

# Het aardmagneetveld verzwakt:

## Het einde der tijden?

door Lennart V. de Groot

Paleomagnetisch laboratorium Fort Hoofddijk, Universiteit Utrecht  
l.v.degroot@uu.nl

Zo nu en dan duiken er in de media verontrustende berichten op over het aardmagneetveld. Afgelopen zomer rapporteerden verschillende landelijke nieuwssites over de afname van de sterkte van het aardmagneetveld naar aanleiding van mijn proefschrift en recenter haalde de lancering van de SWARM-satellieten, die het aardmagneetveld in bijzonder detail moeten gaan beschrijven, het (inter-) nationale nieuws. Maar wat weten we eigenlijk over het gedrag van het aardmagneetveld? En zijn de onheilsberichten over een op handen zijnde omkering van het aardmagneetveld wel terecht?

### Klassieke oudheid

Het magnetisch gedrag van sommige bijzondere stenen was al bekend bij klassieke beschavingen. De Griekse filosoof Thales van Milete was in de zesde eeuw voor Christus een van de eersten die de magnetische eigenschappen onderkende van bijzondere stenen die hij vond bij het (nu) Turkse dorp Magnesia (een mogelijke oorsprong van het woord 'magneet'). Deze stenen werden later, rond 78 AD, door Plinius de Oudere beschreven in zijn *'Naturalis Historia'*. Ongeveer tegelijkertijd werden soortgelijke observaties gedaan in China; de magnetische eigenschappen van 'zeilsteen' werden daar in de vierde eeuw voor Christus voor het eerst beschreven (zeilsteen is een benaming voor gesteente dat door blikseminslag erg magnetisch geworden is en op schepen gebruikt werd voor navigatie in rudimentaire kompassen).

De Chinezen waren de eersten die deze magnetische eigenschappen gebruikten in een kompas tijdens de Han dynastie (~200 v.Chr.). Tot het jaar 1000 AD werden deze kompassen slechts op beperkte schaal voor navigatie gebruikt. Omdat de hemel boven de klassieke handelsroutes via Arabië naar Europa vaak helder is en navigatie aan de hand van de zon of de sterren dus net zo gemakkelijk of beter gaat dan met een kompas, heeft het daarna nog twee eeuwen geduurd voordat het kompas in Europa bekend werd.

### Middeleeuwen

In 1269 werden de magnetische eigenschappen van zeilsteen verklaard. Petrus Peregrinus, een Franse intellectueel, besteedde in een brief aan zijn vriend Sygerus aandacht aan zijn gedachten over magnetische aantrekking en afstoting; in die brief introduceerde hij ook de term 'pool' om de twee einden van een magneet aan te duiden. Deze brief werd later bekend als de *'Epistola de Magnete'* (Lat.: 'Brief over de Magneet') en wordt vaak - in het bijzonder door aardwetenschappers - gezien als het eerste moderne wetenschappelijke artikel.

Meer dan 300 jaar later, in 1600, beschrijft de Engelse arts en wetenschapper William Gilbert voor het eerst de magnetische eigenschappen van de aarde in zijn werk getiteld *'De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure'* (Lat.: 'Over de Magneet en Magnetische Lichamen, en over die Grote Magneet de Aarde'). Dit maakt het magnetisch veld de eerst bekende fysische eigenschap van de aarde. Newton beschreef de zwaartekracht van de aarde pas 87 jaar later, in 1687.

### Verlichting

De Duitse wiskundige Carl Friedrich Gauss (afb. 1) maakte in 1839 de eerste wiskundige beschrijving van het aardmagneetveld. Hij gebruikte een wiskundige techniek - de sferische harmonieken - die ruim een halve eeuw eerder was geïntroduceerd

