

Acasta gneis - het oudst bekende korstfragment op aarde

door Anne Rutger Fortuin, Geologisch Museum Hofland

fortuinar@gmail.com

Dit artikel is te danken aan de schenking van een indrukwekkend stuk gneis aan Museum Hofland door de Geologische Dienst van Canada. Indrukwekkend vanwege de immense ouderdom. Als "Acasta Gneiss" is het in geologenkringen beroemd als het oudst gedateerde korstgesteente op aarde. Die ouderdom is vastgesteld op 4,03 miljard jaar, oftewel rond 560 miljoen jaar na het ontstaan van onze aarde.

Als sedimentair geoloog ben ik niet gewend om over dergelijke oude en metamorfe gesteenten te schrijven. Maar, nu we in het museum de vaste collectie over de geschiedenis van de aarde en het leven bijwerken, komt ook de vroege aarde aan de orde. Vervolgens heb ik de pen toch maar gehanteerd om deze Acasta gneis in de context van de jonge aarde te plaatsen. De begintijd van onze planeet is een onderwerp met nogal wat vragen, onzekerheden en nieuwe visies. Allereerst verwijs ik de lezer graag naar het mooie Gea overzichtsartikel over het hele Precambrium door Cees Passchier (Gea 2005, zie onder 'Referenties en meer lezen'). Daarnaast bleek me, na het schrijven van dit artikel, dat oud VU-collega Frank Beunk het belang van zirkonen voor de datering van gesteenten in dit Geanummer beschrijft, wat hier ook aan de orde komt. Uiteraard is dat een mooie aanvulling op dit onderwerp, maar er is ook onvermijdelijk enige overlap.



▲ Afb. 1. Zo wordt het stuk Acasta gneis getoond in Geologisch Museum Hofland. Foto: Anne Fortuin.

In november plaatste de pakjesbesteller een stevige doos voor onze voordeur, belde aan en vertrok subiet. Coronatijd. De inhoud bleek de al verwachte attentie van de Canadese Geologische Dienst te zijn en bedoeld voor Geologisch Museum Hofland. De afzender, de Canadese Nederlander Dr. Wouter Bleeker, is mij als oud VU-docent nog bekend van zijn Amsterdamse studiejaren. Halverwege de 80er jaren studeerde hij met lof af als petroloog-erts-kundige. In Canada promoveerde hij op Precambriëse nikkelertsen. Later, toegetreden tot de Geologische Dienst van Canada, kreeg hij volop de kans om zijn research aan Precambriëse gesteenten voort te zetten. Van die oeroude gesteenten is nogal wat aanwezig in Canada. Wouter wilde desgevraagd wel materiaal voor museale doeleinden afstaan van dit, mede door zijn werk daaraan, beroemd geworden gesteente. Het spreekt vanzelf dat Geologisch Museum Hofland blij is met dit geschenk. Het staat inmiddels in de Precambrium-vitrine te pronken (afb. 1).

Oudst gedateerde gesteente

Het is een apart gevoel om gewoon thuis ineens het oudst gedateerde gesteente ter wereld in alle rust te kunnen uitpakken en bekijken. In de doos zaten twee stukken plus een briefje met de aanwijzing dat één van de twee stukken, als afgesproken, voor Naturalis is. Want inderdaad, ook Gea-redacteur Kees de Jong en oud-Naturalis-geoloog (en nog steeds vrijwilliger daar) had in tweede instantie contact gezocht met Wouter. Maar, zo berichtte het briefje, "jullie hebben als eerste gegadigden ook de eerste keuze". Die keus was niet moeilijk, want het gekozen exemplaar is niet alleen wat groter, maar draagt ook het monsternummer BNB-95-103, waarmee het een deel is van het afgebeelde oorspronkelijke materiaal waarvan de ouderdom van 4,03 miljard jaar is bepaald (Stern en Bleeker, 1998). Ook wordt het spiegelvlak van dit stuk afgebeeld in een artikel over mineraalevolutie (Hazen et al., 2008).

Dat het om origineel gedateerd materiaal gaat is wel belangrijk om te weten, want ook op internet worden brokken Acasta gneis aangeboden. Zelfs tot sieraden geslepen stukjes zijn daar te vinden. Al die stenen komen dan wel van dit gneiscomplex, maar echt niet elk onderdeel bezit diezelfde hoge ouderdom. Tja, een handige Canadese mijnbouwer kocht de rechten om dit gesteente te mogen exploiteren.

Het prille begin: Hadeïcum en Archeïcum

Voor we naar de Acasta gneis gaan eerst iets over de begintijd van de aarde. De chronostratigrafische naam voor de begintijd is Hadeïcum ('Hadean'). De naam is afgeleid

van Hades, de god die heerste over het dodenrijk, de onderwereld van de Griekse oudheid. Vanuit die rol ging Hades ook over alle kostbaarheden als zilver en goud, die uit de diepere aarde komen. Een toepasselijke naam dus. Dit eon begint dus met het ontstaan van de aarde rond 4,56 Ga en eindigt bij 4 Ga (NB Precambrische ouderdommen worden vaak met Ga – Giga-annum – aangegeven voor miljard jaar; miljoen jaar wordt standaard tot Ma – Mega-annum – afgekort). In deze bijna 600 miljoen jaar is heel veel gebeurd, waar we feitelijk maar weinig van afweten. Vergelijk dat eens met de omvangrijke kennis over de laatste 600 miljoen jaar!

