

De galm van de aardkern

HIJ LIGT dichterbij dan vakantiebestemming Curaçao, maar is slechter bereikbaar dan de verste uithoeken van ons heeal: het middelpunt van onze aarde op dik 6.300 kilometer onder onze voeten. De diepste boogarten ooit gemaakt overbruggen nog geen 0,2 procent van die afstand. Vulkanen hebben soms brokjes gesteente uitgespuwd vanaf een diepte van 600 kilometer. Dat is nog altijd minder dan 10 procent van de lange weg naar het middelpunt van de aarde. Ondanks deze beperkingen vormen aardwetenschappers zich stap voor stap een beter beeld van het hart van onze planeet, en bol, iets groter dan de maan en iets warmer dan de zon. De meeste informatie over vorm en samenstelling geeft de aardkern prijs als zij door zware aardbevingen in trilling wordt gebracht. Dankzij twee online-publicaties in *Science* (www.sciencexpress.org) is ons beeld van deze bol van ijzerkolen en -kristallen deze week flink opgeklaard.

RUWE SCHETS De Nederlandse aardwetenschapper Arwen Deuss presenteert in *Science* een ruwe schets van de binnenkern van de aarde, gebaseerd op een wiskundige analyse van 95 zeer zware aardbevingen uit de afgelopen dertig jaar. Die binnenkern is een vaste ijzeren bol met een straal van 1.200 kilometer. Hij gaat over in de buitenkern, een ruim 2.000 kilometer dikke schil van gesmolten ijzer, zo vloeibaar als water. Ondanks de hoge een temperatuur van meer dan 5.000 graden Celsius, kan de binnenkern van de aarde toch vast zijn, door de enorme druk die er heerst. "Simpel gezegd laat ik zien dat de binnenkern uiteenvalt in vier verschillende delen", vertelt Deuss in een telefoongesprek vanaf haar werkruimte op het instituut voor aardwetenschappen van Cambridge University. "Zoals je ook een sinaasappel

langs de lijnen van de partjes in vieren zou kunnen delen. In elk van die delen ziet de stapeling van het ijzer waaruit de binnenkern bestaat, er iets anders uit. Welke kristalvorm het ijzer precies heeft onder deze hoge druk en temperatuur is onzeker, maar de structureverschillen kunnen door nauwgezette analyse van zware

Onder links Verschillen in de kristalstructuur van de binnenkern, zoals ze zijn gemeten na seismische analyse van zware aardbevingen. *Onder rechts* Variaties in het aardmagnetisch veld komen op het eerste gezicht overeen met de verschillen in de binnenkern. ILLUSTRATIES SCIENCE

aardbevingen wel aan het licht komen." Rob van der Hilst, hoogleraar aardwetenschappen aan het MIT typt Deuss' studie als "een doorbraak". Met haar publicatie treedt Deuss in de voetsporen van de Deense aardwetenschapper Inge Lehmann. "Ik raakte al jong gefascineerd door de binnenkern van de aarde", zegt zij. "Dat was mede aan Lehmann te danken. Zij ontdekte in 1936 het onderscheid tussen de vaste en de vloeibare kern. Er zijn wetenschapshistorici die denken dat zij die ontdekking hier in Cambridge heeft gedaan. Lehmann werkte in een tijd dat vrouwen het in

De ijzeren aardkern is gevierendeeld. Het aardmagnetisch veld is daardoor niet overal even sterk, aldus geofysicus Arwen Deuss.

Michiel van Nieuwstadt

de wetenschap niet makkelijk hadden. Ze is haar carrière begonnen met het installeren van seismografen bij de Deense seismologische dienst. Toch heeft ze veel belangrijke ontdekkingen gedaan. Er is ook een grensvlak in de aarde naar haar vernoemd, de Lehmann-discontinuïteit op 220 kilometer onder het aardoppervlak."

De ontdekking van de vaste binnenkern en de vloeibare buitenkern is belangrijk, omdat het bestaan van het aards magnetisch veld valt te verklaren uit de wervelingen en ladingswisselingen in de buitenkern. Dat magnetisch veld biedt bescherming tegen schadelijke straling van de zon en maakt zo het leven op aarde mogelijk. Een paar keer in de miljoenen jaren draait het magnetisch veld om, maar als de aarde geen vaste kern had zou dat misschien veel vaker gebeuren. "We vermoeden dat de binnenkern het aards magnetisch veld stabiliseert", zegt Van der Hilst.

