Louis Néel: meester van het magnetisme

Nobelprijswinnaar Louis Eugène Félix Néel (22 november 1904 – 17 november 2000) ontdekte twee nieuwe soorten magnetisatie, redde op een slimme manier honderden levens tijdens de Tweede Wereldoorlog, en was een grondlegger van de studie van paleomagnetisme. Vandaag, precies 115 jaar na zijn geboortedag, blikken we terug op zijn lange lijst van prestaties.

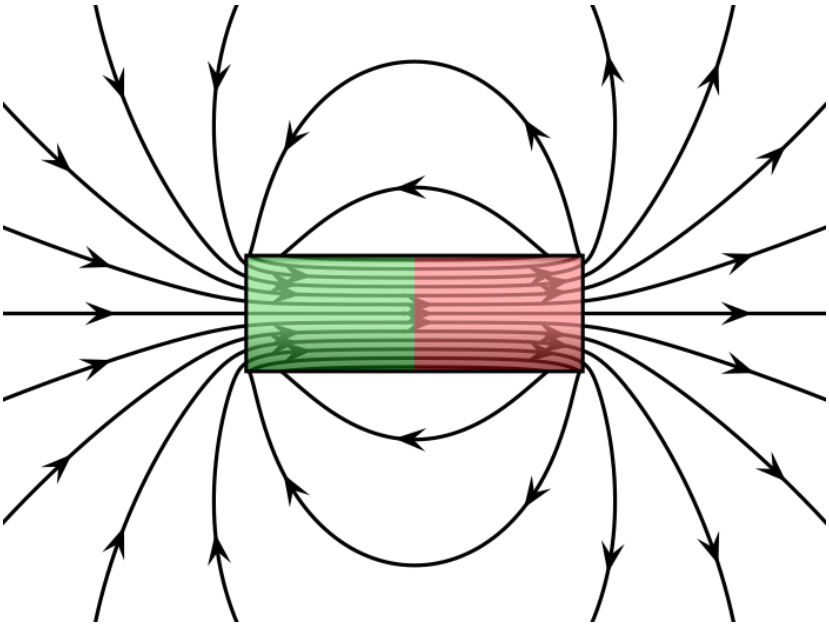


Afbeelding 1. Louis Néel.Afbeelding van Wikipedia.

Alle magneten bestaan uit mini-staafmagneten

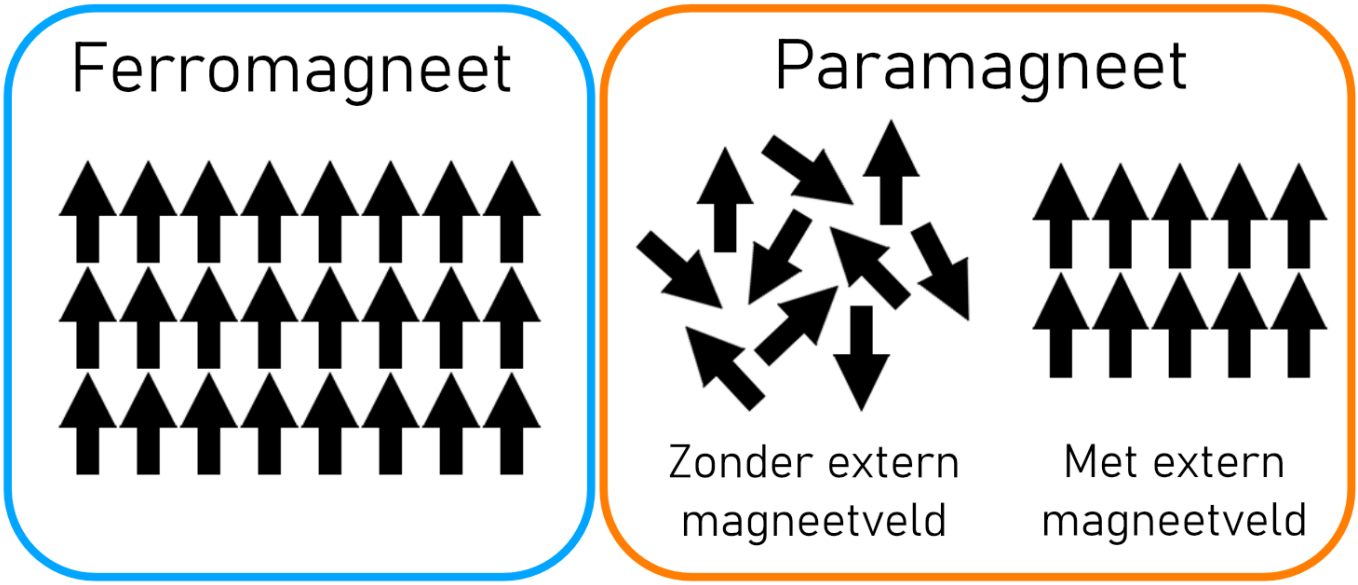
Magnetische materialen kun je beschrijven als een verzameling van vele kleine magnetische *dipoolmomenten*. Ieder dipoolmoment werkt als een minuscule staafmagneet, en elk creëert zijn eigen magneetveld – zie afbeelding 2. Wijzen alle dipoolmomenten in een materiaal in dezelfde richting, dan ontstaat er een netto magnetisch veld. Wijzen ze in willekeurige