De daarop volgende 1,5 miljard jaar is het Archeïcum. Het is ruwweg het eon waarin de moderne plaattektoniek zich nog niet manifesteert, maar wel verschuivende continenten gevormd worden. De aardkorst is dan voldoende afgekoeld en het leven gaat zich ontwikkelen.

De aarde is, net als de andere planeten van ons zonnestelsel, ontstaan uit de schijfvormige wolk van stof en gas die na het ontstaan van de zon daaromheen cirkelde. De ouderdom van ons zonnestelsel wordt gedateerd op 4,567 Ga. De planetengordel ontwikkelde zich door samenklontering onder invloed van de zwaartekracht. Elke groeiende planetaire kern ving uit zijn omgeving ruimtemateriaal in, waaronder ook grote objecten. Onder de heftigheid van de inslagen vormde zich een hete, grotendeels vloeibare aardbol. Daarbij bewogen zich de zwaarste siderofiele elementen¹, zoals goud en zeldzame aardmetalen, naar de kern, terwijl juist de lichtere elementen als aluminium, silicium etc. deel van de mantel- en korstgesteenten gingen uitmaken. Dit alles gebeurde in minder dan 70 miljoen jaar, tot rond 4500 Ma.



▲ Afb. 2. Een artistieke impressie van de jonge aarde, kort na de vorming van de maan. In deze visie zijn aarde en maan nog niet afgekoeld, helse planeten. De maan is erg groot, omdat hij in die tijd veel dichterbij de aarde stond. Afb.: Tim Bertelink via Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0.

Een hete bol zonder atmosfeer koelt relatief snel af. Bij afnemende temperaturen kristalliseren allereerst de magnesium- en ijzerrijke mineralen van basaltische samenstelling (mafische gesteenten). Men neemt daarom aan dat die jonge aarde vooral bedekt was met oceanische korst. Ontgassing samen met vulkanisme leverden vervolgens een nog zuurstofloze atmosfeer. Het proces van

differentiatie in kern, mantel en korst en de uiteindelijke opbouw van de aarde laat ik verder buiten beschouwing. Een artistieke impressie van de Hadeïsche aarde moet hier maar volstaan (afb. 2).

Vorming van de maan

Het tijdstip van de maanvorming staat nog steeds ter discussie. De ene groep onderzoekers prefereert een ontstaan binnen 100 miljoen jaar na de vorming van het zonnestelsel. Anderen komen juist uit op een latere botsing, tussen 150 en 200 Ma na de vorming van het zonnestelsel. Laten we als tijdstip maar 4,45 Ga geleden aanhouden, het gemiddelde. Hierbij moet gesteld worden dat de maan van groot belang is voor het leven op aarde. Denk alleen maar aan de stand van de maan en de werking van de getijden. De jonge maan stond destijds veel dichterbij de aarde en de getijdenwerking liep daarbij op tot zeven keer per etmaal. De maan zorgt er bovendien voor dat de aardas niet zo erg schommelt. Zonder maan zou de aardas veel chaotischer schommelen, zoals dat bij Mars het geval is.

Ten slotte speelt de kwestie van wat als “de fineerlaag” (“Late Veneer”) bekend staat. Dit betreft een veronderstelde finale toevoeging van massa aan maan, aarde en Mars door grote inslagen met asteroïden en chondritische meteorieten afkomstig uit de buitenste delen van het zonnestelsel. Dit, nadat de planeetkernen gevormd waren. Deze inslagen, qua timing ergens tussen 4,50 en 4,48 Ga, zouden 0,5-1% hebben toegevoegd aan de aardmassa. Een belangrijk argument voor deze late inslagen is het feit dat er siderofiele elementen in korst en mantel aanwezig zijn die anders niet verklaard kunnen worden. Bovendien voegden chondrietten lichte bestanddelen toe als water, stikstof en koolstof. Kortom, onze oceanen zouden vooral een late toevoeging zijn.



▲ Afb. 3. Ligging van de Acasta Gneiss in Noordwest-Canada.

Daarna, vanaf ca. 4,450 Ga is het afgelopen met de zwaarste inslagen, zodat de aarde in rustiger vaarwater komt en de mogelijkheden voor het ontstaan van leven gunstig worden. De Acasta gneiss zal pas een paar honderd miljoen jaar later gevormd worden.

¹ Een siderofiel (ijzerminnend) element is een chemisch element dat zich niet goed met zuurstof of zwavel verbindt, maar wel goed oplosbaar is in vloeibaar ijzer.

Het Acasta Gneiss Complex

Het Acasta Gneiss Complex (AGC) is de officiële naam voor de gesteenteserie waarvan de Acasta gneis het oudste onderdeel vormt. Zoals de naam al aangeeft, gaat het om een uiterst complexe associatie van meervoudig gedeformeerde en gemetamorfoseerde mafische tot felsische gneisgroepen. De naam is ontleend aan de Acasta-rivier, in de uiterst dunbevolkte Canadese Northwest Territories (afb. 3), waarlangs deze gesteenten ontsloten zijn. Om er te komen, kun je je het beste door een watervliegtuig laten afzetten vanuit Yellowknife, het dichtstbijzijnde stadje, dat 300 km zuidelijker ligt.



▲ Afb. 4A. Een ontsluiting van sterk geplooid Acasta Gneiss aan de oever van de Acasta rivier. Op de voorgrond Prof. Thomas Chacko (Univ. of Alberta). Foto door Anni Bauer. Beide onderzoekers werkten mee aan het boek "Earth Oldest Rocks". Bron: www.travelinggeologist.com/2014/10/acasta-gneiss-with-annie-bauer/.

