

De Zuid-Atlantische Anomalie

Op veldwerk om het aardmagneetveld te reconstrueren

Het aardmagneetveld ontstaat in de vloeibare buitenkern van de aarde en varieert door de tijd. Zo is de sterkte van het aardmagneetveld de laatste duizend jaar afgenomen en ontstond er een anomalie onder Zuid-Amerika. Met paleomagnetisch onderzoek kunnen we het gedrag van het aardmagneetveld in het verleden reconstrueren.

Lang geleden, voordat mobiele telefoons met navigatiefunctie bestonden, moesten reizigers vertrouwen op een kompas dat hen de richting van het noorden wees. Dat de naald van een kompas naar het noorden wijst, is mogelijk omdat de aarde een magneetveld heeft. Dit aardmagneetveld is essentieel voor het leven op aarde, omdat het onze atmosfeer beschermt tegen elektromagnetisch geladen deeltjes van de zon. Deze deeltjes worden door het aardmagneetveld afgebogen zodat 95% van deze deeltjes het aardoppervlak nooit bereikt. De deeltjes die toch naar de aarde toe geleid worden, volgen de veldlijnen van het aardmagneetveld naar de noord- en zuidpool waar ze, als ze in botsing komen met zuurstof en stikstof, het noorderlicht (en het minder bekende zuiderlicht) veroorzaken. Tijdens zonnestormen stuurt de zon meer geladen deeltjes op aarde af;

het noorderlicht is dan soms ook in Nederland te zien. Sterke zonnestormen kunnen voor problemen zorgen omdat zo'n wolk deeltjes het aardmagneetveld beïnvloedt. Zo was er in 1859 een zeer grote magnetische storm, bekend als het Carrington-evenement, waarbij een enorme zonnevlam deeltjes richting de aarde blies. Als gevolg daarvan was het noorderlicht bijna overal op aarde te zien en werden telegraafsystemen in Europa en Noord-Amerika beschadigd. Deze gebeurtenis vond plaats toen er nog niet zo'n uitgebreid communicatie- en elektriciteitsnetwerk bestond als vandaag. Een dergelijke magnetische storm zou nu een veel grotere impact hebben op onze samenleving.

Het aardmagneetveld

Het aardmagneetveld wordt diep onder onze voeten opgewekt, in de

vloeibare buitenkern van de aarde. De aarde heeft een vaste binnenkern en een vloeibare buitenkern, beide voornamelijk bestaande uit ijzer en nikkel, daarom is deze vloeistof elektrisch geleidend. Door de thermische gradiënt in de aarde ontstaat convectie in deze vloeibare massa. De corioliskracht als gevolg van de draaiing van de aarde veroorzaakt vervolgens 'Taylorkolommen', cilindrische werelings parallel aan de draaias van de aarde. Omdat de vloeistof elektrisch geleidend is, ontstaat er een zichzelf versterkende 'geodynamo' die het aardmagneetveld opwekt: in de geleidende vloeistof ontstaan stroomlussen die magneetvelden opwekken (de wet van Ampère). Deze veranderende magneetvelden genereren elektrische velden (wet van Faraday). Samen oefenen deze magneet- en elektrische velden krachten uit op de lading in de stroomlussen (de Lorentzkracht). Dit



Figuur 1. Een deel van het veldwerkteam op Taveuni, Fiji. V.l.n.r.: Maureen van den Bosch, Romy Meyer, Liz van Grinsven, Lival Tubuiltamana en Ilisapeci Tiko.

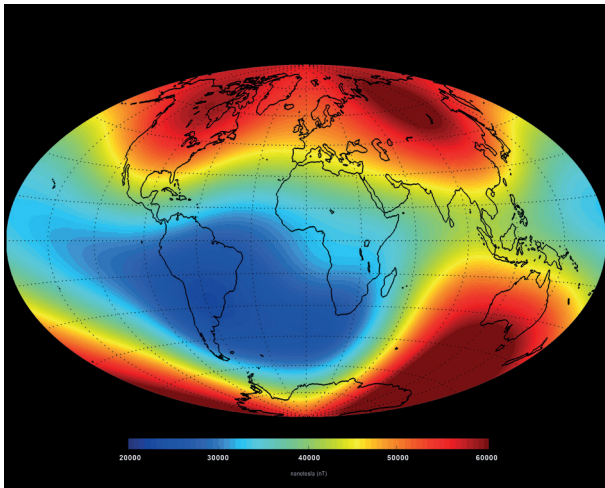
versterkt de stromen die magneetvelden opwekken en zo ontstaat er een positieve terugkoppeling in het systeem, gevoed door de thermisch gedreven turbulentie in de vloeibare massa.