AANGROEI *Science* publiceerde het werk van Deuss gisteren tegelijkertijd met een studie van haar Franse collega Annie Souriau. Haar computermodel verklaart hoe het komt dat de ijzerkristallen in de aardkern niet symmetrisch verdeeld zijn – iets wat in 1997 voor het eerst is aangetoond.

Na een aardshok galmt de aarde na als een klok. Lichtgeel: binnenkern, geel: buitenkern, rood: aardmantel.

ILLUSTRATIE STUDIO NRC/RIK VAN SCHAGEN

"Ons model laat zien dat de vaste binnenkern aan de westkant voortdurend aangroeit", zegt Souriau, werkzaam aan de universiteit van Toulouse. "Dat komt doordat het vloeibare ijzer uit de buitenkern aan deze kant langzaam maar zeker uitkristalliseert. Tegelijkertijd smelt de aardkern aan de andere kant. Netto resulteert dit proces in een aangroei van de aardkern met ongeveer een halve millimeter per jaar. Dit proces is al aan de gang sinds de aarde zo ver was afgekoeld dat er een vaste binnenkern kon ontstaan. Volgens onze berekeningen is dat een miljard jaar geleden, maar aanvankelijk verliep de aangroei sneller." Net als Deuss is Souriau zich ervan bewust dat de ijzeren binnenkern van de aarde geen homogene massa is. Ze benadrukt dat de vaste aardkern wel bolvormig is, zij het enigszins afgeplat door de rotatie van de aarde. "De asymmetrie waar Deuss en ik over schrijven is een interne asymmetrie", zegt zij. "Die komt tot uiting in een verschillende structuur van de ijzerkristallen als je in de binnenkern het westen naar het oosten gaat. In het westen hebben de ijzerkristallen een diameter van, zeg, vijfhonderd meter. In het oosten moet je denken aan enorme blokken van honderden kilometers."

Dat seismologen zich een gedetailleerd beeld kunnen vormen van de binnenkern van de aarde is vooral te danken aan de allerzwaarste en diepste aardbevingen die de aarde de afgelopen veertig jaar heeft gekend. "De aardbeving die ons seismologen de meeste informatie opleverde, zal mensen niet bekend voorkomen", zegt Deuss. "Die aardbeving was in 1994 op een diepte van 650 kilometer onder het Andesgebergte in Bolivia. Bij die aardbeving vielen geen doden. Dit soort aardbevingen zijn zo zwaar en diep dat de aarde als geheel nog dagenlang natrilt. Daarmee bedoel ik dat de aarde langzaam uitzet en dan weer wat kleiner wordt. Het gaat daarbij om bewegingen met een amplitude van micrometers." Van der Hilst vergelijkt de nagalm van de aarde na een aardshok met de galm in een ijzeren bol waar je met een hamer op slaat. Deuss: "Dit soort trillingen met een frequentie van minder dan 10 millihertz zijn te vergelijken met de staande golven die ook ontstaan als je gitaar speelt, of op een drum slaat. Voor de aarde zijn het staande golven langs de omtrek van de aarde. Net zoals bij een instrument kunnen we de verschillende tonen 'horen', in dit geval met seismografen die de trillingen aan het aardoppervlak registreren."

GERINGE DIEPTE De 'nuttigste' aardbevingen, vanuit het perspectief van seismologen, voltrokken zich langs de Ring van Vuur, langs de rand van de Stille Oceaan, op plaatsen waar de oceanobodem wegduikt onder het vasteland. "Veel dieper dan 650 kilometer kan een aardbeving niet ontstaan", zegt Deuss. "Dan is de wegzakkende oceanobodem te zeer opgewarmd en te zacht geworden om nog te kunnen breken. Dat is nodig voor een aardbeving." Aardbevingen met een vernietigende uitwerking op het aardoppervlak voltrekken zich vaak op geringe diepte. "Ze zullen dus niet zo snel de diepste

KERKHOF VOOR DE AARDKORST

Arwen Deuss bestudeerde niet alleen de aardkern, maar ook de aardmantel. Dat is de 3.000 kilometer dikke schil van gesteente die ligt tussen de aardkern en de lithosfeer, de buitenste harde oppervlaktelaag van de aarde. In de afgelopen tien jaar hebben aardwetenschappers zich een steeds gedetailleerder beeld gevormd van de verschillende gesteentelagen waaruit deze aardmantel is opgebouwd. Deuss heeft aan dat beeld bijgedragen, onder andere met *Science*-publicaties in 2001 en 2006. In 2001 publiceerde zij over een opmerkelijke verandering in de voortplantingssnelheid van seismische schuifgol-