Afb. 4B. Ontsluiting van Acasta Gneis op een eilandje in de Acasta rivier. Dit is vrijwel dezelfde locatie als waar het destijds door Bowring gemonsterde oudste gesteente vandaan komt. Foto door Dustin Trail (New York), beschikbaar gesteld via de Gigapan website.

Het AGC vormt de kern van een opwelling van de diepere ondergrond en beslaat een oppervlak van ruim 1000 km². Stratigrafisch boven het AGC volgen jongere, maar nog steeds zeer oude gesteenten van uiteenlopende samenstelling (waar ik in dit artikel geen verdere aandacht aan besteed). De alleroudste delen van het AGC, zoals de hier besproken Acasta gneis, zijn beperkt tot een voorkomen van ca. 3x3 km, aldus Wouter Bleeker (afb. 4A,B). Het merendeel van het gneiscomplex bestaat uit orthogneis, wat aangeeft dat het oorspronkelijke gesteente een stollingsgesteente was. De gneisen worden doorsneden door diverse generaties granitische intrusieplaten en -gangen. Gesteenten van verschillende ouderdom en

samenstelling kunnen binnen één ontsluiting gewoon naast elkaar liggen door die intensieve menging gedurende meerdere tektonische en metamorfe fasen.

Het AGC maakt deel uit van het zgn. Slave Craton. Een kraton is de geologische term voor een samenhangend geheel van Precambrische gesteenten dat zich sinds ten minste de laatste 700 miljoen jaar als een stabiele eenheid gedraagt. Kortom, bij jongere plaattektonische processen zijn kratongesteenten niet verder gedeformeerd.

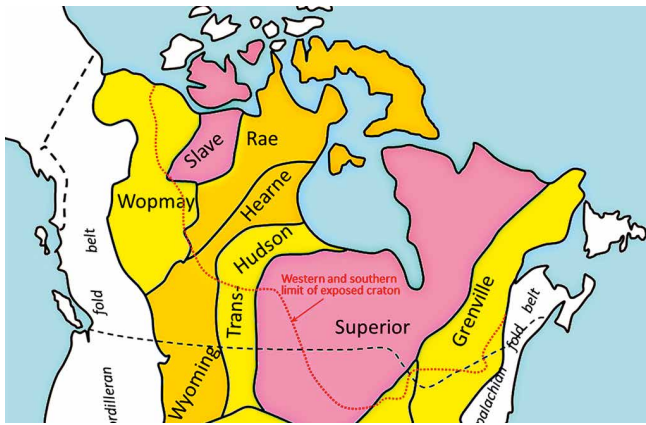
Het Slave Craton is ca. 500x700 km groot en maakt deel uit van een veel grotere serie oude gesteenten die samen het Canadese Schild vormen (afb. 5). Het Slave Craton wordt door grote breuksystemen van de omringende eenheden gescheiden. Het is niet het enige kraton binnen het Canadese Schild; er worden ten minste vier andere onderscheiden. Daarvan is het Superior Craton ongeveer even oud als het Slave Craton. Pas veel later, tussen 2 en 1,8 miljard jaar geleden, zijn de verschillende kratons samengevoegd tot het Noord-Amerikaanse continentblok Laurentië (afb. 5).

Beste archief van de aardkorst

Er is veel gediscussieerd over de vraag of het lood afkomstig uit het uiteenvallende uranium wel in het originele zirkoonkristaldeel bewaard zou blijven. Men is er steeds van uitgegaan dat het vervalsysteem niet aangetast wordt, omdat zirkoon bij kristallisatie uit de smelt wel uranium in zijn kristalrooster opneemt, maar geen lood. De verhouding U-Pb is dan dus maatgevend voor de ouderdom. Maar, omdat mogelijk stralingsschade door de vrijgekomen alfa-deeltjes het systeem minder gesloten zou kunnen maken, bleven er gezien de gevonden hoge ouderdommen wel twijfels bij sommige onderzoekers.

Inmiddels is dit probleem uit de wereld geholpen dankzij zeer nauwkeurig onderzoek door de inzet van "atom-probe tomography", waarmee waarnemingen op atomaire schaal worden gedaan. John Valley en collegae (2014) gebruikten voor dit onderzoek het alleroudst gedateerde zirkoonkristal ter wereld ($4,374 \pm 0,006$ Ga; afb. 7C). Ze telden en lokaliseerden de positie van individuele loodatomen ten opzichte van het moeder-uranium in dit oudste zirkoonkristal. Dit was een ingewikkeld en tijdrovend proces, maar zo konden ze nagaan of er door latere geologische gebeurtenissen schade is toegebracht aan het kristal en de ouderdomsbepaling in dat geval dus feitelijk onjuist zou zijn.

Dit zirkoonkristal heeft namelijk wel het nodige meegeemaakt. Het is afkomstig uit een metamorf sediment van ca. 3 miljard jaar oud (afb. 8). Het is ver daarvoor door verweering en erosie losgemaakt uit het oorspronkelijke gesteente, door water getransporteerd, in het sediment opgenomen, diep begraven, opgebakken onder flinke druk en temperatuur en later weer aan het oppervlak gekomen in wat nu de Jack Hills van West-Australië heet (afb. 7B,C). En, hoera voor de onderzoekers, de loodatomen bleken inderdaad te clusteren bij de uraniumatomen en wel binnen slechts enkele nanometers, wat wil zeggen dat het om een gesloten systeem gaat. Deze waargenomen heterogeniteit is zo gering dat de ionenmicroprobe, die binnen het kristal een oppervlak van rond 20 micrometer aftast bij 1-5 micrometer diepte, daar geen hinder van ondervindt. Kortom, zirkonen vormen het beste archief van de aardkorst (Bowring, 2014).