*Afb. 1. Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) is in de aardwetenschappen vooral bekend van zijn eerste mathematische modellen van het aardmagneetveld, maar zijn wetenschappelijke inspanningen richtten zich vooral op fundamentele wis- en natuurkunde.*



door Pierre Simon de Laplace. Deze sferische harmonieken zijn in beginsel een serie sinus- en cosinussen en hun amplitudes ('Gauss coëfficiënten') op het oppervlak van een bol;

hoe meer harmonieken van sinus- en cosinussen worden gebruikt, hoe beter de beschrijving van het geomagnetisch veld, en hoe hoger de 'graad' en 'orde' van de sferische harmonieken. De eenvoudigste beschrijving (de eerste orde benadering) is een model met graad één, dit is de 'dipool'; de dipool beschrijft het geomagnetisch veld voor ongeveer 90 procent. Om het aardmagneetveld in meer detail te beschrijven zijn bijdragen met een hogere graad dan één nodig - de 'non-dipool' bijdragen. Voor zijn berekeningen was Gauss afhankelijk van een erg beperkt aantal directe waarnemingen van het aardmagneetveld; desondanks zijn zijn modellen bijzonder accuraat en wordt zijn werk vaak beschouwd als het begin van het geomagnetisch modelleren. Sinds zijn eerste wiskundige beschrijving van het geomagnetisch veld zijn er steeds meer observatoria over de hele wereld opgericht en werd door de toename van de beschikbare gegevens de kwaliteit van de wiskundige beschrijving van het aardmagneetveld in snel tempo beter.

### 20<sup>e</sup> eeuw

De Franse geofysicus Bernhard Brunhes (afb. 2) ontdekte in 1906 dat de geomagnetische polen van de aarde van polariteit kunnen wisselen. Het optreden van deze geomagnetische omkeringen impliceert dat het aardmagneetveld niet statisch is, maar veroorzaakt wordt door een dynamisch proces. In 1919 opperde de Ierse fysicus Joseph Larmor het idee dat magnetische velden van de zon en de aarde mogelijkveroorzaakt worden door roterende massa's. Dit idee werd later verfijnd door de Amerikaanse geofysicus Walter M. Elsasser; hij stelde zich voor dat het aardmagneetveld het resultaat is van elektromagnetische stromen die geïnduceerd worden in de vloeibare buitenkern van de aarde, een proces dat bekend werd als de 'geodynamo'. Het gedrag van het aardmagneetveld wordt dus bepaald door



*Afb. 2. Bernhard Brunhes (1867 – 1910) ontdekte begin vorige eeuw gesteente in een vulkanisch gebied in de Auvergne (Frankrijk) waarin de richting van de magnetisatie tegengesteld was aan het huidige aardmagneetveld. Dit leidde tot de ontdekking van het voorkomen van omkeringen van de geomagnetische polen.*

vloeistofmechanica in de buitenkern van de aarde. Dit verklaart waarom het magnetisch veld zo snel en zo lokaal kan variëren: de locatie van de geomagnetische pool, bijvoorbeeld, verschuift vele tientallen tot enkele honderden kilometers per jaar.

### Trends

Het is belangrijk om trends in het gedrag van het aardmagnetisch veld te categoriseren op basis van hun tijdsduur. De perioden van relatief stabiel geomagnetisch gedrag tussen twee omkeringen worden 'polariteit-chrons' genoemd; hun tijdsduur wordt bepaald door de omkeringsfrequentie van het aardmagnetisch veld. Zulke omkeringen komen erg onregelmatig voor. Zowel perioden van lange stabiliteit en geen omkeringen - 'superchrons' - als perioden met een veel hogere omkeringsfrequentie zijn bekend. In de afgelopen 35 miljoen jaar is de frequentie waarmee het aardmagnetisch veld omkeert iets toegenomen; omkeringen komen gemiddeld ongeveer eens per 200.000-300.000 jaar voor. Tijdens polariteit-chrons blijft het gedrag van het aardmagnetisch veld dynamisch; in een 'excursie' wijken de geomagnetische polen erg af van de geografische polen, soms zelfs tot op het andere halfrond, voordat het veld herstelt naar de oude poolpositie. Sinds de laatste omkering van het veld, 780.000 jaar geleden, zijn zeker veertien van zulke excursies bekend. Daar bovenop speelt nog het continue proces van paleo-seculaire variatie: het voortdurende dwalen van de geomagnetische pool om de geografische pool met een snelheid van vele tientallen kilometers per jaar. Naast deze mondiale, voornamelijk dipolaire, kenmerken van het aardmagnetisch veld kunnen op erg korte tijdschaal - typisch slechts tientallen tot honderden jaren - lokale variaties in geomagnetische richting of intensiteit voorkomen. Deze erg snelle non-dipoolvariaties in het geomagnetisch veld worden door sommigen 'archeomagnetische jerks' genoemd.