richtingen, dan annuleren ze elkaars magneetveld en is het geheel niet magnetisch. De oorsprong van deze dipoolmomenten ligt in de quantummechanische impulsmomenten, oftewel de *spins*, van elektronen, en in hoe die elektronen gebonden zijn aan de atomen. De details hiervan vormen een onderwerp voor een artikel op zich, maar dat bewaren we voor een andere keer.



Afbeelding 2. Het magnetische veld in en rondom een staafmagneet.Magnetische veldlijnen geven de richting van het magnetische veld aan. Binnen de magneet zelf lopen alle veldlijnen parallel van de zuid- (groen) naar de noordpool (rood). Het totale veld kunnen we ook samenvatten in een enkele pijl (of 'vector'): het *magnetisch dipoolmoment* van de magneet. Afbeelding van Geek3 (aangepast).

Toen Néel begon aan zijn studie van magnetisme, in 1928, kende men nog maar twee soorten magnetische fasen. In de *paramagnetische* fase zijn materialen van zichzelf niet magnetisch, omdat de magnetische dipoolmomenten zich helemaal onafhankelijk van elkaar gedragen. Paramagneten worden echter wel gemagnetiseerd wanneer ze in een extern magneetveld liggen, omdat het externe veld de dipoolmomenten in dezelfde richting doet wijzen. In de *ferromagnetische* fase, daarentegen, voelen de dipoolmomenten wél de richting van hun buren, en proberen ze om die reden al zoveel mogelijk in dezelfde richting te wijzen. Eenmaal in één richting gemagnetiseerd, blijven ferromagneten daarom ook magnetisch zonder extern veld. Dit is hoe de permanente magneten in bijvoorbeeld koelkastmagneten werken.



Afbeelding 3. De dipoolmomenten in ferro- en paramagneten.Afbeeldingen van ACGrain (aangepast).

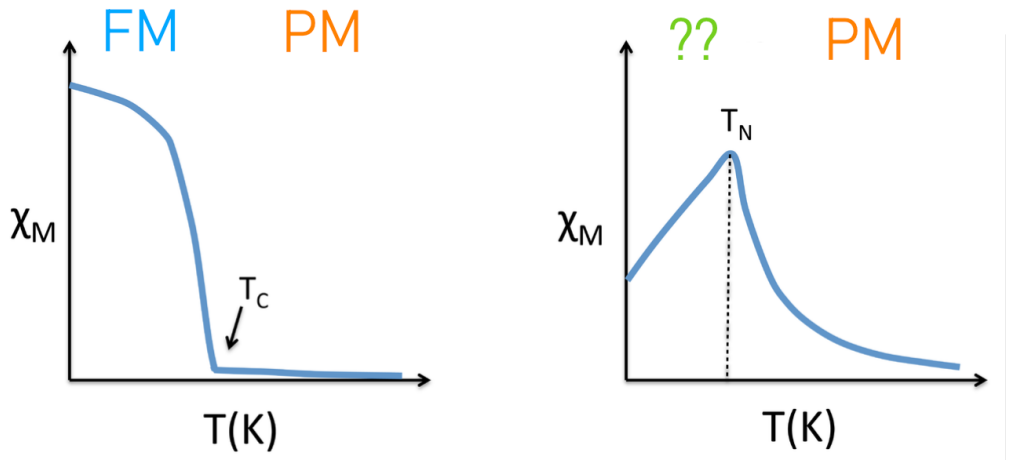
In welke fase een magnetisch materiaal zich bevindt, hangt af van zijn temperatuur. Hoe hoger de temperatuur is, hoe meer de individuele dipoolmomenten in een materiaal kunnen rondbewegen, onafhanelijk van hun buren en onafhankelijk van externe magneetvelden. Op die manier verstoort de thermische energie de magnetische orde van het materiaal, en kun je van een ferromagneet dus een paramagneet maken door het materiaal van de magneet op te warmen. De temperatuur waarbij deze overgang plaatsvindt heet de *Curietemperatuur*. IJzer, kobalt en nikkel zijn de enige elementen (in pure metaalvorm) met een Curietemperatuur boven kamertemperatuur. Het zijn dus deze elementen die je terug zult vinden in vrijwel alle permanente magneten die we gebruiken.