▲ Afb. 5. Overzichtskarte van Noord-Amerika met de Precambriëse kratongebieden waaruit het Paleozoïsche continent Laurentië is opgebouwd. Deze kratons hebben verschillende ouderdommen, waarbij het roze gekleurde Slave en Superior Craton het oudst zijn en de lichtgele het jongst. De witte gebieden zijn toevoegingen jonger dan 700 Ma. De kratongebieden ten zuiden van de rode stippellijn worden afgedekt door jongere afzettingen. Figuur afkomstig uit: opentextbc.ca/geology/chapter/21-1-geological-history-of-canada/

De oudste gneis in het Slave Craton is pas in de 80er jaren van de vorige eeuw bemonsterd tijdens veldwerk door de Canadese Geologische Dienst. Wouter Bleeker vertelde dat de locatie eigenlijk een toevalstreffer is. De geologen hadden hun tent naast de ontsluiting opgezet. Met een ouderdom tot 4,03 miljard jaar vertegenwoordigt deze gneis nog steeds het oudst bekende korstfragment op aarde! Het gesteente is tonalitisch, wat betekent dat het een tamelijk grof kristallijn dieptegesteente is, rijk aan kwarts en plagioklaas. Het is vrij donker van kleur, met veel amfibool, maar wordt afgewisseld met lichtere banden van deels granitische samenstelling. Als je goed kijkt, zie je sterke verplooiing in deze lichtere banden, zoals bijvoorbeeld helemaal bovenaan (afb. 6 en de voorplaat). Ook zijn er afzonderlijke granitische elementen. De verschillende niveaus blijken dan ook verschillende ouderdommen op te leveren.



▲ Afb. 6. Het stuk Acasta gneis zoals nu aanwezig in Geologisch Museum Hofland. De complexe geschiedenis van dit gesteente blijkt o.a. uit de in vlakke plooiën gerangschikte kwartsrijke witte bandjes boven in de foto en de uit elkaar getrokken en verplooid granitische fragmenten in het midden.

Ouderdomsbepaling

Voor de radiometrische datering van oude gesteenten meet men vooral de uranium/lood (U/Pb)-verhouding in de zirkoonkristallen ($ZrSiO_4$) uit het betreffende gesteente. Zirkoon neemt tijdens vorming kleine hoeveelheden uranium en thorium op, naast evt. ook andere zeldzame elementen, maar juist geen lood. De halfwaardetijd van U-238 is 4,47 Ga, die van U-235 is 704 Ma. Op diverse websites is het nodige over deze dateringsmethodiek te vinden (zie onder 'Referenties en meer lezen').

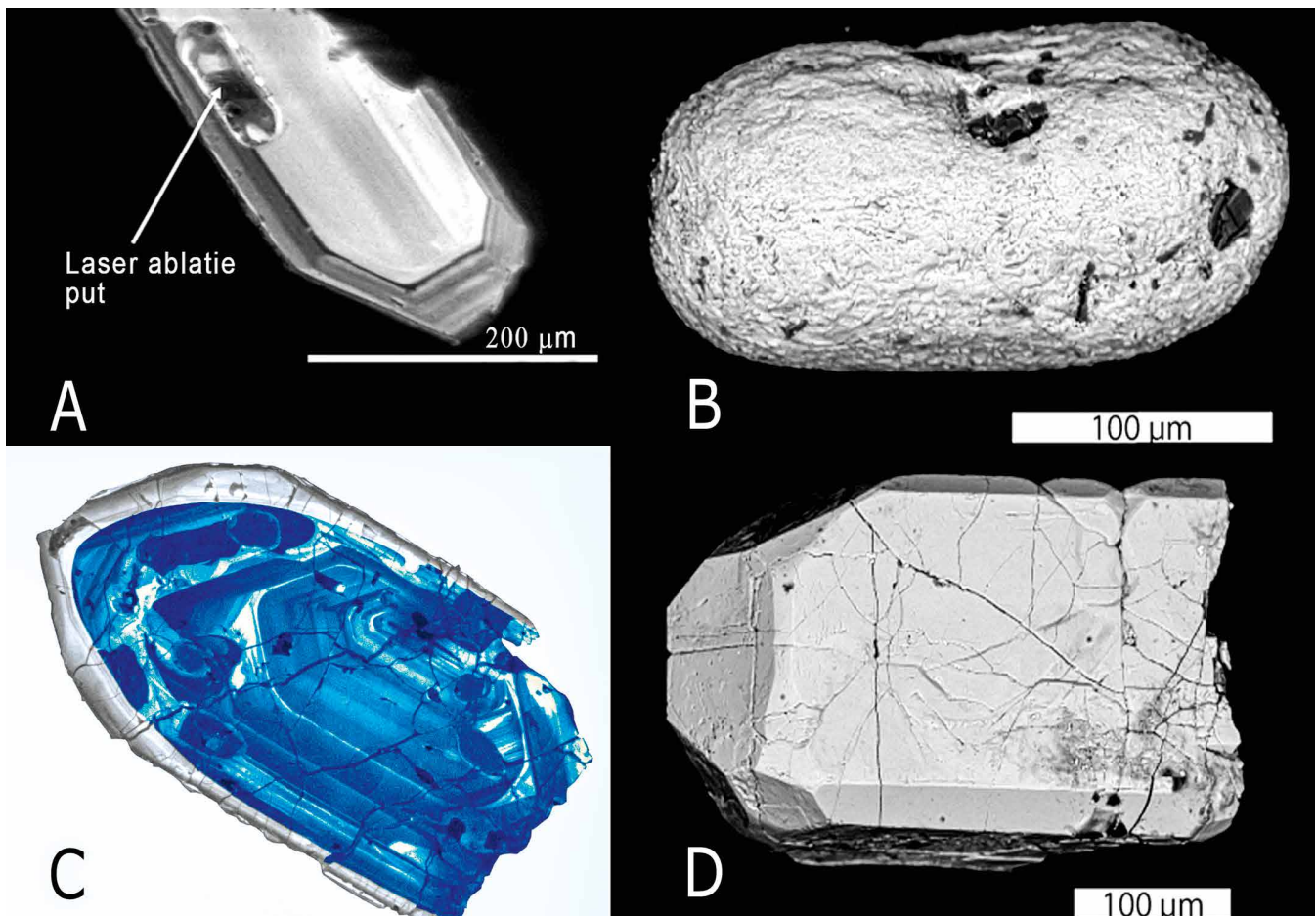
Voor betrouwbare dateringen moet het kristal wel een gesloten systeem zijn gebleven. Zirkoon is zo ongeveer het enige mineraal in stollingsgesteenten dat in staat is om binnen het kristal het oorspronkelijke U-Pb isotopensysteem vast te houden, zodat daarmee de oorspronkelijke tijd van vorming bepaald kan worden, ook bij evt. latere metamorfoses van het moedergesteente. Bij latere metamorfoses zal het kristal wel verder groeien, maar dat is zichtbaar als een soort groeiringen (afb. 7C). Zo zijn ook de ouderdommen van die nieuwvormingen te bepalen. Om de eerste kristalvorming te meten, moet dus de oudste kern worden opgezocht. Dat meten gebeurt tegenwoordig met uiterst geavanceerde ionenmicroprobes. Voor meer informatie over deze kostbare meetapparatuur, zie onder 'Referenties en meer lezen' en het artikel over zirkoon elders in dit nummer.