Afb. 3. Twee studenten aan het werk op Tenerife, Canarische eilanden. De boor en de druktank voor de boorspoeling (water) zijn goed te zien. Het op deze manier monsters van gesteente is een erg leuke, maar vermoeiende bezigheid die in teams van twee of drie personen goed kan worden gedaan.

### Geomagnetisme in de literatuur

Het patroon van geomagnetische omkeringen is goed beschreven voor de afgelopen 160 miljoen jaar, terwijl geomagnetische excursies goed gedocumenteerd zijn voor de afgelopen miljoen jaar. Daarentegen is de frequentie van archeomagnetische jerks slecht gedocumenteerd. Omdat ze erg kortstondig en lokaal voorkomen, kunnen ze alleen opgemerkt worden in gedetailleerde beschrijvingen van variaties in zowel de richting als de intensiteit van het aardmagnetisch veld. Om de grootte van deze hogere-orde geomagnetische fenomenen in ruimte en tijd te



Afb. 4. Het oriënteren van monsters. Van elk genomen monster worden de richting en de hoek met het horizontale vlak nauwkeurig vastgelegd en deze richting wordt op het monster gemarkeerd. In het laboratorium wordt de richting van de magnetisatie in het monster ten opzichte van deze markering gemeten. Door de gemeten richting aan de hand van de informatie over de oriëntatie van het monster in het gesteente om te rekenen, kan de locatie van de geomagnetische pool ten tijde van de vorming van het gesteente betrouwbaar worden bepaald.



Afb. 5. Een net gemonsterde lava op Hawaii. De gradenboog voor het bepalen van de hoek met het horizontale vlak is te zien op het oriëntatie-apparaat. De richting van het monster wordt afgelezen op het kompas dat er bovenop ligt. De genomen monsters hebben een diameter van 1 inch (2.54 cm) en kunnen afhankelijk van het gesteente meer dan 10 cm lang zijn.

bepalen en daarmee ons begrip van de drijvende krachten erachter te verbeteren, is een flink aantal van zulke beschrijvingen, die goed gedistribueerd zijn over de aarde en dezelfde periode in tijd beslaan, onmisbaar. Voor de beschrijvingen van de richtingen van het aardmagnetisch veld is dit niet zo'n probleem omdat het relatief eenvoudig is om zulke informatie uit geschikt materiaal, zoals goed gedateerde lava's, te verkrijgen (afb. 3, 4 en 5). Het verkrijgen van een betrouwbare schatting van de intensiteit van het aardmagnetisch veld is echter een veel grotere opgave.

### Reconstructie van het paleoveld

Giuseppe Folgheraiter was de eerste die zich realiseerde dat de intensiteit van het aardmagnetisch veld kan worden bepaald aan de hand van materialen die hun magnetisatie hebben verkregen door af te koelen in het paleoveld. In 1899 opperde hij het idee dat het wellicht mogelijk was om de intensiteit van het paleoveld te reconstrueren door deze materialen in een laboratorium te verwarmen en af te laten koelen in een bekend magnetisch veld en hun natuurlijke *remanente magnetisatie* (de magnetisatie die

in het gesteente wordt vastgelegd en bewaard tijdens en na het afkoelen van de lava) te vergelijken met de magnetisatie die de *monsters* in het laboratorium verkregen. De Duitse geofysicus Johann Georg Koenigsberger voorzag in 1938 echter de complexiteit van dergelijke experimenten. Hij beschreef relaties tussen de sterkte van een verkregen remanente magnetisatie van een materiaal en de grootte en textuur van de magnetische korrels en voorspelde uit zijn observaties dat deze materiaaleigenschappen een betrouwbare reconstructie van de sterkte van het paleoveld zou verstoren.

