

# Mantelpluimen, plateaubasalten, ijzerformaties en plaattektoniek

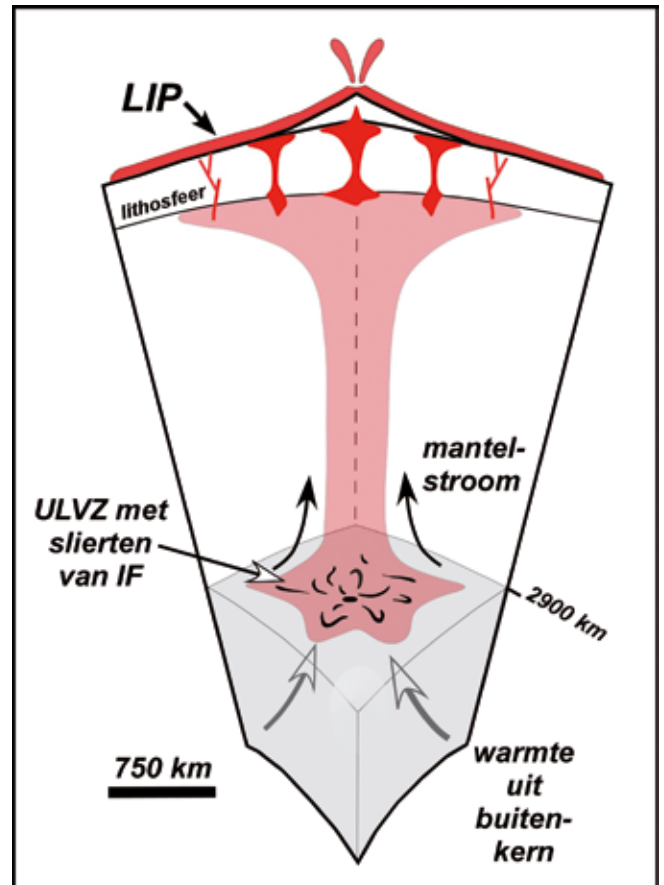
door Frank Beunk, Aardwetenschappen VU  
f.f.beunk@vu.nl

Door (een groot deel van) de aardgeschiedenis heen versleepte plaattektoniek de continenten van hot naar her. De aarde is de enige planeet in ons zonnestelsel met plaattektoniek, vanwege het ontbreken van oceanen op de andere rotsachtige planeten - zonder water geen plaattektoniek, een verhaal op zichzelf. Maar wat initieerde de plaattektoniek, en wanneer?

We weten sinds de jaren '60 van de 20<sup>e</sup> eeuw dat (oceanische) platen ontstaan langs de mid-oceanische ruggen (MORs) en weer verdwijnen in subductiezones. Sinds die jaren vormt plaattektoniek het belangrijkste wetenschappelijke kader voor de beschrijving van uiteenlopende geologische fenomenen, zoals de locaties van vulkanen langs de MORs en boven subductiezones, en die van aardbevingshaarden, de morfologie van de oceaانبodem, en de vorm, ligging en ouderdommen van gebergteketens. Later bleek dat subducerende platen onder invloed van de zwaartekracht vaak helemaal naar de bodem van de aardmantel naar beneden vallen, tot op de kern-mantelgrens op 2900 km diepte. Plaattektoniek blijkt slechts de oppervlaktecomponent te zijn van manteldiepe convectiestromen van de vaste aarde, gedreven door het grote temperatuurverschil, ruim 4000 graden, tussen de kern-mantelgrens en het aardoppervlak (Beunk, 2023a).