Bij de datering van een orthogneis, zoals deze Acasta gneis, wordt de ouderdom bepaald door de gevonden kristallisatiedatum van het stollingsgesteente dat ooit het niet-gemetamorfoseerde equivalent (het oorspronkelijke stollingsgesteente) was. In de praktijk moet dus worden bepaald welk van de gedateerde zirkoongeneraties uit een oorspronkelijk magma is gekristalliseerd. Op micrometerschaal zoekt men met de microprobe de ongestoorde zones in vooral de kleine en minst vergroeide zirkoonkristallen.

De Acasta gneis gedateerd en geïnterpreteerd

De vindplaats van de oudste gneis was dus een toevalstreffer. Vervolgens bleef het monster een jaar of vijf op de plank liggen bij de Amerikaanse onderzoeker Sam Bowring. Pas nadat uit een voorlopige datering bleek dat het om een oude gneis moest gaan, waarschijnlijk wel 3,5 Ga, werd het onderzoek serieuzer aangepakt.

In diezelfde tijd werd in Australië een geavanceerdere massaspectrometer gebouwd met spectaculaire resultaten: de SHRIMP: Sensitive High Resolution Ion Microprobe. Met dit instrument kan de opgewekte ionenbundel van 30 micron zich richten op uitsluitend het niet door latere herkristallisatie omgezette oudste deel van een zirkoon. Sam Bowring zocht meteen samenwerking met de Australische collega's. Zo volgden in 1989 dateringen tussen 4,012 en 4,031 Ga (Bowring and Williams, 1999). Inmiddels had de Canadese Geologische Dienst ook besloten om intensiever geochronologisch onderzoek in het AGC te doen en zelf een SHRIMP gekocht. Omdat Wouter toch al veldwerk deed in het Slave Craton, besloot hij om dat AGC-gesteente ook maar eens te onderzoeken en dit samen met Richard Stern te dateren. Kortom, vrijwel tegelijkertijd werkten twee groepen onderzoekers aan dit materiaal. Daarbij bleek monster BNB-95-103, waarvan



▲ Afb. 7. Een samenstelling van diverse opnamen van zeer oude zirkoonkristallen uit de West-Australische Jack Hills Formation. Foto 7A is een zgn. backscatter-elektronenmicroscopiebeeld van een zirkoonkristal dat is onderzocht in de LA-ICPMS. Op de plek waar de laserbundel het kristal heeft afgetast en massa heeft verdampt voor verdere analyse blijft een putje achter. Bron: Geologyanli via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0. Ook foto's B en D zijn backscatter-elektronenopnames van detritische zirkonen met een ouderdom van ~4 Ga. De bovenste korrel is sterk afgerond door transport in stromend water, terwijl de onderste nog veel van de oorspronkelijke kristalvorm laat zien. Opname door Aaron Cavosie van materiaal uit de collectie van Prof. John Valley; NASA/publiek domein. Foto C is een kathodeluminescentiebeeld van het zirkoonkristal dat gebruikt is voor onderzoek met de "atom microprobe". Het kristal heeft een lengte van 400 micron (0,4 mm) en een ouderdom van 4,374 Ga. Opname door Prof. J. Valley, University of Wisconsin, NAI Annual Science Reports, 2014.