### Grondleggers in onderzoek naar paleointensiteit

Emile en Odette Thellier (afb. 6) worden in het algemeen beschouwd als de grondleggers van het onderzoek naar paleointensiteiten. Hun experimenten in de jaren '50 van de vorige



Afb. 6. Emile (1904 – 1987, foto) en Odette Thellier worden vaak gezien als de grondleggers van het onderzoek naar paleomagnetisme. Hun experimenten in de jaren '50 en het daaruit voortvloeiende artikel worden nog steeds veel geciteerd.

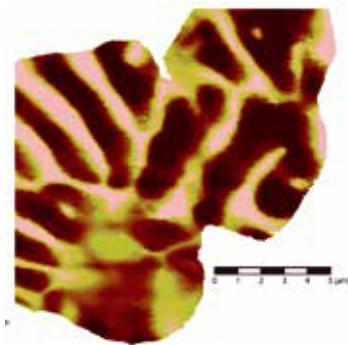
eeuw en de daaruit volgende publicatie in 1959 zijn tot op de dag van vandaag de basis voor de meeste studies naar de sterkte van het paleoveld. Emile en Odette Thellier gebruikten verbrande archeologische voorwerpen - die na later zou blijken bijzonder geschikt zijn voor paleointensiteitsonderzoek - en vervingen de natuurlijke remanente magnetisatie in deze monsters stapsgewijs door een laboratorium-remanente magnetisatie. Zij verwarmden hun monsters in de aanwezigheid van een bekend magnetisch veld tot een steeds hogere

temperatuur en bepaalden de mate van magnetisatie na elke verhitting. Omdat de sterkte van de magnetisatie van een monster evenredig is met de magnetische veldsterkte waarin het afkoelt, is het mogelijk om de intensiteit van het paleoveld - dat de natuurlijke remanente magnetisatie ingebracht heeft - te bepalen door de steeds verder afnemende natuurlijk remanente magnetisatie te vergelijken met de opbouwende laboratorium-remanente magnetisatie.

### Korrelgrootte

Koenigsbergers bedenkingen over het effect van de korrelgrootte van het gesteente op de magnetisatie bleken profetisch. Als

zeer kleine magnetische korrels de magnetische remanentie van een materiaal dragen, wijzen alle magnetische deeltjes in dezelfde richting en vormen zo één 'magnetisch domein' (afb. 7). Volgens



Afb. 7. Magnetische domeinen in een korrel titanomagnetiet in lava. Deze domeinen kunnen zichtbaar gemaakt worden door een speciale microscopie techniek: 'magnetic force microscopy'. Een klein magnetisch naaldje zweeft 40 nanometer boven een gepolijst oppervlak en wordt aangetrokken of afgestoten door de magnetisatie van de korrel. Door hele korrels op die manier te scannen, ontstaat er een beeld van de indeling in magnetische domeinen en de grenzen tussen die domeinen.

de theorie van de Franse fysicus Louis Néel verkrijgen dit soort 'single domain'-korrels altijd eenzelfde magnetisatie als zij worden verhit en afgekoeld in hetzelfde magnetisch veld. Voor grotere korrels is het echter energetisch gunstiger om een korrel in meerdere magnetische domeinen met tegengestelde richtingen te verdelen. Omdat de magnetisatie van tegenovergestelde magnetische domeinen elkaar opheffen, wordt het netto magnetisch moment van deze 'multidomain'-korrels verlaagd. Als er een nieuwe magnetisatie in zulke korrels wordt ingebracht, bijvoorbeeld tijdens een paleointensiteit-experiment, hoeft de configuratie en daarmee het netto magnetisch moment van vóór de verhitting niet noodzakelijkerwijs gereproduceerd te worden. De geschiktheid van monsters voor paleointensiteit-experimenten hangt daarom vooral af van de korrelgrootte van de mineralen die de magnetische remanentie dragen.