## Driedimensionale structuur van mantelconvectie

Als platen omlaag vallen, moet er ook weer iets omhoog komen. De bekende Engelse geoloog Sir Arthur Holmes kwam al in 1919 met de theorie dat continentverschuiving gedreven werd door opstijgende mantelstromingen die het aardoppervlak raakten en zich daar splitsten in twee symmetrische takken die horizontaal in tegenovergestelde richting afbogen. In het plaattektonisch model vormen de continenten een onderdeel van grotere platen die uiteen bewegen vanaf de mid-oceanische ruggen. Een blik op de wereldkaart roept direct vragen op over het idee van symmetrische convectiecellen onder de MORs; de oceanische ruggen worden immers om de haverklap zijdelings verzet door honderden kilometers lange dwarsverschuivingen, de 'transformbreuken'. Zouden de onderliggende 3D-convectiecellen dan ook zo gesegmenteerd zijn? Dat is onwaarschijnlijk, want het impliceert dat de mantel zou convecteren d.m.v. diep stekende maar smalle convectiecellen die zijdelings t.o.v. elkaar zijn verschoven, als evenwijdige fietswielen met assen die niet in elkaar verlengde liggen.



▲ Afb. 1. Schematisch beeld van een hete mantelpluim (lichttroze) die van de kern-mantelgrens opstijgt. Onderin wortelt de pluim in een enkele honderden kilometers dikke zogeheten D"-laag ('D-double-prime'). In de onderste ca. 10 km daarvan hebben seismologen een laag met abnormaal lage voortplantingssnelheden van de seismische golven (ULVZ=Ultra-Low Velocity Zone) geïdentificeerd, waarschijnlijk ten gevolge van het gedeeltelijk smelten van de D"-laag. De ULVZ bevat mogelijk slierten van vroeger gesubduceerde ijzerformaties (IF), die de warmteoverdracht vanuit de ijzernkern bevorderen. Waar de pluim de onderkant van de lithosfeer (=de tektonische plaat) raakt, verbreedt hij zich tot een paddenstoel met een diameter tot 1000 km en raakt gedeeltelijk gesmolten (rood) tot basaltmagma's (zie Beunk, 2023a). De lava's hiervan erupteren over een groot gebied en vormen daar zgn. plateaubasalten, een LIP=Large Igneous Province. Bron: naar Keller et al., 2023.



▲ Afb. 2. Het versneden basaltplateau van de Deccan Traps in Noordwest India (afb. 3). De stapel horizontale lava's is tot 2 km dik en is afkomstig van de hot spot die nu onder het vulkanische eiland Réunion ligt, in de Indische Oceaan. De 66 miljoen jaar oude Deccan Traps ontstonden toen India noordwaarts richting Azië schoof en getroffen werd door de paddenstoelvormige kop (afb. 1) van de mantelpluim onder Réunion. Bron: Nicholas via Wikimedia Commons CC BY-SA 2.5.

Tegenwoordig overheerst het idee dat de opwaartse stroming gedomineerd wordt door zgn. mantelpluimen, waarin heet gesteente vanaf de kern-mantelgrens opstijgt (Morgan, 1972), vergelijkbaar met hete lucht in een schoorsteen (afb. 1). Aan het aardoppervlak manifesteren de pluimen zich o.a. als plateaubasalten (Eng. 'traps', of *Large Igneous Provinces*, LIPs), gebieden van honderden tot duizenden vierkante kilometers met relatief kortdurend maar intensief basaltvulkanisme (afb. 2). Zo waren de gassen (CO<sub>2</sub> en SO<sub>2</sub>) uit basalten van de Siberische *Traps* (afb. 3) verantwoordelijk voor de grootste biologische crisis ooit, het massale uitsterven op de overgang van Paleozoïcum (Perm) naar Mesozoïcum (Trias), ca. 251 miljoen jaar (Ma) geleden, ook wel bekend als de PT-extinctie, vooral omdat de magma's ondergronds in dikke Carbonische koollagen intrudeerden, die verbrandden en daarmee een enorm atmosferisch (CO<sub>2</sub>-)broeikaseffect en verzuurde oceanen veroorzaakten.

