

KARAKTER

TIJDSCHRIFT
VAN NUMMER 33 • 2011
WETENSCHAP
ACADEMISCHE STICHTING LEUVEN



De pil is vijftig

Het ontstaan van taalstructuur

De aardse kookpot

DRIEMAANDELIJKS/EERSTE TRIMESTER
ACADEMISCHE STICHTING LEUVEN
WILLEM DE CROYLAAN 6, BUS 2000
3001 HEVERLEE
AFGIFTEKANTOOR 8000 BRUGGE
1-2° AFDELING/P 309616



DE HAWAÏAANSE EILANDEN WORDEN GEZIEN ALS HET ARCHETYPE VAN EEN ‘HOTSPOT’ OF GLOEIPUNT. MAAR WAT DE ACHTERLIGGENDE, OF BETER GEZEGD DE ONDERLIGGENDE OORZAAK IS VAN HET HAWAÏAANSE GLOEIPUNT EN VAN ONGEVEER VIJFTIG ANDERE GLOEIPUNTEN OP AARDE, BLIJFT TOT OP HEDEN HET ONDERWERP VAN VERHITTE DISCUSSIES BINNEN DE GEOLOGISCHE GEMEENSCHAP. ALLES DRAAIT ROND DE VRAAG HOE HET ERAAN TOEGAAT IN DE AARDSE KOOKPOT.

De aardse kookpot: over het al of niet bestaan van mantelpluimen

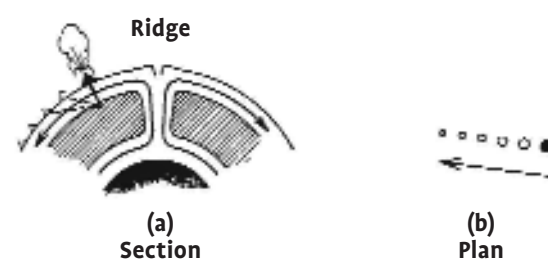
Manuel Sintubin

De Hawaïaanse archipel, middenin de Stille Oceaan, heeft iets merkwaardigs. Het is een aaneenschakeling van eilanden die allemaal mooi opgelijnd zijn. Daarbij komt dat op het meest zuidoostelijke eiland – Hawaï of ‘Big Island’ – een van de meest actieve vulkanen op aarde ligt, de Kilauea. Hij ligt op de flanken van de 4 169 meter hoge Mauna Loa, ook een actieve schildvulkaan. Mauna Kea (4 205 meter), de derde top op Hawaï, is dan weer een slapende vulkaan. De laatste eruptie vond meer dan vierduizend jaar geleden plaats. De andere eilanden, ten noordwesten van Hawaï, zien er totaal anders uit. Het zijn oude vulkanen die ten prooi zijn gevallen aan weer, wind en water. Erosie heeft hier gezorgd voor indrukwekkende landschappen. Regenwouden hebben de eilanden ingepalmd. Maui is nog 3 055 meter hoog, Oahu (met de hoofdstad Honolulu) 1 220 meter hoog, Kauai 1 598 meter hoog en Niihau nog amper 390 meter hoog. Nog meer naar het noordwesten vinden we nog kleinere eilanden die omgeven zijn door koraalriffen, zoals Nihoa (273 meter hoog) en Necker (84 meter hoog). En nog verder naar het noordwesten treffen we alleen atollen aan, ringvormige eilandcomplexen opgebouwd door koraalriffen rondom een lagune. Het atol Kure is het meest noordweste-

lijke eiland van de archipel, op meer dan 2 500 km van Hawaï. Maar eigenlijk is de eilandketen nog verder noordwestwaarts te volgen als een 3 500 km lange aaneenschakeling van afgeplatte zeebergen of ‘guyots’ tot voor de kusten van het Siberische schiereiland Kamchatka. We spreken dan ook van de ‘Hawaï-Emperor’-eilandketen. Tijdens zijn Beaglereis (1831-1836) formuleerde Charles Darwin al een verklaring voor de opmerkelijke evolutie van vulkanisch eiland tot atol: een gestaag wegzakken van een uitgedoofde vulkaan, die bovendien geleidelijk ontmanteld wordt door erosie en waarrond koraalriffen groeien. Eens de vulkaanrestanten onder het zeeniveau verdwijnen, blijft alleen nog een cirkel van koraalriffen over, het atol.