Onder de aanname dat monsters hun natuurlijke remanente magnetisatie verkregen moeten hebben door af te koelen in het aardmagneetveld, kunnen slechts twee groepen monsters gebruikt worden voor paleointensiteit-experimenten: verhitte archeologische artefacten en lava's. Archeologische artefacten hebben in het algemeen vrij ideale korrelgroottes - dit wordt goed geïllustreerd door de experimenten van Emile en Odette Thellier in de jaren '50 - maar zijn slechts beschikbaar voor bepaalde ouderdommen en locaties die samenhangen met klassieke beschavingen. De meeste archeologische vondsten die gebruikt zijn voor experimenten vinden hun oorsprong in Europa, het Midden-Oosten en Midden-Amerika en zijn op z'n hoogst 3000-5000 jaar oud. Voor andere delen van de wereld en voor grotere ouderdommen kunnen we alleen gebruik maken van beter beschikbare lava's. Helaas wordt de magnetische remanentie van de meeste lava's gedragen door grote multido-



Afb. 8. Het nemen van monsters op het meest oostelijke punt van Hawaï; deze lava is gevormd in 1960 en is door zijn enorme omvang en relatief goede bereikbaarheid het onderwerp van veel paleomagnetisch onderzoek. Doordat verschillende onderzoeksgroepen aan deze lava gewerkt hebben, kunnen we de resultaten van veel verschillende paleointensiteit-experimenten aan hetzelfde gesteente goed met elkaar vergelijken.



Afb. 9. Magma uit de Kilauea-vulkaan bereikt de zee vlakbij het dorpje Kalapana op Hawaii (5 mei 2010).

wordt de natuurlijke remanente magnetisatie vergeleken met magnetisaties die in het laboratorium thermisch ingebracht worden. Er is echter een andere manier om monsters te magnetiseren: door ze te onderwerpen aan een groot wisselveld in het bijzijn van een klein statisch veldje worden de magnetische deeltjes geforceerd in de richting van het wisselveld, met een lichte voorkeur voor de richting van het statische veldje. Door een grote hoeveelheid verschillende monsters van recente vulkaanuitbarstingen, waarvan de paleointensiteit reeds bekend is, te analyseren, blijkt dat er voor meer dan de helft van de geteste monsters een betrouwbare relatie bestaat tussen de paleoveldsterkte waarin het monster is afgekoeld en zo'n isotherme laboratoriummagnetisatie.

Door veel verschillende (zowel thermische en de nieuwe isotherme) methoden te combineren, blijkt het nu mogelijk te zijn om voor ongeveer 65 tot 70% van alle lava's die gemonsterd zijn een betrouwbare schatting te geven van de paleointensiteit. Voorheen werd meestal rekening gehouden met een slagingskans van slechts 15 tot 20%. Met deze nieuwe methode is voor Hawaii voor de afgelopen 1800 jaar een nieuwe curve van variaties in de intensiteit van het aardmagneetveld gemaakt (afb. 8-12). Door deze nieuwe curve te vergelijken met curves voor Europa, Midden-Amerika en Japan voor dezelfde tijdsspanne kunnen we laten zien dat de sterkte van het aardmagneetveld in het afgelopen millennium wereldwijd met ongeveer 20% is afgenomen (afb. 13). Daarnaast is met de nieuwe methode duidelijk geworden dat er regionaal grote verschillen in de sterkte van het aardmagneetveld voorkomen. Zo zien we in de curves van Hawaii, Europa en Midden-Amerika kortstondige pieken in de



main-korrels zodat het erg lastig is om betrouwbare schattingen van de intensiteit

Afb. 10. Pas gevormde lava is soms al snel beloopbaar, al slijten je zolen door de hitte en de vlijmscherpe scherven die zich boven een touwlava vormen erg snel. Deze flow was op het moment van de foto nog actief; de korst was al gestold, maar onder deze korst stroomde de magma nog richting zee. Foto genomen op 5 mei 2010 vlakbij Kalapana (Hawaii).

van het aardmagneetveld te verkrijgen. Desondanks zijn deze lava's de enige potentiële bron van absolute paleointensiteiten die beschikbaar is voor regio's en ouderdommen buiten de periode van de klassieke beschavingen.