Een (anti-)magnetisch mysterie

Een standaardmethode om de Curietemperatuur van een materiaal te achterhalen is door het in een extern magnetisch veld te plaatsen, en te kijken naar hoe sterk het daardoor gemagnetiseerd wordt. De verhouding tussen de magnetisatie van het materiaal en het toegepaste magneetveld heet de *magnetische susceptibiliteit*, en wordt vaak met de variabele χ (de Griekse letter ‘chi’) aangeduid.

In de paramagnetische fase magnetiseren materialen makkelijk bij lagere temperaturen, omdat elektronen weinig thermische energie hebben om tegen het externe magneetveld in te gaan. Als je een paramagneet afkoelt voorbij de Curietemperatuur, beginnen de

magnetische dipoolmomenten aan elkaar te koppelen. De magnetisatie van het materiaal vanaf de Curietemperatuur stijgt hierdoor snel, omdat nu niet alleen het externe veld, maar ook deze koppeling de dipoolmomenten in de dezelfde richting trekt. De overgangstemperatuur is door dit verschil in gedrag makkelijk te herkennen als een duidelijke 'knik' in de grafiek van χ als functie van de temperatuur – zie de linkerafbeelding in afbeelding 4. (Hier gaan we er vanuit dat je een materiaal afkoelt van de paramagnetische naar de ferromagnetische fase; andersom werkt het anders!)