ven bij het passeren van een grensvlak in de aarde op een diepte van 520 kilometer. Ze ontdekte dat het grensvlak op sommige plaatsen in tweeën gesplitst was. Zo'n verandering in golfsnelheid duidt doorgaans op een verandering in de samenstelling of de kristalstructuur van een gesteente: een fasovergang. Deuss: "Tot dan toe was aangenomen dat er alleen maar een fasovergang in het mineraal olivijn nodig was om het grensvlak op 520 kilometer te verklaren, maar ik laat zien dat ook het mineraal boven en onder deze grens een andere kristalstructuur heeft." In 2006 maakte Deuss een grensvlak op een diepte

van 650 kilometer zichtbaar. Op deze diepte zijn druk en temperatuur zo hoog dat er geheel nieuwe mineralen ontstaan. "Dat verandering is van bijzonder belang", zegt Deuss, "omdat aardwetenschappers zich afvroegen hoe diep stukken oceanobodem langs het vasteland de aardbodem in kunnen zakken in zogeheten subductiezones. Mede dankzij mijn werk konden we laten zien dat stukken oceanobodem deze dieptegrens van 650 kilometer kunnen passeren en dat ze terecht komen in zogeheten slab graveyard, een laatste rustplaats voor oude stukken oceanobodem."

delen van de aarde in trilling brengen", zegt Deuss. "De uitzonderlijk zware aardbeving van Tweede Kerstdag 2004, voor de kust van Sumatra, heeft seismologen niettemin wel nuttige data opgeleverd over de aardmantel." Tot nog toe verdeelden aardwetenschappers de binnenkern van de aarde in twee delen: een oostelijke en een westelijke helft, analoog aan het oostelijk en het westelijk halfrond, elk met een iets andere kristalstructuur. Deuss' verdeling van de binnenkern in kwarten is gedetailleerder: "Uit mijn studie kun je opmaken dat in het kwart van de harde aardkern dat zich grofweg bevindt onder Noord- en Zuid-Amerika ijzerkristallen netjes liggen opgelijnd in de richting van de aardas. Daardoor reizen de aardbevingsgolven in dit gedeelte van de aardbol veel makkelijker van noord naar zuid dan in het vlak van de evenaar. Dit verschijnsel noemen we *anisotropie*."