### Begin van plaattektoniek

Sinds zijn ontdekking, bijna 60 jaar geleden, is het nog altijd niet helemaal duidelijk hoe lang plaattektoniek al bestaat. Schattingen lopen ver uiteen, van het vroegste Hadaeïcum (>4 miljard jaar, Ga) tot sinds het late Precambrium, ca. 1 miljard jaar geleden; een meerderheid van de geologen houdt het begin van plaattektoniek op ca. 3 miljard jaar geleden. Het is niet alleen de vraag wanneer het proces begon, ook waarom de lithosfeer op enig moment in afzonderlijke platen uiteen brak! Speculaties lopen uiteen van meteorietinslagen, van buiten af, tot inwendige aardse processen, zoals mantelpluimen. Een andere suggestie was dat dikke sedimentpakketten op de oceanbodembodem, aan de randen van de continenten, door hun gewicht een plaat kunnen doen breken. Eerdere berekeningen, o.a. door Utrechtse geofysici (Cloetingh et al., 1982), lieten echter zien dat de sedimenten die vandaag de dag op de continentranden worden afgezet niet zwaar

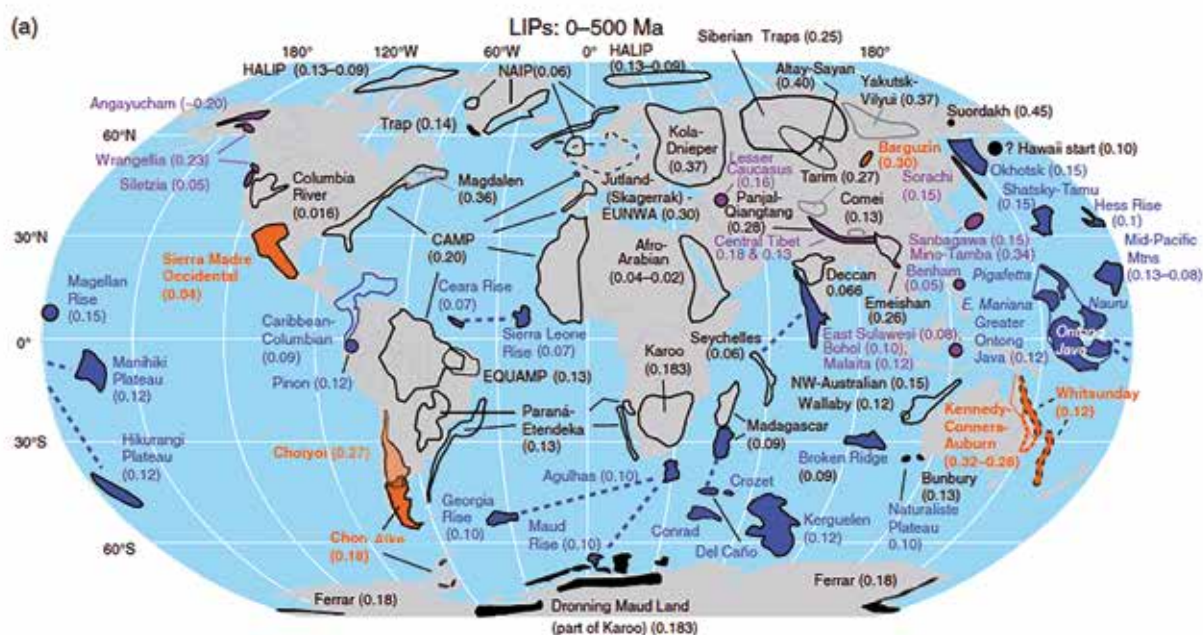
genoeg zijn om een plaat te breken. Zhang et al. (2023) suggereren nu dat het de zware ijzerformaties waren, in het Precambrium afgezet op de oceanbodembodem langs de continentranden, die de platen hebben doen breken. Deze gebande ijzerertsen, '*Banded Iron Formations*' (BIFs), ontstaan onder invloed van mariene bacteriën en vormen onze belangrijkste bron van ijzer (afb. 4, en Beunk, 2023b).