### Kwaliteitscriteria

In de afgelopen decennia zijn er verschillende inspanningen geweest om deze multidomain-effecten in paleointensiteit-experimenten te voorkomen, te verminderen, of op z'n minst te identificeren. Robert Coe introduceerde in de jaren '60 en '70 van de vorige eeuw een aantal parameters om de kwaliteit van de resultaten van Thellier-achtige paleointensiteitmethoden te beschrijven. Daarop volgend, in de jaren '80, '90 en in het eerste decennium van deze eeuw, zijn steeds meer kwaliteitscriteria en variaties in laboratoriumprocedures voor Thellier-achtige experimenten voorgesteld. Daarnaast zijn er inspanningen geweest om alleen het meest geschikte vulkanisch materiaal, zoals geïsoleerde kristallen of snel afgekoeld vulkanisch glas, te gebruiken voor paleointensiteit-experimenten. Om de ongewenste effecten van verhitting tijdens paleointensiteit-experimenten te vermijden, kunnen magnetisaties ook verwijderd en ingebracht worden met een 'microwave'-methode.

### Promotieonderzoek

Tijdens mijn promotieonderzoek heb ik een nieuwe methode ontwikkeld om de paleointensiteit van lava's te bepalen. Een groot voordeel van deze methode is dat de monsters niet verhit hoeven te worden. In traditionele paleointensiteit-experimenten



Afb. 11. Touwlava vlakbij Kalapana, Hawaii. Het stroperige gedrag van het magma is goed te zien. Foto genomen op 5 mei 2010 vlakbij Kalapana (Hawaii).

intensiteit. In zo'n piek kan het magneetveld in maximaal twee eeuwen lokaal bijna verdubbelen en weer afnemen tot 'normale' waarden. Tot voor kort werd gedacht dat regionale geomagnetische fenomenen langzaam een beetje naar het westen verschuiven door de zogenaamde 'Westward drift'. Door de timing van de pieken op verschillende plaatsen op de wereld kunnen we nu echter laten zien dat deze pieken niet langzaam naar het westen verschuiven, maar onafhankelijke regionale geomagnetische verschijnselen moeten zijn.

### Kosmische straling

Een verzwakt aardmagneetveld vermindert de bescherming



Afb. 12. De oude randweg om het eiland Hawaii was al lang afgesneden door lava, maar nu wordt ook de parkeerplaats aan de rand van het actieve gebied van de vulkaan langzaam verteerd door het magma. Het vuur op de weg is brandend asfalt, met een stinkende rookpluim tot gevolg.

neactiviteit: vliegtuigen volgen dan zuidelijker - en daarmee langere - routes. Ook bij de bouw van satellieten is het gezien de verwachte lange levensduur verstandig rekening te houden met een mogelijke verdere verzwakking van het aardmagneetveld en is het verstandig de elektronische componenten goed af te schermen tegen straling van buitenaf.

### Speculeren over ompolingen

De gemiddelde omkeringsfrequentie van de magnetische polen was de afgelopen miljoenen jaren ongeveer eens per 200.000 tot 300.000 jaar. Omdat de laatste omkering 780.000 jaar geleden plaatsvond, is het in het licht van de recente afname van de