J. Tuzo Wilson publiceert in 1963 voor het eerst een ‘possible origin of the Hawaiian islands’ en maakt hierbij gebruik van de toen revolutionaire concepten van platentektoniek. Pas zes jaar later zal dit nieuwe paradigma door de aardwetenschappelijke gemeenschap worden aanvaard. Volgens Wilson is het ontstaan van deze typische eilandketens het resultaat van plaatbewegingen, waarbij de bron van het vulkanisme relatief onbeweeglijk blijkt te liggen ten opzichte van de bewegende aardplaat,

en zo een keten van vulkanische eilanden creëert. Hij vermoedt dan ook relatief stabiele bronnen middenin de bovenmantel van de aarde, op een diepte van ongeveer 200 km.



In 1968 introduceert de geofysicus Eric Christoffer-son de term ‘hotspot’ of gloeipunt. Die term is niet helemaal neutraal en blijkt achteraf het verdere verloop van het wetenschappelijke onderzoek sterk te kleuren. In 1971 herformuleert W. Jason Morgan de verklaring voor het Hawaïaanse gloeipunt. Hij ziet het gloeipunt als de plaats waar een smalle, diepe ‘mantelpluim’ de aardplaat raakt. Deze mantelpluim voert zowel hitte als ‘primitief’ mantelmateriaal aan dat afkomstig is van diep in de ondermantel, dicht bij de kernmantelgrens (ongeveer 2 900 km diep).

‘Hotspots’ of gloeipunten beschouwen we nu als



vulkanische centra ver weg van plaatgrenzen. Volgens het paradigma van de platen-tettoniek valt vulkanisme vooral te verwachten langs de plaatgrenzen: ofwel ter hoogte van spreidingsruggen, waar twee aardplaten uit elkaar drijven; ofwel ter hoogte van subductiezones, waar één aardplaat onder een andere aardplaat in de mantel wegduikt. De gloeipunten bevinden zich echter meestal middenin de bewegende aardplaten en passen dus eigenlijk niet helemaal in het plaat-tettonische paradigma. Bovendien kenmerken die vulkanische centra zich door grote volumes magma – en dus een hoge graad van vulkanische activiteit – en een afwijkende geochemie van het magma.

Twee modellen tekenen zich vandaag af. Het ‘pluimmodel’ is een bottom-upbenadering. Diepe, hete mantelpluimen – pijpachtige structuren – ontstaan ter hoogte van de grens tussen kern en mantel. Eenmaal ze de onderzijde van de aardplaat raken, drijven ze de plaatbewegingen actief aan door een laterale spreiding van het hete mantelmateriaal. Dit model gaat uit van een convectie die de hele mantel betreft – ‘whole-mantle convection’. Daar staat een top-downbenadering tegenover. Dit ‘plaatmodel’ gaat uit van plaatbewegingen die aangedreven worden door de zwaartekracht. De recyclage door subductie trekt als het ware de aardplaten uiteen – ‘slab pull’. Dit proces resulteert ter hoogte van de spreidingsruggen in een aanzuigeffect van mantelmateriaal met een passieve convectie in de oppervlakkige mantel tot gevolg. Dit model gaat dus uit van een ‘oppervlakkige’ convectie in de buitenmantel, en dus van een gelaagde mantel.

De mantel is het deel van de aarde tussen de korst (gemiddeld een 40 km dik) en de kern (zo’n 2 900 km diep). Dit deel maakt ongeveer 83 % uit van het volume van de aarde en ongeveer 68 % van de massa van de aarde. De mantel is dan ook het belangrijkste onderdeel van onze planeet. Het belangrijkste mineraal in de mantel is olivijn, een ijzer-magnesium-silicaat. Niet echt toevallig zijn ijzer, magnesium, silicium en zuurstof de meest voorkomende chemische elementen op aarde. De

gemiddelde dichtheid varieert van $3,3\text{ g/cm}^3$ net onder de korst tot $5,6\text{ g/cm}^3$ net boven de kern. De temperatuur varieert tussen 500 en $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ onder de korst tot meer dan $4\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ aan de kern-mantelgrens. Het is de enorme omgevingsdruk, oplopend tot ongeveer 140 GPa aan de kern-mantelgrens, die uiteindelijk verhindert dat het gesteente bij deze temperaturen smelt.