delen nu dus in Nederland zijn, het oudste gesteente te zijn, met zirkonen tot 4,03 Ga oud (Stern en Bleeker, 1998). Bowring (nu hoogleraar aan het prestigieuze Massachusetts Institute of Technology) had pech, want zijn onderzoek werd later gepubliceerd dan dat van Wouter. Het mooie is echter dat beide onderzoeken, met zowel verschillende monsters als instrumenten, toch dezelfde uitkomsten gaven. Bovendien werd duidelijk dat de Acata gneis meerdere fases van metamorfose heeft doorgemaakt, t.w. rond 3,75, 3,6 en 1,7 Ga geleden. Later zijn er ook nog metamorfefases van 3,96 en 2,95 Ga gevonden. Wouter benadrukt dat het merendeel van de Acata Gneiss 3,6 Ga oud is en dat de alleroudste korstdelen schaars vertegenwoordigd zijn in het complex. Desondanks vonden Japanse collega's bij een latere detaillering (Lizuka et al., 2006) een zirkoonxenocryst van 4,2 Ga. Die vondst wijst dus op interactie van Acata gneis met nog oudere Hadeïsche korst. De oudste niet omgewerkte zirkonen zijn uitgekristalliseerd in een magma van tonalitische tot granitische samenstelling. Over de samenstelling en het ontstaan van de oudste continentale korst bestaan overigens uiteenlopende opvattingen.

Nieuwe trends

Zirkonen zijn niet alleen van groot belang voor ouderdomsbepaling. Tijdens de kristalvorming kunnen insluitels en andere elementen worden opgenomen. Met geavanceerde geochemische technieken kan zo het nodige achterhaald worden over vroegere vormingsomstandigheden. In die alleroudste zirkonen komen insluitels voor van o.a. kwarts, kaliveldspaat, albitische veldspaat en muscoviet. Zulke zirkonen moeten in kiezelrijke magma's uitgekristalliseerd zijn, naar men aanneemt granieten (Hazen et al., 2014; Roberts en Spencer, 2015). Die granieten moeten voor het eind van het Hadeïcum alweer zijn gerecycled omdat er geen spoor meer van te vinden is. Denk bij ingesloten materiaal bijvoorbeeld ook aan grafiet, dat na een erosiecyclus kan zijn opgenomen bij omvorming. Koolstofisotopen kunnen mogelijk aanwijzingen geven voor de aanwezigheid van zeer vroeg leven. Leven is niet denkbaar zonder water. Inmiddels bestaat er brede consensus dat de tot 4,4 Ga oude zirkonen uit de al genoemde metaconglomeraten van Jack Hills wijzen op de aanwezigheid van water aan het aardoppervlak. De oudste sedimenten van ZW-Groenland (Isua) verschijnen rond 3,85 Ga. Deze gesteenten bevatten koolstofisotopen

die het aannemelijk maken dat fotosynthese toen al bestond, aldus Wouter Bleeker.

Wouter gaf me inzage in een lopend Amerikaans onderzoeksvoorstel waarin hij ook participeert en waarin sterk wordt aangedrongen op grootschalig onderzoek van Hadeïsche zirkonen. Wereldwijd blijken er nu zestien locaties bekend te zijn met bewezen zirkonen ouder dan 4,1 Ga. Maar die vormen een gering procentueel aandeel van het aantal gemeten zirkonen (0,5–3%). Er moeten enkele tienduizenden zirkonen worden geanalyseerd, is de schatting.

Grootschalig naar zirkonen speuren kan tegenwoordig met de LA-ICPMS techniek (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer; afb. 7A). Met deze apparatuur kan U-Pb chronologie bovendien rechtstreeks gekoppeld worden aan andere isotopenanalyses binnen hetzelfde kristal. De verwachting is dat op deze manier meer bekend zal worden over de aard en eventuele geschiktheid voor beginnend leven van de laat-Hadeïsche aarde.

Al lezend in dit onderzoeksvoorstel ontstaat bij mij de indruk dat het klassieke beeld van een helse Hadeïsche aarde kantelt richting een aarde waar al vrij vroeg een hydrosfeer aanwezig was en felsische korst was gevormd, inclusief granieten. En waarbij mogelijk al een basale vorm van plaattektoniek op gang kwam. Al was er dan nog geen platentektoniek van het type zoals wij die nu kennen, er heerste een geodynamisch systeem waardoor korst begraven en omgewerkt kon worden.

Wanneer ontstond de huidige plaattektoniek?

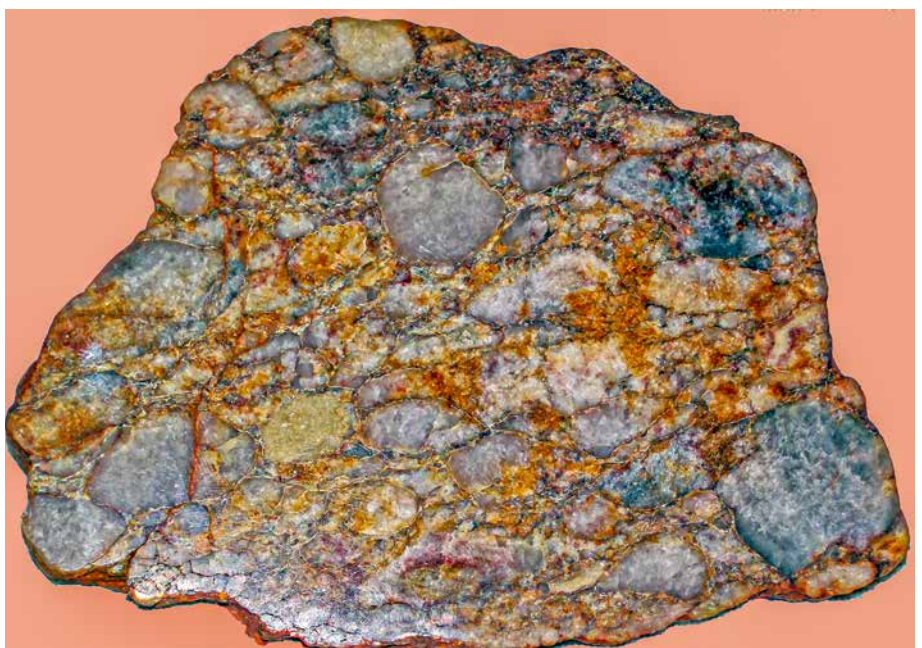
De aarde is een unieke planeet door de combinatie van leven op de aarde, de aanwezigheid van oceanen en plaattektoniek. Begrijpen van het hoe en waarom plaattektoniek is ontstaan, is nog altijd problematisch. Eén van de lopende kwesties gaat dan ook over de dynamiek van de Hadeïsche mantel en wanneer de plaattektoniek op gang komt. De meningen lopen uiteen.