Het aardmagneetveld is een vectorveld dat in eerste benadering kan worden voorgesteld als een dipool met enkel een magnetische noord- en zuidpool op de plekken waar ook de geografische noord- en zuidpolen zich bevinden. Omdat het aardmagneetveld in een vloeibare massa wordt opgewekt ontstaat er echter een complexer veld dat het beste beschreven kan worden als een gewogen combinatie van een dipool en hogere-orde configuraties zoals quadrupolen en octopolen. De vloeibare oorsprong van het aardmagneetveld verklaart ook waarom de polen ‘wandelen’: de magnetische noord- en zuidpolen verschuiven jaarlijks tientallen tot honderden kilometers ten opzichte van de geografische polen. Daardoor wijst een kompas nooit precies naar dezelfde plek. Omdat de Taylorkolommen zich door de corioliskracht richten langs de draaias van de aarde is het aardmagneetveld gemiddeld over

lange geologische tijdvakken wel een nette dipool waarvan de magnetische polen samenvallen met de geografische noord- en zuidpool. Sinds 1840 worden veranderingen in het aardmagneetveld gemeten in geomagnetische observatoria en sinds de jaren zeventig van de vorige eeuw ook met behulp van satellieten. Niet alleen de richting van het aardmagneetveld varieert, ook de intensiteit van het aardmagneetveld verandert. Sinds we de sterkte kunnen meten, zien we dat de sterkte van het aardmagneetveld, het dipoolmoment, met 6% per eeuw afneemt. Terwijl juist de sterkte van het aardmagneetveld van belang is om ons tegen de geladen deeltjes van de zon te beschermen. De intensiteit is niet overal op aarde hetzelfde; bij een perfecte dipool is het aardmagneetveld bij de polen twee keer zo sterk als op de evenaar. Maar zoals eerder besproken is het aardmagneetveld geen perfecte dipool, waardoor er afwijkingen zijn van dit algemene beeld. De grootste afwijking op dit moment is een gebied van lage veldsterkte boven Zuid-Amerika, de Zuid-Atlantische Anomalie.

Gat in het aardmagneetveld

De Zuid-Atlantische Anomalie (ZAA) is een gebied van lage intensiteit boven Zuid-Amerika (figuur 2). De sterkte van het magneetveld is daar ongeveer $22 \mu\text{T}$, terwijl het op dezelfde breedtegraad in Australië $50 \mu\text{T}$ is. In het gebied van dit ‘gat’ in het aardmagneetveld kunnen geladen zonnedeeltjes dieper doordringen in de atmosfeer, wat bijvoorbeeld effect kan hebben op (radio-)communicatie en satellieten in het gebied. Met satellieten kunnen we de veranderingen van deze anomalie meten. Zo zien we bijvoorbeeld dat de anomalie zich met $0,3^\circ$ per jaar naar het westen verplaatst en dat de anomalie langzaam nog verder verzwakt. Deze observaties passen goed bij het afnemen van het wereldwijde dipoolmoment. De data over het aardmagneetveld van satellieten en geomagnetische observatoria gaan terug tot respectievelijk ongeveer 1970 en 1840. Om meer gedegen uitspraken te kunnen doen over de oorsprong, evolutie en mogelijk de toekomst van de ZAA hebben we informatie nodig over het aardmagneetveld die verder teruggaat in de tijd. Zulke informatie over het



Figuur 2. De sterkte van het aardmagneetveld. De schaal loopt van blauw (minder sterk) naar rood (heel sterk).



Figuur 3. Gesteentebor waar mee tijdens paleomagnetisch veldwerk de kernen worden geboord.

aardmagneetveld is te verkrijgen door paleomagnetisch onderzoek te doen aan vulkanisch gesteente.