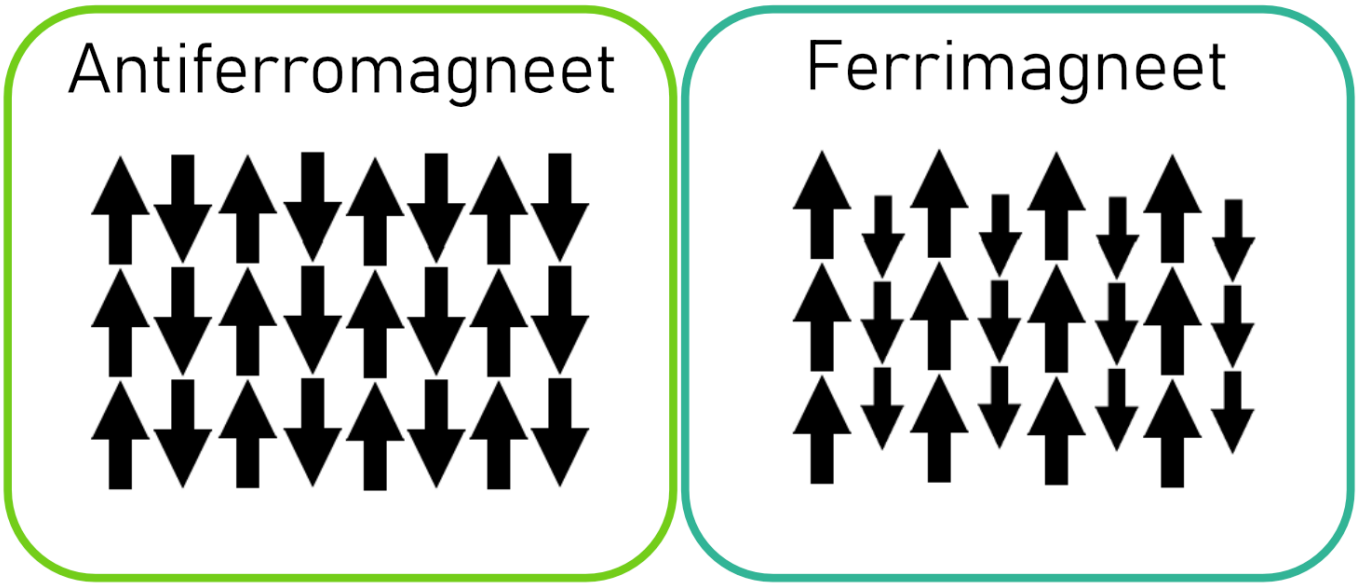


Afbeelding 4. De temperatuurafhankelijkheid van de magnetisce susceptibiliteit.De temperatuurafhankelijkheid van para- en ferromagneten (links) was goed beschreven door bestaande theorie. In sommige materialen ging de susceptibiliteit echter omlaag bij lagere temperatuur (rechts). Hoe dat kon, was een raadsel! Afbeelding van Temp5psu.

Néel had echter opgemerkt dat de bestaande theorie van magnetisme toch nog niet compleet was. Er waren namelijk materialen waarbij de susceptibiliteit χ niet omhoog ging bij lager wordende temperatuur, maar vanaf een bepaald punt hetzelfde bleef, of zelfs *omlaag* ging, zoals in de rechterafbeelding van afbeelding 4. Er moest dus kennelijk een andere magnetische fase, met ander magnetisch gedrag dan para- of ferromagneten bestaan!

De cruciale realisatie die Néel bereikte, was dat de dipoolmomenten zich ook zo konden koppelen dat ze allemaal juist in de *tegenovergestelde* richting van die van hun naaste buren proberen te wijzen. Dat wil zeggen dat ze anti-parallel gaan liggen, zoals in afbeelding 5 links. Zo'n geordende fase heeft (als er geen extern veld is) ondanks de ordening juist *geen* totale magnetisatie, omdat alle dipoolmomenten elkaar opheffen. In een magneetveld werkt

deze koppeling tussen de dipoolmomenten tegen het magnetiserende effect van het externe veld in. Dit kon de experimentele data perfect verklaren. De fase die Néel ontdekte heet *antiferromagnetisch*, en de temperatuur waarop de faseovergang naar paramagnetisch gedrag plaatsvindt heet tegenwoordig (natuurlijk) de *Néeltemperatuur*.



Afbeelding 5. De dipoolmomenten in antiferromagneten en ferrimagneten.Afbeeldingen van ACGrain (aangepast).

Als laatste toevoeging toonde Néel aan dat sommige materialen qua fase ook ergens tussen een ferromagneet en antiferromagneet in kunnen zitten. Soms heffen de anti-parallelle dipoolmomenten elkaar bijvoorbeeld niet helemaal op. Dit kan gebeuren wanneer het materiaal meerdere soorten magnetische elementen of ionen (bijvoorbeeld de verschillend geladen ijzerionen Fe^{2+} en Fe^{3+}) bevat. Deze fase – zie afbeelding 5 rechts – noemde hij *ferrimagnetisch*. De andere mogelijkheid is dat de dipoolmomenten in een antiferromagneet, die verticaal allemaal anti-parallel staan, allemaal een beetje zijwaarts kantelen. Zo produceren ze een zijwaarts magneetveld. Dit heet een *gekantelde antiferromagneet*.

Al dit werk kreeg uiteindelijk de hoogste waardering: in 1970 kreeg Néel de Nobelprijs “voor fundamenteel werk en ontdekkingen met betrekking tot antiferromagnetisme en ferrimagnetisme die hebben geleid tot belangrijke toepassingen in de fysica van vaste stoffen.”