### Mariene biologie helpt plaattektoniek op gang

In de ondiepe (fotische) zone van de kust nabije zee leefden er in het Archaëicum (>2,5 Ga) onder een nog goeddeels zuurstofvrije atmosfeer bacteriën die hun energie direct uit zonlicht haalden d.m.v. anoxygene fotosynthese, zonder nog vrije zuurstof te produceren. Ook dreven er al de eerste zuurstofproducerende fotosynthetische algen rond. Hun nutriënten spoelden van de bestaande continenten de zee in. De bacteriën produceerden biomassa met behulp van oxidatie van opgelost tweewaardig ijzer (Fe<sup>2+</sup>), afkomstig van het land en van onderzeese vulkanische warmwaterbronnen, tot driewaardig, onoplosbaar ijzerhydroxide, door een reactie als deze ('anoxygene fotoferrotrofie'):



Hoewel er toen nog geen tektonische platen bestonden, en dus ook nog geen vulkanische mid-oceanische ruggen met hun talrijke heetwaterbronnen, kunnen we veilig aannemen dat de toenmalige aarde in hogere mate vulkanisch was dan de huidige, vanwege de hogere warmtestroom in het Precambrium, en de geleidelijke afkoeling van de aarde met de tijd. De ijzerhydroxiden, geproduceerd door reactie (1), sloegen samen met amorf kiezels (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O, 'geyseriet') neer als chemisch sediment. Ze ontwaterden tijdens diagenese (de verandering van ongeconsolideerd sediment in sedimentair gesteente)



▲ Afb. 3. '*Large Igneous Provinces*' (LIPs) gevormd in de laatste 500 miljoen jaar. Ouderdommen in fracties van 1 miljard jaar. Oceanische (donkerblauwe) en continentale (zwarte) plateaubasalten. Rode LIPs hebben een Si-rijke, andesitische tot rhyolitische samenstelling. Bron: Ernst et al., 2021.



▲ Afb. 4. BIF: Ca. 3,2 Ga oude gebande ijzerformatie, Pilbara-kraton, NW-Australië. De rode en grijze laagjes zijn ijzerrijk, de witte laagjes ertussen zijn chemische neerslagen van kiezel. Foto van de auteur.

onder vorming van magnetiet,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ ) en kwarts. Deze gebande ijzerformaties zijn 20%–40% zwaarder dan de lithosfeer vanwege hun hoge ijzergehalte, tot 40 gewichtsprocent. Ze drukten het oppervlak naar beneden, waardoor er uiteindelijk kilometers dikke sedimentbekkens langs de continentranden ontstonden, zoals het Hamersley Bekken in West-Australië. Een aannemelijke bacteriedichtheid in de vijftig meter dikke fotische zone van de oceaan kan in een paar miljoen jaar tijd alle BIFs van het Hamersley Bekken vormen.

Bij een afzettingssnelheid van 1 km BIF per miljoen jaar is er 9 miljoen jaar nodig om genoeg van deze zware sedimenten af te zetten om de lithosfeer langs de oude continentrand onder hun last te laten breken en zo de allereerste subductie van oceanische plaat op gang te brengen. Volgens dit model gebeurde dat tijdens de snelle afzetting van BIF in de periode 2,75–2,40 Ga, direct voorafgaande aan de eerste grote toename van het atmosferisch zuurstofgehalte, bekend als de ‘Great Oxidation Event’, van 2,4–2,3 Ga. Het ontstaan van subductiezones bracht ook grootschalige horizontale plaatbewegingen en continentverschuivingen op gang, zoals aangetoond door paleomagnetisch onderzoek aan 2,7–2,5 Ga oude continenten. Ook de snelle groei van de continentmassa in die periode is met het begin van plaattektoniek te verklaren; continenten groeien immers vooral door het vulkanisme boven subductiezones. De oudste betrouwbare resten van de divergente plaatgrenzen, de vulkanische (basaltische) mid-oceanische ruggen stammen eveneens uit die tijd.