Plaattektoniek in strikte zin houdt in dat subductie van oceanische korst plaatsvindt, zodat lithosfeergesteenten terugkeren naar de mantel, waar vervolgens uitwisseling en omzetting van materialen plaatsvindt. Oceanische korst die ouder is dan 30 miljoen jaar is 1% dichter dan de wekere asthenosfeer daaronder en zal dus op zeker moment verzinken. Dit drijft in principe de plaattektoniek aan, waarbij ook water met sediment een belangrijke rol speelt als begeleidend medium. Heel vroeger zullen er door andere (hogere) korst- en manteltemperaturen andere dichtheden geweest zijn en kan het allemaal anders zijn geweest. De recycling van moderne oceanische korst

verloopt dankzij de plaattektoniek zo efficiënt dat bijna alle oceanankorst minder dan 200 miljoen jaar oud is.

Het is goed om je daarbij te realiseren dat er door omwerking van korst nog maar weinig over is van de oudste gesteenten. Al met al maakt dat het nagaan wanneer subductie van het type zoals we dat nu in werking zien, is begonnen, er niet makkelijker op. Een vrij algemene opvatting is dat dit pas in het late Archeïcum tot stand komt. Dit zie ik bevestigd door een heel recent onderzoek, dat is uitgevoerd op basis van de frequentieverdeling en spreiding in de tijd van meer dan 450.000 wereldwijd verzamelde ouderdommen van detritische zirkonen (Reimink et al., 2021). De auteurs concluderen dat continentale korst door de aardgeschiedenis heen in pulsen groeide. Botsende continentale korst levert vulkanisme en recycling met vorming van zirkonen en daarbij gebergtevorming. Hoe meer continentale korst boven zeeniveau komt, hoe meer afbraak. Vanaf het Neoarcheïcum (2,8 Ga) komen continenten pas op grotere schaal boven zeeniveau.

Laten we eens kijken wat gegevens over zeer oude, maar niet heel scherp te dateren gesteenten in de provincie Quebec (Caro et al., 2017) vertellen. Ook Wouter werkte mee aan dit onderzoek. Eén van de conclusies is dat de eerst gevormde korst uit de magmaocean lange tijd in rust bleef voordat deze verzonk en omgewerkt werd tot de vulkanische producten die onderzocht werden. De auteurs hebben de indruk dat hetere interne temperaturen de stabilisatie van Hadeïsche korst niet verhinderde. Wel verminderden ze de efficiency van recycling van de lithosfeer ten gunste van een slomere tektonische stijl. Plaattektoniek kan je dit niet noemen. Deze trage tektoniek door een nog niet in platen opgedeelde korst wordt wel vergeleken met een deksel op een hete pan ('single lid tectonics', Stern, 2018).



▲ Afb. 8. Foto van een metamorf kwartsconglomeraat uit de Jack Hills Formation, gedateerd tussen 2,65 en 3,05 Ga. Uit dit soort klastische afzettingen zijn de oudste zirkonen op aarde afkomstig, getoond in afb. 7C. Foto door James St. John, CC BY-SA 2.0.

mantelpluim het opbreken begeleidde. Mits je een goede set nauwkeurige ouderdommen hebt van zulke gangen-complexen, aangevuld met bijvoorbeeld paleomagnetische gegevens, kun je proberen om de randen van daarna uiteengedreven continentblokken te matchen. Inmiddels komen ze al aardig ver met het reconstrueren van het bestaan van Precambrische supercontinenten. De laatste jaren gebeurt dit onderzoek binnen het kader van een werkgroep 'Supercontinent Reconstructie'. Zo zijn er de namen voor Rodinia (1,0-0,7 Ga), Nuna (of Columbia, 1,8-1,3 Ga) en Kenorland (Laat-Archeïcum-2,0 Ga).

Je vraagt je af hoe deze aanpak zich verhoudt met de moderne plaattektoniek van Stern. Immers, voor het groeperen en later weer uiteenvallen van continenten heb je toch ten minste een vorm van plaattektoniek nodig? Wouter denkt er dan ook iets anders over. Zijn mening komt erop neer dat de studie van die oude kratonconfiguraties onmiskenbaar aangeeft dat korstdelen bewogen over de aardbol, elkaar soms ontmoetten en weer opbraken. Hij noemt het dan ook "plate tectonics-like" met oceanische lithosfeer die werd gerecycled en materiaal uitwisselde met de bovenmantel. Maar dan net op een wat andere manier.