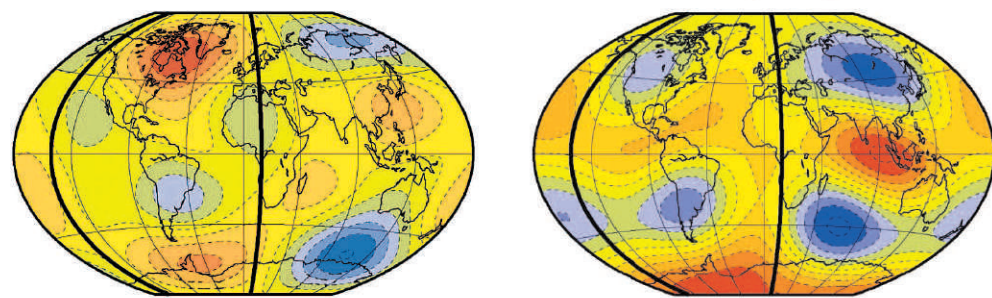
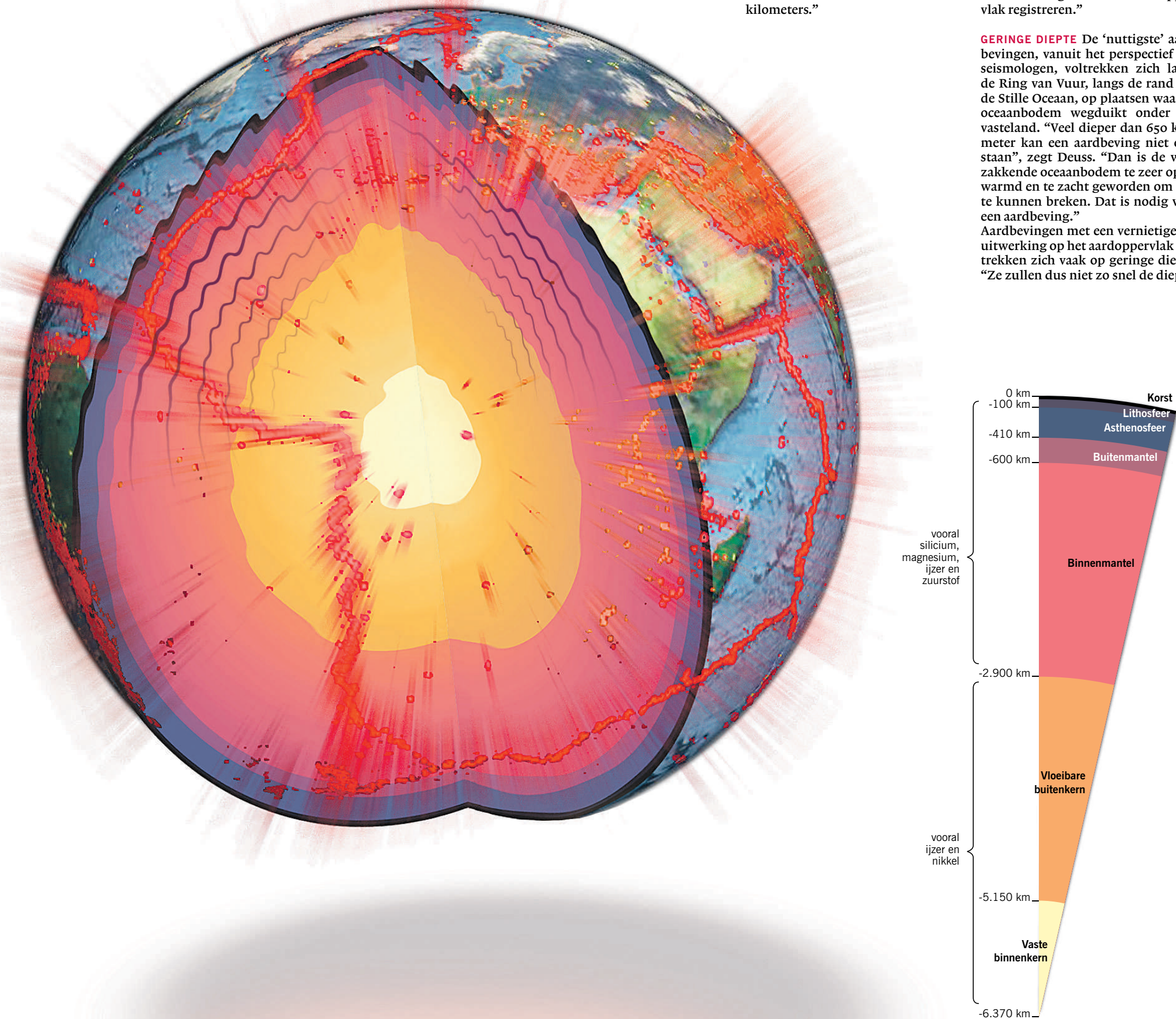
Verder naar het oosten, onder Europa en Afrika, liggen de ijzerkristallen meer kriskras door elkaar, de anisotropie is er minder. In het part van de binnenkern dat schuilgaat onder Azië is deze anisotropie volgens Deuss' gegevens geheel afwezig en onder de Stille Oceaan komt zij weer terug. Wat dat betreft is dit deel van de binnenkern vergelijkbaar met het part dat onder Europa en Afrika ligt." Deze gedetailleerde conclusies baseert Deuss op spectra, grafiekjes die laten zien op welke frequenties de aarde het sterkst 'galmt' in de dagen na een aardbeving. Deuss: "Uit ervaring weten we al heel goed of een bepaalde frequentie afkomstig is van de aardkern of de aardmantel. Ik heb specifiek gekeken naar piekjes van trillingen die dicht op elkaar zitten."

IJZERATOMEN Als je bedenkt dat een bepaalde trillingspiek kenmerkend is voor een bepaalde stapeling van de ijzeratomen langs de noord-zuid-as, dan kun je je voorstellen dat een trillingspiek daar vlakbij kan laten zien dat de kristalstructuur van oost naar west net iets meer is uitgerekt. Als je twee van die pieken dichtbij elkaar ziet, kun je concluderen dat er sprake is van anisotropie. Je zou kunnen zeggen dat de anisotropie de tonen die we opvangen uit de binnenkern een beetje vals maakt. Het nieuwe aan de wiskundige methode die ik toepas, is dat ik daarin ook de resonantie tussen verschillende trillingen meeneem. Dat maakt het mogelijk om regionale verschillen in de binnenkern gedetailleerd te bestuderen."