### Vast patroon van BIFs en LIPs

BIFs hebben volgens Zhang et al. (2023) plaattektoniek op gang gebracht, nog vóór de Great Oxidation Event, die aan de hun vorming goeddeels een eind maakte (Beunk, 2023b). Er moet dan ook veel meer BIF zijn afgezet dan er tegenwoordig bewaard is gebleven. Het lot van de gesubduceerde BIFs is afhankelijk van hun soortelijk gewicht. Tegenwoordig zakken de gesubduceerde oceanische platen veelal naar de bodem van de mantel; de zware BIFs kunnen niet anders gedaan hebben, want door hun hoge ijzergehalten waren ze zwaarder dan normale mantelgesteenten, op elke diepte. Het jongste Archaeïcum (3,0–2,5 Ga) en het oudste Proterozoïcum (2,5–1,6 Ga) worden niet alleen gekenmerkt door wijdverbreide BIF-afzettingen maar ook door uitgestrekte continentale plateaubasalten, ‘Extremely Large Igneous Provinces’

(ELIPs), over oppervlakken tot wel 70 miljoen vierkante kilometer, ruim 2500 bij 2500 kilometer, als resultaat van wijdverbreid opsmelten van de mantel. Keller et al. (2023) vinden nu een opmerkelijke correlatie tussen de vorming van BIFs en ELIPs voor het tijdsinterval tussen 3,2 en 1,0 Ga: driekwart van de BIFs uit die periode worden  $241 \pm 15$  miljoen jaar later gevolgd door ELIPs, waarbij de ELIPs ook twee maal een tijdelijke toename in de frequentie van het optreden van BIFs volgen: Eerst neemt de BIF-activiteit toe, de ELIPs volgen dat patroon. De auteurs gingen eerst nog na of de 241 miljoen jarige cyclus van BIFs en LIPs te verklaren valt uit de cyclus van het herhaalde ontstaan en uiteenvallen van supercontinenten; die correlatie blijkt niet te bestaan.

### Platenkerkhof met BIFs

Onderin de huidige aardmantel, direct boven de kern-mantelgrens, bevinden zich twee grote, tot 1000 km dikke gebieden van continentale afmetingen met relatief lage seismische snelheden: de ‘Large Low Shear wave Velocity Provinces’ (LLSVPs), één onder zuidelijk Afrika en de Zuid-Atlantische oceaan en één onder de zuidelijke Pacific, aan de andere kant van de aardbol, 180 graden er vandaan. Die onder de Pacific is ca. 3000 km in diameter. Samen vormen zij zo’n 8% van het volume van de mantel en ca. 1% van de massa van de aarde als geheel; ze zijn 2 tot 3,5% zwaarder dan de normale mantel op die diepte (Yuan et al., 2023). De gangbare verklaring van de LLSVPs is dat van een ‘platenkerkhof’, restanten van oude, gesubduceerde oceanische platen. Onderin deze LLSVPs zit een niveau van ~5–15 km dikte met ultralage seismische snelheden, de ‘Ultralow Velocity Zones’ (ULVZs), geïnterpreteerd als zones met ca. 10% magma, in een overigens geheel vaste mantel, en maximaal 20% zwaarder dan de silikaatgesteenten van de diepe mantel. Keller et al. (2023) veronderstellen nu dat de zwaarte van de ULVZs komt van hun ijzerrijkdom, als gevolg van accumulatie van gesubduceerde BIFs (afb. 1). Eerder onderzoek had al een verband gelegd tussen ULVZs en de diepe wortels van mantelpluimen (afb. 1). Onder de druk en temperatuur van de diepste mantel wordt ijzeroxide metallisch en daarom sterk elektrisch en warmtegeleidend, door de verhoogde mobiliteit van elektronen in metalen.

Concentratie van ijzerformaties leidt zo tot wel 80% versterking van de warmteoverdracht van de buitenkern naar de LLSVPs aan basis van de mantel; die kunnen er wel 1000 graden warmer van worden dan de silikaatgesteenten van de normale mantel op die diepte; dat temperatuurverschil leidt tot het ontstaan van relatief hete mantelpluimen die tot boven in de mantel opstijgen en zo’n 240 miljoen jaar later de eruptie van plateaubasalten veroorzaken (afb. 1–3).