Nawoord en leessuggesties

Allereerst wil ik Wouter Bleeker hartelijk danken voor de bereidwilligheid om materiaal af te staan en enkele van zijn artikelen mee te sturen.

De echte liefhebbers van onderzoeksresultaten van de oudste gesteenten verwijs ik naar het recente boek *Earth Oldest Rocks* (zie onder 'Referenties en meer lezen'). Het geeft een dieper inzicht in de complexe materie van meer dan een miljard jaar magmatische beïnvloeding van o.a. deze oeroude Acasta-korst. Goede info over zirkoondatering is te vinden op de website van het American Museum of Natural History, ontleend aan het boek *Earth: Inside and Out*.

Referenties en meer lezen

- Bleeker, W., 2003. The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces. *Lithos*, 71: 99-134.
- Bowring, S.A., Williams, I.S., 1999. Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 3-16.
- Bowring, S.A., 2014. Closing the gap. *Nature Geoscience*, 7, news and views, p. 169-170.
- Caro, G., Morino, P., Mojzsis, S.J., Cates, N.L. & Bleeker, W., 2017. Sluggish Hadean geodynamics: Evidence from coupled ^{146}Sm - ^{142}Nd systematics in Eoarchean supracrustal rocks of the Inukjuak domain (Québec). *Earth and Planetary Science Letters*, 457: 23-37.
- Ernst, R.E., Bleeker, W., Söderlund, U., & Kerr, A.C., 2013. Large Igneous Provinces and supercontinents: Toward completing the plate tectonic revolution. *Lithos*, 174: 1-14.
- Hazen, R.M., Papineau, D., Bleeker, W., Downs, T.T., Ferry, J.M., McCoy, T.J., Sverjenski, D.A. & Yang, H., 2008. Mineral evolution. *American Mineralogist*, 93: 1693-1720.
- Lizuka, T., Horie, K., Komyia, T., Maruyama, S., Hirata, T., Hidaka, H. & Windley, B.F., 2006. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 34 (4): 245-248.

- E.A. Mathez, "Earth: Inside and Out". Uitg. 2000 New Press: www.amnh.org/learn-teach/curriculum-collections/earth-inside-and-out/zircon-chronology-dating-the-oldest-material-on-earth.
- Van Kranendonk, M.J., Bennett, V.C. & Hoffmann, J.E. (Eds.), *Earth Oldest Rocks*, 2018, 1112 p. Uitg. Elsevier Science.
- Mojzsis, S.J., Cates, N.L., Caro, G., Trail, D., Abramov, O., Guitreau, M., Blichert-Toft, J., Hopkins, M.D. & Bleeker, D., 2014. Component geochronology in the polyphaser ca. 3920 Ma Acasta Gneiss. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 133: 68-96.
- Reimink, J.R., Bauer, A.M., Chacko, T., 2019. The Acasta Gneiss Complex. In: Van Kranendonk, M.J., Bennett, V.C. & Hoffmann, J.E. (Eds.), *Earth Oldest Rocks*, Elsevier, p. 329-347.
- C.W. Passchier. (2005). De Precambrische Aarde - een verre, vreemde wereld. *Gea*, 38(1), 1-8. Online lezen via <https://natuurtijdschriften.nl/pub/415350>.
- Reimink, J.R., Davies, J.H.F.L. & Lelpi, A., 2021. Global zircon analysis records a gradual rise of continental crust throughout the Neoproterozoic. *Earth and Planetary Science Letters*, 554. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116654>.
- Roberts, N.M.W. & Spencer, C.J., 2015. The zircon archive of continent formation through time. In: Roberts, N. M. W., Van Kranendonk, M., Parman, S., Shirey, S. & Clift, P. D. (eds), *Continent Formation Through Time*. Geological Society, London, Special Publications, 389, 197-225.
- Stern, R.A. & Bleeker, W., 1998. Age of the world's oldest rocks refined using Canada's SHRIMP: The Acasta Gneiss Complex, Northwest Territories, Canada. *Geoscience Canada*, 25 (1): 27-31.
- Stern, R.J., 2018. The evolution of plate tectonics. *Phil. Trans. R. Soc. A376*: 20170406. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0406>
- Valley, J.W., Aaron, J., Cavosie, A.J., Ushikubo, T., Reinhard, D.A., Lawrence, D.F., Larson, D.J., Clifton, P.H., Kelly, T.F., Wilde, S.A., Moser, D.E. & Spicuzza, M.J., 2014. Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. *Nature Geoscience* 7: 219-223.
- Wang, Q. & Wilde, S.A., 2018. New constraints on the Hadean and Proterozoic history of the Jack Hills belt, Western Australia. *Gondwana Research*, 55: 74-91.

Internet

- Meer over zirkoondatering: https://en.wikipedia.org/wiki/Detrital_zircon_geochronology
- Meer over de ionenmicroprobe: https://en.wikipedia.org/wiki/Sensitive_high-resolution_ion_microprobe
- Meer over het oudste zirkoonkristal ter wereld en bijbehorende uitkomst: www.abc.net.au/science/articles/2014/02/24/3950076.htm (News in Science, 2014)
- Meer over de vroegste aarde en het belang van isotopenonderzoek: <https://wibnet.nl/heelal/zonnestelsel/aarde/meteorieten-gaven-aarde-eerstehulp>
https://nl.wikipedia.org/wiki/Geschiedenis_van_de_Aarde#
- Meer over het begin van de plaattektoniek: www.earthmagazine.org/article/when-and-how-did-plate-tectonics-begin-earth