Deuss vermoedt dat er een verband bestaat tussen deze regionale verschillen in de binnenkern en de stroom hete metalen die eromheen circuleert. Die hete ijzerstromen bepalen het aards magnetisch veld. "Mijn data laten zien dat het magnetisch veld opvallend sterk is onder Azië. Dat is ook de plaats waar de ijzerkristallen in de aardkern het minst liggen opgelijnd. Boven de andere parten van de binnenkern is het verband minder duidelijk. Er is meer informatie nodig over de complexe vloeistofstromingen in de buitenkern om precies te begrijpen wat er aan de hand is." Niettemin waagt Deuss zich aan een

Het magnetisch veld ontstaat uit de wervelingen in de aardkern

verklaring: "Ik denk dat de vloeistofstromingen in de buitenkern sinds een miljard jaar van invloed zijn geweest op de groei van de vaste binnenkern." Misschien groeit de aardkern minder snel aan op plaatsen waar veel stroming is. Die verklaring strookt met het model voor aangroei van de binnenkern dat Annie Souriau voorstelt in haar *Science*-publicatie. Maar Deuss kan zich nog een tweede scenario voorstellen: "Het kan ook zijn dat de variërende vloeistofstromingen in de buitenkern, en de magnetische velden die daardoor worden opgewekt, de kristalstructuur van de vaste aardkern hebben vervormd nadat zij is gestold. Ik kan tussen die twee scenario's niet kiezen, maar ik vind het leuk om wetenschappers uit andere disciplines een suggestie te doen waarmee zij verder kunnen. Het is saai om alleen maar binnen je eigen vakgebied te blijven, ik neem graag een beetje risico." Van der Hilst is in elk geval enthousiast over de Deuss' hypothese dat het aardmagnetisch veld zijn sporen heeft nagelaten in de structuur van de binnenkern van de aarde. "Als dit werkelijk waar is dan zullen we misschien ooit in staat zijn om een geheel nieuwe, onafhankelijke reconstructie te maken van de veranderingen van het aardmagnetisch veld vanaf een miljard jaar geleden." ●



MINIGOLVEN

Met iets meer geluk had Arwen Deuss *Science* al kunnen halen met het onderzoek waarmee ze in 1998 haar studie geofysica in Utrecht afrondde. In dit onderzoek, verricht aan de universiteit van Cambridge, demonstreert Deuss dat de Deense seismoloog Inge Lehmann gelijk had toen ze in 1936 concludeerde dat de aarde een vaste binnenkern heeft. Behalve staande golven (zie hoofdverhaal) brengen aardbevingen nog twee type golven voort: drukgolven en schuifgolven. Drukgolven of longitudinale golven trillen op en neer in de richting waarin ook de golf loopt, weg van de plek waar de aardbeving is

ontstaan. Geluidsgolven zijn vergelijkbaar. Bij schuifgolven of transversale golven trilt de aarde dwars op de voortplantingsrichting van de aardshok. Lehmanns ontdekking van een vaste binnenkern in het centrum van de vloeibare buitenkern van de aarde, was gebaseerd op het feit dat drukgolven afbuigen als ze de vloeibare buitenkern tegenkomt. Deuss: "Dit effect creëert een zogeheten schaduwzone aan het aardoppervlak, een gebied waar drukgolven die door een bepaalde aardbeving ontstaan niet aankomen. Lehmann ontdekte dat aardbevingsgolven van een zware aardshok in Nieuw-Zeeland juist

wél aankamen in Europa, terwijl dat gebied eigenlijk in de schaduwzone had moeten liggen. Lehmann kon dit verklaren door ervan uit te gaan dat er in de aarde een vaste binnenkern bestond die de seismische golven van de Nieuw-Zeelandse aardbeving naar Europa kaatste. Ze rekende uit waar de grens lag tussen de vaste en de vloeibare aardkern. De grens is naar haar vernoemd. "Ik heb het bestaan aangetoond van kleine schuifgolven in de binnenkern. Jammer genoeg wilde *Nature* de resultaten niet publiceren. Het effect was te klein, beweerden de referenten. Terwijl wij nu juist uitleggen dat die golfjes klein móes-

ten zijn. Dat komt doordat de schuifgolf op de buitengrens van de buitenkern moet worden omgezet in een drukgolf. Zelf kan deze schuifgolf de binnenkern immers niet passeren. Op de grens van binnen en buitenkern wordt de drukgolf weer omgezet in een schuifgolf. Bij die omzetting gaat veel energie verloren." "Uiteindelijk hebben we het artikel opgestuurd naar een meer gespecialiseerd geofysicistijdschrift. Begin 2000 is het artikel gepubliceerd. Toen andere onderzoekers onze resultaten reproduceerden, leverde hun dat in 2005 en 2008 alsnog publicaties op in *Science* en *Nature*."