### Alternatief

Is hiermee het pleit nu beslecht? Zoals gewoonlijk niet. Anderen herleiden het ontstaan van de LLSVPs en daarmee van mantelpluimen en plateaubasalten, naar het meteorietbombardement dat de Aarde gedurende zijn eerste pakweg half miljard jaar trof, en in het bijzonder naar de ‘Big Splash’-theorie voor het ontstaan van de

Maan (o.a. Yuan et al., 2023). In die inmiddels gangbare theorie ontstond de maan uit het materiaal dat werd weggeslingerd bij de botsing van de vroege aarde met een protoplaneet, Theia, ter grootte van Mars, ongeveer 100 miljoen jaar na het ontstaan van het zonnestelsel. Op internet zijn hiervan verschillende animaties te vinden. Als gevolg van de botsing zou een deel van de mantel van Theia naar de bodem van de aardmantel zijn gezakt; latere mantelconvectie heeft dit materiaal vervolgens bijeengeveegd tot de twee antipodale LLSVPs; een ander deel van Theia's mantel vormde de maan. Beide zijn ijzerrijker dan de aardmantel en dus relatief zwaar. Een sterk argument voor de Theia-theorie is de sterke overeenkomst in de isotopenverhoudingen van de edelgassen helium, neon en xenon uit basaltlava's uit mantelpluimen (IJsland, Hawai'i, etc.) enerzijds en anderzijds uit de zonnewind, uit primitieve (zgn. chondritische) meteorieten en uit basalten van het maanoppervlak. De Theia-theorie biedt echter geen verklaring voor de vertraging van 240 miljoen jaar tussen de afzetting van BIFs en het uitvloeien van plateaubasalten gedurende het anderhalf miljard jaar durende Archaeïcum.

Het voordeel van de interpretatie van de LLSVPs als verzonken BIFs, de kern van dit artikel, is dat die ook de enigszins verlate start van plaattektoniek verklaart. Ten slotte maakt dit model het waarschijnlijk dat plaattektoniek op verschillende plaatsen en tijdstippen is ontstaan, en zich geleidelijk aan gedurende het Archaeïcum over de hele aarde heeft verbreid (Condie & Kröner, 2008).

## Algemene geologie

# Een paar vreemde stenen uit Zuid-Limburgs Maasgrind

door John W.M. Jagt, Serge Desutter & Lei Nelissen

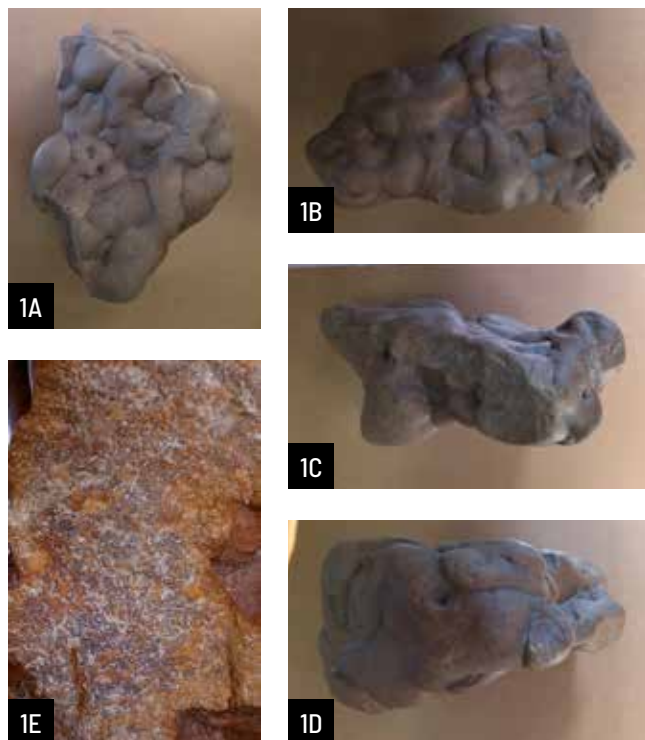
*john.jagt@maastricht; sergedesutter@gmail.com;*