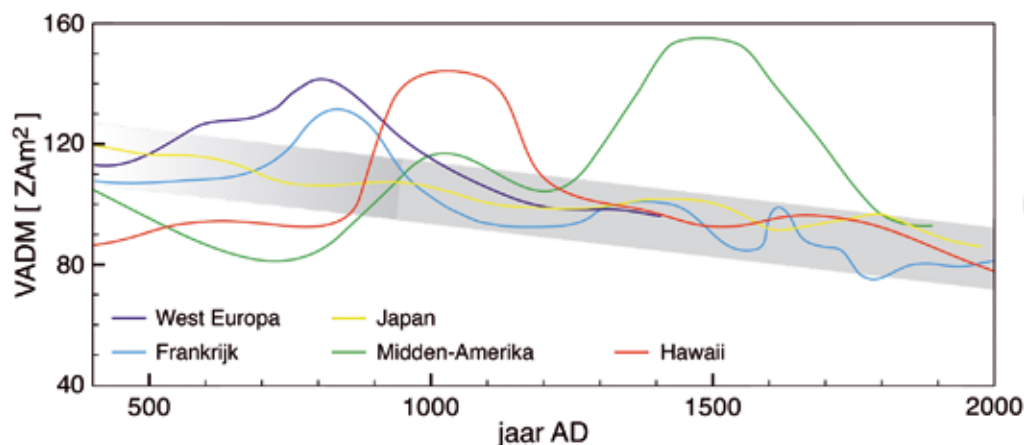
sterkte van het aardmagneetveld erg verleidelijk om te speculeren over een op handen zijnde omkering van de geomagnetische polen. Daar is het echter nog veel te vroeg voor. De intensiteit van het aardmagneetveld is ondanks de recente afname nog steeds 30% hoger dan het gemiddelde over de afgelopen miljoenen jaren. Voordat een omkering volgens de meest recente modellen mogelijk wordt, moet de veldsterkte nog eens 70% afnemen. Met de huidige afnamesnelheid zou dat nog ongeveer 3000 jaar duren. Gezien het grillige gedrag van het aardmagneetveld is er echter geen enkele reden om aan te nemen dat de afnemende trend van het afgelopen millennium zich nog zo lang zal doorzetten.

De recent gelanceerde SWARM-satellieten van de ESA uit Noordwijk zullen in de komende jaren meer details onthullen over het gedrag van het aardmagneetveld en de werking van de geodynamo. Wellicht dat we na het bestuderen van die data betere conclusies over een mogelijke op handen zijnde omkering kunnen trekken.

*Alle foto's zijn van de auteur, tenzij anders aangegeven.*

tegen (elektromagnetische) kosmische straling op het aardoppervlak. Voor zover wij nu weten kan deze straling voor de mensheid weinig kwaad. Het is een soortgelijke straling die een mobiele telefoon en Wi-Fi-router uitzendt voor draadloze communicatie. Sommige wetenschappers hebben echter een correlatie voorgesteld tussen de snelle regionale variaties in het aardmagneetveld en het opkomen en ten ondergaan van klassieke beschavingen, maar deze correlaties zijn zeer zwak en daardoor niet overtuigend. Daarnaast is er geen mechanisme bekend waarmee het aardmagneetveld deze beschavingen direct zou hebben beïnvloed en is er dus geen sprake van een bewezen causaliteit.

Waar in de huidige maatschappij echter sterk verschilt van klassieke beschavingen is het grootschalige gebruik van draadloze communicatie: denk bijvoorbeeld aan mobiele telefonie, satellieten en radiografische communicatie met vliegtuigen. Een verzwakt magnetisch veld en de daarmee afgenomen bescherming tegen kosmische straling zou wel invloed kunnen hebben op deze nieuwe technologieën. Zo worden de vliegroutes van trans-Atlantische vluchten nu al aangepast bij versterkte zon-



Afb. 13. De sterkte van het aardmagneetveld (uitgedrukt in VADM: 'Virtual Axial Dipole Moment') in de afgelopen 1600 jaar voor vier verschillende locaties: West-Europa, Midden-Amerika, Hawaii en Japan. Alle curves laten een dalende trend zien voor de afgelopen 1000 jaar; dit is in lijn met de afname van de 'dipool-bijdrage' aan het aardmagneetveld. Daarnaast laat een aantal curves snelle fluctuaties in de veldsterkte zien die lokaal van karakter zijn.

Bron: De Groot, L.V. et al., *Nat. Commun.* 4:2727 doi: 10.1038/ncomms3727 (2013).