Néel en de Duitse zeemijnen

Néel heeft in zijn tijd zelf ook hard gewerkt aan toepassingen van zijn kennis. In 1939, enkele maanden nadat de Tweede Wereldoorlog was uitgebroken, vroeg de Franse marine Néel om hulp. Niet als militair: als kind had Néel namelijk polio opgelopen, waardoor hij kreupel was en mank liep. Nee, de marine had hem nodig omdat men een beschermingsmethode zocht tegen de Duitse magnetische zeemijnen.

Oorlogsschepen, die van staal gemaakt waren, waren namelijk altijd licht gemagnetiseerd door het aardmagnetisch veld. Kwam zo'n schip in de buurt van een magnetische mijn, dan voelde de mijn het magneetveld van het schip en detoneerde. De Britten waren erachter gekomen hoe deze mijnen werkten, omdat ze er een gevonden hadden en hadden kunnen ontmantelen.

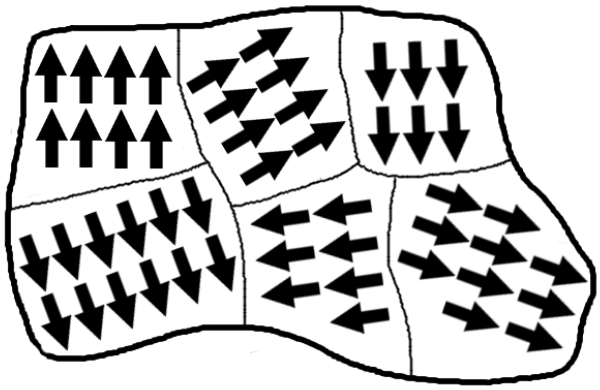


Afbeelding 6. Een Duitse magnetische mijn.Dit is de mijn die de Britten in 1939 vonden dichtbij Shoeburyness. Afbeelding van Imperial War Museums.

Om te zorgen dat zulke mijnen niet af zouden gaan, moest je de schepen demagnetiseren. Tegenwoordig is een standaard manier om dit te doen door een continue, kleine elektrische stroom rond de romp van het schip te laten lopen. Deze circulaire stroom werkt als een elektromagneet, ter grootte van het hele schip! Hiermee kun je een magneetveld maken dat

gemiddeld precies het verticale gedeelte van de magnetisatie van het schip annuleert. Oorlogsschepen in 1939 hadden echter nog niet zo'n demagnetisatiesysteem geïnstalleerd, en Néel moest op zoek naar een snellere en goedkopere manier om schepen te demagnetiseren.

Dankzij zijn achtergrond in de natuurkunde van magneten was Néel bekend met de wet van Rayleigh. Deze empirische wet beschrijft hoe een ferromagnetisch materiaal (zoals staal) reageert op een (zwak) extern magneetveld. Van nature bestaat zo'n materiaal uit verschillende magnetische domeinen – zie afbeelding 7. In een extern magneetveld zullen domeinen die ongeveer dezelfde magnetisatierichting hebben als het externe magneetveld groeien, en zo de andere domeinen doen krimpen. De wet van Rayleigh zegt dat de totale magnetisatie van het materiaal door dit proces groeit als het *kwadraat* van de sterkte van het externe veld. Hoe groter het toegepaste magneetveld, des te meer verandert dus de magnetisatie van het materiaal; bij een twee keer zo groot magneetveld wordt de magnetisatie vier keer zo groot.