*lei.nelissen@home.nl*

Al bijna een eeuw wordt er onderzoek gedaan aan zuidelijke zwerfstenen uit Pleistoceen Maasgrind in de provincie Limburg. Dat houdt in dat we er wel vanuit mogen gaan dat de meeste gesteentetypes en hun herkomstgebieden nu in kaart gebracht zijn. Desondanks komen er af en toe keien en keitjes tevoorschijn die de nodige vragen oproepen, met name over hun vorming en herkomst, en soms ook over hun ouderdom. Een aan de Maas bij Bichterweerd (Rotem, Belgisch Limburg) gevonden stuk wordt hier kort beschreven en vergeleken met twee andere keien uit Zuid-Limburgs Maasgrind en een steen uit Gelderland (Rijngrind), die veel gelijkenissen vertonen. Ook lösspoppetjes uit Pleistocene eolische afzettingen passeren kort de revue. Uiteraard hopen we op commentaar en tips van onze lezers en zien we meldingen van vergelijkbare vondsten graag tegemoet.

## Literatuur

- Beunk, Frank, 2023a. Warm van binnen. *GEA* 56(2), 4-7.
- Beunk, Frank, 2023b. Waar we ons ijzer vandaan halen: Precambrische gebande ijzerertsen (BIFs). *GEA* 56 (1), 23-27.
- Cloetingh, S.A.P.L., M.J.R. Wortel, N.J. Vlaar, 1982. Evolution of passive continental margins and initiation of subduction zones. *Nature* 297, 139-142; <https://doi.org/10.1038/297139a0>
- Condie, K.C., A. Kröner, 2008. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record. *Geological Soc. America, Special Paper* 440, 281-294; [https://doi.org/10.1130/2008.2440\(14\)](https://doi.org/10.1130/2008.2440(14))
- Ernst R.E., A.J. Dickson, A. Bekker (eds.), 2021. Large Igneous Provinces: A Driver of Global Environmental and Biotic Changes. *Geophysical Monograph* 255, First Edition. American Geophysical Union & John Wiley and Sons, Inc.; <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch1>
- Keller D.S., S. Tassara, L.J. Robbins, C.-T.A. Lee, J.J. Ague, R. Dasgupta, 2023. Links between large igneous province volcanism and subducted iron formations. *Nature Geoscience* 16, 527-533; <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01188-1>.
- Morgan, W.J., 1972. Deep mantle convection plumes and plate motions. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 56 (2), 203-215. <https://doi.org/10.1306/819A3E50-16C5-11D7-8645000102C1865D>
- Yuan Q., M. Li, S.J. Desch, B. Ko, H. Deng, E.J. Garnero, T.S.J. Gabriel, J.A. Kegerreis, Y. Miyazaki, V. Eke, P.D. Asimow, 2023. Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies. *Nature* 623; <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06589-1>.
- Zhang S., Y. Li, W. Leng, M. Gurnis, 2023. Photoferrothrophic Bacteria Initiated Plate Tectonics in the Neoproterozoic. *Geophys. Research Lett.* 50 (13); <https://doi.org/10.1029/2023GL103553>



▲ Afb. 1. De vondst (NHMM 2021 040) van Bichterweerd (Rotem), gedaan door één van ons (SD), in diverse aanzichten (A-D); het gewicht is circa 2,9 kg. Het detail (E) toont een fijne, iets schilferige grondmassa, bijna kwartsietisch van structuur, en zonder glimmerblaadjes. De grootste lengte, breedte en dikte van dit stuk zijn resp. 195, 130 en 100 mm. Foto's: J.W.M. Jagt.