‘Hotspots’ of gloeipunten

beschouwen we nu als

vulkanische centra ver

weg van plaatgrenzen

Het ‘gedrag’ van de mantel is lang een mysterie gebleven. Enerzijds is er het geofysische concept van isostasie – in wezen het principe van Archimedes – dat doet vermoeden dat de aardkorst op ‘iets vloeibaars’ drijft. Anderzijds blijken alle seismische golven zich voort te planten doorheen de mantel, en dit kan alleen in ‘iets vast’. Is de mantel nu vloeibaar of vast? In 1906 is Otto Ampferer ervan overtuigd dat de mantel echt ‘vloeibaar’ is. John Joly denkt dan weer dat de mantel door radiogene opwarming periodiek opsmelt en vloeibaar wordt zodat er convectiestromingen tot stand kunnen komen. We weten nu echter dat op korte termijn het mantelmateriaal zich als een vaste stof gedraagt (elastisch gedrag ter verklaring van de voortplanting van aardbevingsgolven), maar dat op lange, geologische termijn (in grootteordes van miljoenen jaren) het mantelmateriaal zich als siroop gedraagt (viskeus gedrag ter verklaring van convectie). Men spreekt dan ook van ‘solid-state convection’.

Maar hoe kennen we nu de interne structuur van de mantel? Alvast niet door directe waarnemingen via boringen. De diepste boring is ‘amper’ 12 km diep, slechts een prikje in de aardkorst. Plaat-tettonische processen helpen ons een beetje. Mantelgesteenten vinden we soms terug in de wortelzones van oude gebergten. Ook door vulkanisme wordt mantelmateriaal naar het aardoppervlak gebracht en kunnen we de geochemische vingerafdruk van het mantelmateriaal bepalen.

Twee modellen tekenen zich

vandaag af: het ‘pluimmodel’

en het ‘plaatmodel’

Om de echte interne structuur van de mantel te achterhalen moeten we echter een beroep doen op de studie van de voortplanting van aardbevingsgolven doorheen de mantel. Die seismische structuur is vooral gekenmerkt door een aantal seismische discontinuïteiten. Die zijn dan weer gekenmerkt door plotse veranderingen in de voortplantingssnelheid van aardbevingsgolven ten gevolge van onder meer faseovergangen, wijzigingen in samenstelling of temperatuurvariatie in de mantel. Vooreerst komen zo twee belangrijke grenslagen naar voren. De bovenste grenslaag bevindt zich tussen de Moho – de seismisch gedefinieerde grens tussen aardkorst en mantel – en de Lehmannsdiscontinuïteit op een diepte van ongeveer 220 km. In 1959 identificeerde de beroemde seismoloog Beno Gutenberg die laag als de B-laag. Vlak onder de Moho vinden we in de B-laag het zogenaamde ‘seismische deksel’ (‘seismic lid’), dat gekenmerkt wordt door zeer hoge seismische snelheden. Het komt hoogstwaarschijnlijk overeen met het mantelgedeelte van de aardplaten. Daaronder vinden we de ‘lagesnelheidszone’ (‘low velocity zone’). Zoals de term zelf suggereert, is die zone gekenmerkt door opvallend lage seismische snelheden en een negatieve snelheidsgradiënt. Men vermoedt dat dit te maken heeft met de aanwezigheid van zeer lage percentages gesmolten mantelgesteente. Net boven de kern-mantelgrens vinden we een gelijkaardige grenslaag, de D-laag. Ook deze grenslaag is ongeveer 200 km dik. Tussen 410 km diepte en 900 tot 1 000 km diepte tekent zich in de mantel de overgangslaag af. Die scheidt de bovenmantel van de ondermantel (of diepe mantel). Op 410 km en 670 km diepte vinden we nog zeer kenmerkende discontinuïteiten, die wellicht het gevolg zijn van drukafhankelijke faseovergangen van olivijn. De ondergrens van deze overgangslaag – de Repettidiscontinuïteit – vertoont hoogstwaarschijnlijk een zeer onregelmatige ‘topografie’. Alles draait nu rond de geodynamische betekenis van deze overgangslaag en in het bijzonder van de Repettidiscontinuïteit. Is dit een samenstellings-

grens? Vormt de ondergrens van die overgangslaag een barrière voor oppervlakkige mantelconvectie, zoals gesuggereerd in het ‘plaatmodel’? Of is de diepe mantel betrokken in een globaal convectiemodel voor de mantel, zoals gesteld in het ‘pluimmodel’?