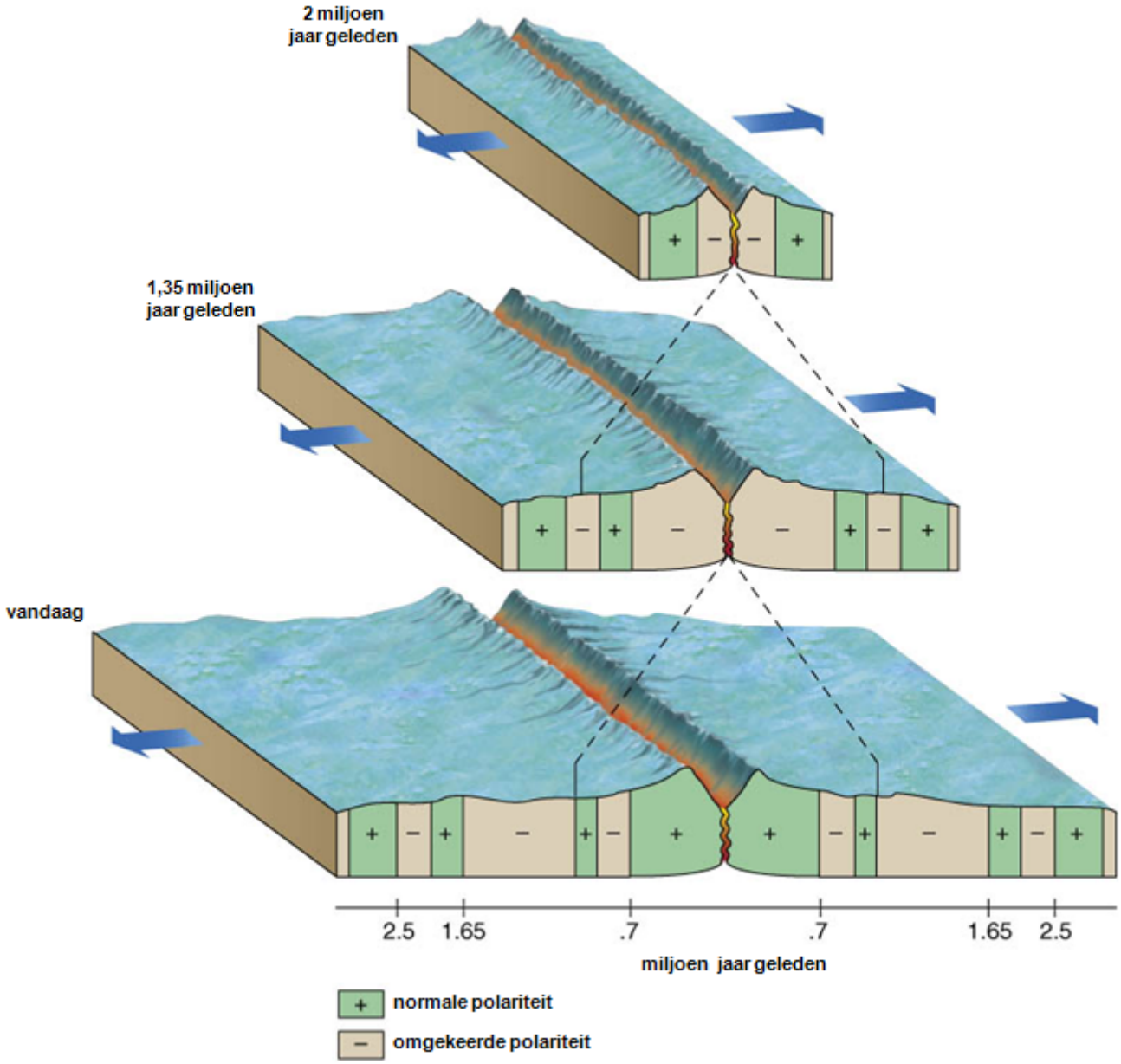
Afbeelding 7. Magnetische domeinen in een ferromagneet.Bij afwezigheid van een extern magneetveld magnetiseert een ferromagnetisch (of ferrimagnetisch) materiaal normaal in zogeheten *Weissdomeinen*. Afbeelding van ACGrain.

In plaats van op ieder schip een demagnetisatiesysteem te installeren, gebruikte Néel Rayleighs wet om schepen al in de haven te demagnetiseren. Terwijl het schip nog aangemeerd was, werd een stroomkabel om de romp gelegd. Door tijdelijk een sterke stroom door deze kabel te laten lopen, creëerde men een magneetveld dat veel sterker is dan het aardmagnetisch veld. Schepen konden in één stroombehandeling goed genoeg gedemagnetiseerd worden om maandenlang rond te kunnen varen zonder magnetische

zeemijnen te doen ontploffen. Néel hield persoonlijk toezicht over de toepassing van zijn methode in alle grote Franse militaire havens, en werd zelfs naar het Verenigd Koninkrijk gestuurd om de Britse Royal Navy over zijn techniek te vertellen. Op deze manier heeft hij vermoedelijk honderden levens gered.