Paleomagnetisch onderzoek

In gesteente zitten verschillende mineralen, waarvan sommige mineralen bij kamertemperatuur gemagnetiseerd zijn. Deze permanent magnetische mineralen kun je beschouwen als kleine magneten die een richting en een sterkte hebben. In vulkanisch gesteente gaat het voornamelijk om ijzeroxiden, met name het mineraal magnetiet. Wanneer een vulkaan uitbarst, heeft de lava die uit de vulkaan stroomt en op de flanken terecht komt een temperatuur van meer dan duizend graden Celsius. De ijzeroxiden zijn de laatste mineralen die tijdens het stollen van de lava ontstaan, vaak vullen ze de ruimte tussen grotere mineralen die bij hogere temperaturen al zijn ontstaan. Als de ijzeroxides nog verder afkoelen, raken ze gemagnetiseerd door het magneetveld waarin ze afkoelen, het aardmagneetveld. De temperatuur waarbeneden een specifiek magnetisch mineraal zijn magnetisatie vasthoudt, wordt de curietemperatuur genoemd. De curietemperatuur van een mineraal wordt bepaald door onder andere de precieze chemische samenstelling, vorm en grootte van het mineraal. Door het proces van afkoeling verkrijgt vulkanisch gesteente een

magnetisatie die overeenkomt met het aardmagneetveld voor de specifieke plek van de vulkaan en het specifieke moment van de uitbarsting. De meeste vulkanen zijn vele jaren actief en hebben lava van meerdere uitbarstingen. Zo wordt een vulkanisch gebied als het ware een archief van veranderingen van het aardmagneetveld voor die plek op aarde. Door van verschillende plekken op aarde dit soort gegevens te combineren kun je veranderingen in het aardmagneetveld door de tijd reconstrueren. Met genoeg data is het mogelijk om een wereldwijd model van het aardmagneetveld te reconstrueren.

Door bestudering van satellietdata weten we dat de ZAA de afgelopen tientallen jaren naar het westen beweegt; we weten alleen niet of de ZAA altijd al naar het westen heeft bewogen en wanneer en waar de ZAA is ontstaan. Om het gedrag van de ZAA in de loop van de afgelopen tijd te bestuderen, hebben we van veel verschillende locaties op aarde een magnetisch archief nodig. De grote uitdaging hierbij is dat de ZAA zich op het zuidelijk halfrond bevindt en de meeste beschikbare velddata van het noordelijke halfrond komen. Door op geschikte plekken op het zuidelijk halfrond vulkanisch gesteente te monsteren, hopen we uit te kunnen zoeken of de ZAA een fenomeen is

dat zich beperkt tot Zuid-Amerika, of dat het ergens anders op het zuidelijk halfrond ontstaan is en zich in de loop van vele eeuwen naar de huidige locatie heeft bewogen.

Paleomagnetisch veldwerk

Voor ons onderzoek naar de ZAA hebben wij de fantastische mogelijkheid gekregen om naar bijzondere vulkanische gebieden op het zuidelijk halfrond op veldwerk te gaan en hier het magnetisch archief te monstern. Voor het onderzoek naar het recente gedrag van de ZAA is alleen vulkanisch gesteente van de afgelopen 5000 jaar interessant. Voor veldwerklocaties hebben wij ons daarom beperkt tot vulkanische gebieden op het zuidelijk halfrond die de afgelopen 5000 jaar actief zijn geweest. In 2022 zijn we al op veldwerk geweest naar het vulkanische eiland La Réunion, in 2024 gaan we naar het vulkanisch actieve eiland Bali in Indonesië. Deze zomer gingen we naar Taveuni in Fiji. Fiji is een vulkanische eilandengroep in de Grote Oceaan, ongeveer 2500 kilometer ten oosten van Australië. Fiji ligt op een ideale locatie, waar in de verre omstreken bijna niets bekend is van het aardmagneetveld van de afgelopen paar duizend jaar. Het meest recente vulkanisch actieve eiland van Fiji is Taveuni, dat in de afgelopen paar duizend jaar meerdere fases van

erupties heeft gekend. Dit eiland, ongeveer drie keer zo groot als Texel, was daarom de perfecte plek voor ons onderzoek naar de ZAA. Op Fiji hebben wij samengewerkt met medewerkers en studenten van de University of the South Pacific (figuur 1). Mede door de goede samenwerking was het veldwerk succesvol en we hebben daarnaast veel van elkaar kunnen leren.

