra werkt als promovendus op het NWO-Vici project uit 2013 van Wim van Westrenen aan de VU. <http://essteenstra89.weebly.com/>

### Referenties

- Agmon N. et al. (2017). Metal-silicate partitioning of K as a function of composition and temperature: testing its feasibility as a heat producing element in planetary cores. 48th Lunar Planet. Sci. Conf.
- Kelderman E. et al. (2016). Compressibility and density of hydrous high-Ti lunar red and black glass. European Lunar Symposium.
- Putter R. et al. (2017). Effects of fO<sub>2</sub> and Si on metal-silicate partitioning of refractory and moderately volatile siderophile elements: Implications for the Si content of Mercury's core. 48th Lunar Planet. Sci. Conf.
- Seegers A.X. et al., (2017). The effects of Si and fO<sub>2</sub> on the metal-silicate partitioning of volatile siderophile elements: Implications for the Se/Te systematics of the bulk silicate Earth. 48th Lunar Planet. Sci. Conf.
- Steenstra E.S. en van Westrenen W. (2016). Siderophile elements in the lunar mantle. In: Encyclopedia of lunar science. Elsevier, Springer.
- Steenstra E.S. et al., (2016a). New geochemical models of core formation in the Moon from metal-silicate partitioning of 15 siderophile elements. Earth Planet. Sci. Lett., 441, 1-9.
- Steenstra E.S. et al. (2016b). Constraints on core formation in Vesta from metal-silicate partitioning of siderophile elements. Geochim. Cosmochim. Acta 177, 48-61.
- Steenstra E.S. et al. (2016c). Analyses of Robotic Traverses and Sample Sites in the Schrödinger basin for the HERACLES Human-Assisted Sample Return Mission Concept. Adv. Space. Res. 58, 1050-1065.
- Steenstra E.S. et al., (2017a). Carbon as the dominant light element in the lunar core. Am. Mineral 102, 92-97.
- Steenstra E.S. et al., (2017b). Partitioning of S, Se, Te, and Sb suggests volatiles were not lost during lunar formation. In revision.
- Steenstra E.S. et al., (2017c). The effect of melt composition on metal-silicate partitioning of siderophile elements and constraints on core formation in the angrite parent body. Geochim. Cosmochim. Acta., under review.
- Weber R.C. et al., (2011) Seismic detection of the lunar core. Science 331, 309-312.



De Schrodinger-krater op de Maan is een mogelijke locatie voor een door de mens gestuurde maanrobot die monsters neemt en weer teruggaat naar de Aarde.