Om nog een beter beeld te krijgen van de interne structuur van de mantel, en dus mogelijk van de processen die zich diep onder onze voeten afspelen, beroepen we ons op de seismische tomografie. Dit is een geïntegreerde analyse van de seismische golfpaden van aardbevingsgolven door meetresultaten van meerdere seismische stations bijeen te brengen. Zo wordt het mogelijk een driedimensionale snelheidsstructuur van (een deel van) de mantel te reconstrueren. De principes van seismische tomografie zijn identiek aan die van medische CT-scans op basis van X-stralen. De interpretatie van deze snelheidsstructuur steunt op het principe dat seismische golven zich sneller voortplanten in materiaal met een hogere dichtheid dan in materialen met een lagere dichtheid. Ook andere materiaaleigenschappen kunnen een rol spelen in de seismische snelheid. De snelheidsstructuur wordt dan ook klassiek ‘gelezen’ als een dichtheidsstructuur. De volgende interpretatiestap wordt echter niet door iedereen gevolgd: de dichtheidsstructuur wordt nu ‘vertaald’ in een temperatuurstructuur. Hoge seismische snelheid wijst op dichts materiaal en dit wijst op ‘koud’ mantelmateriaal. Lage seismische snelheid wijst op minder dichts materiaal en dus op ‘warm’ mantelmateriaal.

Onder het Hawaïaanse gloeipunt bevindt zich een smalle, verticaal georiënteerde lagesnelheidszone, die mogelijk wijst op de aanwezigheid van een mantelpluim die dit gloeipunt voedt

In 2009 publiceren Cecily Wolfe en coauteurs de eerste resultaten van het PLUME-project in *Science*. Onder het Hawaïaanse gloeipunt bevindt zich immers een smalle, verticaal georiënteerde lagesnelheidszone, die mogelijk wijst op de aanwezigheid van een mantelpluim die dit gloeipunt voedt. Maar de zwakke resolutie van de bestaande tomografiebeelden liet niet toe de lagesnelheidsstructuur – en dus de mogelijke mantelpluim – te vervolgen naar de diepte. Rond Hawaï zijn er onvoldoende golfpaden om een duidelijk beeld te krijgen. Enerzijds zijn er te weinig seismische stations in de directe omgeving

van Hawaï. Anderzijds liggen de meeste aardbevingsbronnen zeer ver weg, met name in het seismisch actieve kustgebied van de Stille Oceaan, beter gekend als de ‘ring of fire’.

De tegenstanders van het ‘pluimmodel’ wijzen erop dat onder vele van de ongeveer vijftig veronderstelde gloeipunten geen lagesnelheidszone in de mantel te herkennen valt

Het PLUME-project bestaat er nu in om het seismische netwerk (vooral op de oceaانبodem) rond Hawaï verder uit te bouwen om zo een hogeresolutiebeeld te bekomen van de snelheidsstructuur in de mantel onder het Hawaïaanse gloeipunt. Na twee jaar metingen – en meer dan 2000 geanalyseerde golfpaden afkomstig van 97 aardbevingen – wordt een lagesnelheidsstructuur duidelijk die niet alleen te vervolgen is tot diep (660 km) in de overgangslaag, maar die ook ‘wortelt’ in een brede (meerdere honderden kilometers) lagesnelheidszone in de diepe mantel, tot op dieptes van 1500 km. Voor Wolfe en haar collega’s is dit voldoende bewijs dat het Hawaïaanse gloeipunt het gevolg is van een diepgewortelde mantelpluim die zijn oorsprong vindt in de diepe mantel. Op zo’n 300 km diepte (in de bovenmantel) zou volgens de modellen het temperatuurverschil tussen mantelpluim en omgeving ongeveer 250 °C zijn, op 900 km (in de ondermantel) ongeveer 300 °C.