Een aardmagnetische geschiedenis

Onder geologen was het bekend dat, net zoals stalen oorlogsschepen, ook versteende lava gemagnetiseerd is. De aarde bestaat voor 35% uit ijzer, en lava zit daar dus ook vol mee. Wanneer lava afkoelt en stolt, magnetiseert het materiaal door het aardmagnetische veld. Het interessante was nu dat aan het begin van de 20e eeuw meerdere geologen stollingsgesteenten hadden gevonden die gemagnetiseerd waren *tegen* de richting van het aardmagnetisch veld in! De oorsprong hiervan leidde natuurlijk tot veel discussie: was het aardmagnetisch veld in het verleden omgekeerd? Zoals we in dit eerdere artikel toelichtten, is het antwoord hierop: ja!



Afbeelding 8. De geschiedenis van het aardmagnetische veld, vastgelegd door lava.Waar twee tektonische platen uit elkaar bewegen, stijgt magma uit de mantel van de aarde naar het aardoppervlak. Wanneer de lava stolt, magnetiseert het in de richting van het aardmagnetisch veld. De studie van de wisselingen in de magnetisatierichting heet *paleomagnetisme.* Afbeelding van Dr.T.

Néel liet zien dat er wel wat haken en ogen zitten aan de analyse van magnetische steenmonsters. Afhankelijk van de exacte samenstelling van de lava, die per locatie kan verschillen, hebben de stollingsgesteenten namelijk verschillende magnetische fases. Zoals we eerder zagen, kan de temperatuurafhankelijkheid van de magnetisatie hierdoor veel verschillen, en dus ook de uiteindelijke magnetisatie na het afkoelen. Ook kunnen oude

stollingsgesteenten opnieuw gesmolten zijn, of later van plek verschoven zijn. Néel liet ook zien dat het in sommige gevallen mogelijk is dat gesteenten in de 'verkeerde' richting gemagnetiseerd worden *zonder* draaiing van het aardmagnetisch veld. Dit kan gebeuren door interacties tussen verschillende magnetische fases en domeinen, of door chemische verandering van het magnetische mineraal in de loop van de tijd.

Het onderzoek van Néel naar al die haken en ogen leidde tot zijn meest invloedrijke publicatie: "Some theoretical aspects of rock-magnetism" (1955). Zijn modellen voor de magnetisering van verschillende soorten magnetische mineralen, en de rol van kleine magnetische 'korrels' in de lava, zijn onmisbaar in de huidige analyse en interpretatie van magnetische stollingsgesteenten. Ter ere van Néels wetenschappelijke prestaties reikt de Unie van de Europese Geowetenschappen (EGU) ieder jaar de Louis Néel Medaille uit aan wetenschappers met uitstekende prestaties op het gebied van rotsmagnetisme, rotsfysica en geomaterialen.

Van paleo naar de toekomst

Paleomagnetisme was lang niet de enige toepassing voor Néels uitbreiding van onze kennis van verschillende magnetische fasen. Ondertussen zijn we ook erg goed geworden in het *manipuleren* van magnetisme. Behalve op je koelkast zul je magneten ook terugvinden in bijvoorbeeld harde schijven en magnetische RAM, en werken we aan de onderzoeksrichting van 'spintronica' als alternatief voor de huidige elektronica.

Louis Néel was een ware pionier, een meester van het magnetisme, wiens ontdekkingen al bijna een eeuw lang in ons dagelijks leven doordringen, en dat ook in de toekomst op allerlei manieren zullen blijven doen.

Bronnen

Voor het schrijven van deze tekst zijn onderstaande bronnen (deels helaas achter een paywall) gebruikt:

- NobelPrize.org. (2019) Louis Néel – Biographical. *Nobel Media AB 2019.* https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1970/neel/biographical/
- J. Friedel en P. Averbuch. (2003) Louis Eugène Félix Néel. 22 November 1904 – 17

November 2000. *Biogrophical Memoirs of Fellows of the Royal Society* **49** http://doi.org/10.1098/rsbm.2003.0021

- M. Prévot en D. Dunlop. (2001) Louis Néel: forty years of magnetism. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **126**, pp.3-6. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00016582
- D. Dunlop. (2003) Partial thermoremanent magnetisation: Louis Néel's legacy in rock magnetism (invited). *Journal of Applied Physics* **93**, 8236. https://doi.org/10.1063/1.1558640