Voor het uitvoeren van een paleomagnetisch onderzoek worden eerst de locaties bepaald waar gemonsterd moet worden, dat zijn in ons geval plekken waar door eerdere onderzoekers door middel van koolstofdatering de ouderdom van het vulkanisch gesteente vastgesteld is. Vervolgens gaan wij in het veld op zoek naar deze gedateerde vulkanisch gesteenten. Deze locaties zijn soms makkelijk te bereiken, bijvoorbeeld als ze naast een weg liggen, maar soms is dat een stuk ingewikkelder en is een tocht door de jungle nodig. Wanneer de lava is gevonden wordt deze met een gesteenteboor gemonsterd; per locatie worden meerdere cilindervormige kernen geboord in het gesteente (figuur 3). Vervolgens wordt de richting waaronder geboord is vastgelegd (figuur 4), zodat de gemeten magnetische vector kan worden gecorrigeerd voor de oriëntatie van de kern.

Paleomagnetisch labwerk

Na het veldwerk worden de monsters meegenomen naar het paleomagnetisch laboratorium Fort Hoofddijk van de Universiteit Utrecht. Daar worden de magnetische eigenschappen van het gesteente gemeten. Het belangrijkste doel van deze metingen is om de magnetische vector, richting en sterkte, van de verschillende monsters te bepalen. Om de richting van de magnetische vector te reconstrueren wordt elk monster stapsgewijs verhit in een veldvrije oven, waarna bij elke stap de magnetisatie van het monster wordt gemeten. Met elke verhittingsstap verdwijnt een deel van de magnetisatie, totdat boven de curietemperatuur het monster niet meer magnetisch is. Om de lengte van de magnetische vector (de sterkte van het aardmagneetveld) vast te stellen



Figuur 4. Na het boren worden de gesteentekernen georiënteerd met een kompas.

maken we gebruik van het feit dat de sterkte van de magnetisatie in het gesteente lineair afhankelijk is van de sterkte van het (aard)magneetveld waarin het gesteente afkoelt: een twee keer zo sterk aardmagneetveld veroorzaakt een twee keer zo sterke magnetisatie van het gesteente. In het lab verhitten we de monsters daarvoor niet alleen in een veldvrije oven, maar herhalen we elke temperatuurstep in een oven met een veldsterkte van $50 \mu\text{T}$. Door de afname van de natuurlijke magnetisaties (de stappen in de veldvrije oven) uit te zetten tegen magnetisaties die in de oven met een bekende veldsterkte zijn ingebracht, kan de verhouding tussen de afname van de natuurlijke magnetisatie en de toename van de lab-magnetisaties worden bepaald. Dit is ook de verhouding tussen het aardmagneetveld waarin het gesteente is afgekoeld en het bekende veld dat in de oven gebruikt is. Daarmee is de sterkte van het aardmagneetveld waarin het gesteente is afgekoeld dus uit te rekenen.

Ontstaan van de Zuid-Atlantische Anomalie

In 2022 hebben we veldwerk gedaan op La Réunion, een eiland in de Indische Oceaan ten oosten van Madagaskar. Daar vonden we een snelle verandering in het magneetveld rond het jaar 1400 die toe te schrijven

zou kunnen zijn aan het ontstaan van de ZAA én in lijn kan zijn met de snelheid waarmee de ZAA beweegt. Dit zou erop kunnen wijzen dat de ZAA ten oosten van het Afrikaanse continent is ontstaan en naar het westen beweegt. De data die we de komende tijd zullen verkrijgen uit de monsters van Taveuni en Bali zullen meer duidelijkheid geven over het ontstaan en de evolutie van de ZAA. Het meest complete beeld van de veranderingen in het aardmagneetveld, inclusief de ZAA, zal ontstaan als we onze nieuwe data combineren met al bestaande data van het noordelijk halfrond en die integreren in een wereldwijd model van het aardmagneetveld. Uiteindelijk hopen we met dit model zelfs een voorspelling te kunnen doen van het gedrag van de ZAA in de komende tientallen jaren.

Romy Meyer en Liz van Grinsven zijn beiden promovendus aan de Universiteit Utrecht. Na hun studie Aardwetenschappen doen zij nu hun promotieonderzoek naar recente veranderingen in het aardmagneetveld onder begeleiding van **Lennart de Groot**. Ondanks een stoeve start door reisbeperkingen door COVID-19 hopen zij binnenkort een gedetailleerde beschrijving te kunnen geven van het gedrag van de grootse afwijking in het huidige aardmagneetveld: de Zuid-Atlantische Anomalie.
L.V.deGroot@uu.nl