Is het bestaan van diepe mantelpluimen, en dus van het ‘pluimmodel’ zoals geïntroduceerd door Morgan in 1971, hiermee bewezen? Als je de discussie op www.MantlePlumes.org volgt zeker niet. Voor eerst is de seismologische interpretatie al niet vrij van kritiek. Volgens tegenstanders is de ‘lagesnelheidspijp’ onder Hawaï gewoon een wiskundig artefact te wijten aan de eigenschappen van de golfpatronen. Bovendien wordt het tomografische beeld toch al gedomineerd door de ondiepe (<500 km) lagesnelheidsafwijking. Anderzijds wordt ook de vertaling van de snelheidsstructuur in een temperatuurstructuur door de tegenstanders sterk gehekeld. Zij trappen niet in de val die Christofferson uitzette toen hij de term ‘hotspot’ introduceerde. Die interpretatie gaat volgens de ‘plaatadepthen’ uit van een al te simplistisch beeld van een chemisch/mineralogisch homogeen mantel. Uiteindelijk verwijt men de ‘pluimadepthen’ dat ze te veel uitgaan van de historisch gegroeide misvatting waarbij de – waarschijnlijk slecht gekozen – term ‘hotspot’ gelijkgesteld wordt aan mantelpluim. Het is uiteindelijk

door toedoen van Morgan dat gloeipunt en mantelpluim van bij het begin als synoniemen werden beschouwd. De tegenstanders wijzen er trouwens op dat onder vele van de ongeveer vijftig veronderstelde gloeipunten geen lagesnelheidszone in de mantel te herkennen valt.

De tegenstanders van het ‘pluimmodel’ gaan in essentie uit van een heterogene en gelaagde mantel. Lagesnelheidszones kunnen volgens hen vele oorzaken hebben: bijvoorbeeld verschillen in vochtigheidsgraad, aanwezigheid van gesmolten mantelgesteente, faseovergangen of verschillen in samenstelling. Die heterogeniteit kan uiteindelijk tot convectie leiden, maar ook tot magmatisme dat losstaat van de plaattektonische context, zoals het geval is in Hawaï. Anderzijds gaan de ‘plaatadepthen’ uit van een relatief geïsoleerde ondermantel (onder de Repettidiscontinuïteit) waarin grootschalige anomalieën uiteindelijk een rol spelen in het voorkomen en verspreiding van de zogenaamde gloeipunten. Convectie in de bovenmantel is dan weer passief en wordt gestuurd door plaattektonische bewegingen. En de gloeipunten? Zij vinden hun oorsprong in een relatief stabiele mantelbron, hoogstwaarschijnlijk zelfs gelokaliseerd in de bovenste grenslaag (of B-laag) – teruggrijpend naar het oorspronkelijke voorstel van J. Tuzo Wilson. Bovendien is het verre van zeker of het wel ‘hotspots’ zijn. Misschien zijn het eerder ‘wetspots’ of ‘fertile spots’ of ‘melting anomalies’.

De discussie rond de verklaring van vulkanische centra die mogelijk losstaan van de plaattektonische context was van bij de aanvang sterk gekleurd. De introductie van de term ‘hotspot’ heeft hier geen goed gedaan. De discussie wordt vandaag op het scherp van de snede gevoerd. Het is een spel van ‘believers’ en ‘non-believers’ geworden waarbij niet alleen meer op de bal wordt gespeeld. Titels zoals ‘Another Nail in the Plume Coffin?’ (*Science* 313, 18 september 2006, 394) of termen zoals ‘zombie science’ (zie www.MantlePlumes.org) liegen er niet om. Maar verhitte discussies stuwden de wetenschap ook vooruit, niet alleen rond de zogenaamde gloeipunten, maar ook rond zoveel andere vormen van ‘afwijkend vulkanisme’, zoals vloedbasalten, ‘large igneous provinces’ of het opbreken van continenten. Misschien moeten we er ons uiteindelijk bij neerleggen dat de ‘aardse kookpot’ nooit zijn recepten zal prijsgeven. ●

C.J. Wolfe, S.C. Solomon, G. Laske, J.A. Collins, R.S. Detrick, J.A. Orcutt, D. Bercovici, E.H. Hauri, ‘Mantle Shear-Wave Velocity Structure Beneath the Hawaiian Hot Spot’, in: *Science*, 2009, 326, 1388-1390.