

Het aardmagnetische veld ontrafeld

F.H. Schreutelkamp

Stichting 'De Koepel', sterrenwacht 'Sonnenborgh', Utrecht



Wie kent niet de plaatsbepaling met behulp van een magnetisch kompas? Maar wie dacht dat zijn kompasnaald altijd netjes naar het noorden wijst, komt bedrogen uit: doordat de magnetische polen niet samenvallen met de geografische polen, wijst een kompasnaald bijna nergens op aarde exact naar het 'ware' noorden. De afwijking van de kompasnaald met het 'ware' of geografische noorden wordt de magnetische declinatie genoemd. Ook voor een klein land als Nederland geldt dat de grootte van de magnetische declinatie van plaats tot plaats kan verschillen. Daarnaast is het aardmagnetische veld op sommige plaatsen in Nederland enigszins verstoord. Deze verstoringen hangen samen met de geologische structuur van de ondergrond. In deze verhandeling, die als een tweedelige minireeks is verschenen in het sterrenkundige tijdschrift Zenit [12] en [13], zal het aardmagnetische veld nader onder de loep worden genomen.

Het is niet bekend wanneer en door wie het magnetische veld van de aarde voor het eerst werd opgemerkt. Vermoedelijk moet men daarvoor teruggaan tot het begin van het ijzertijdperk (ca. 500 v. Chr.). Algemeen wordt aangenomen dat het kompas, ver voor het begin van de Christelijke jaartelling, in China werd uitgevonden – waarmee dus tegelijkertijd het aardmagnetische veld werd ontdekt. Chinese geleerden hielden zich bezig met de bestudering van de wonderlijke eigenschappen van de magneetsteen, die op ijzer een aantrekkende kracht uitoefent en, aan zichzelf overgelaten, zich naar het zuiden richt. Het was deze laatste eigenschap die de magneetsteen tot een uiterst nuttig hulpmiddel bij de navigatie maakte. Van China is de kennis van het kompas, als belangrijk hulpmiddel bij zeereizen, via Arabië naar het Middellandse-Zeegebied doorgedrongen. Dit gebeurde ten tijde van de kruistochten. In het midden van de vijftiende eeuw ontdekten men dat een ijzeren naald niet precies de noord- of zuidrichting aanwees, maar over een zekere hoek – de magnetische declinatie – daarvan afweek. Columbus merkte tijdens zijn ontdekkingsreizen op dat deze afwijking van de kompasnaald van plaats tot plaats verschilde: aan de kust van Amerika bleek de declinatie totaal anders te zijn dan in Zuid-Europa. Hijzelf schreef dit toe aan klimaatverschillen.

Het heeft tot omstreeks 1600 geduurd voordat de werking van het kompas werd begrepen. Aanvankelijk dacht men dat de Poolster, die de bijnaam leidster ('Lode Star') droeg, een aantrekkende kracht uitoefende op de kompasnaald. Die verklaring werd twijfelachtig toen bleek dat de naald zich niet altijd precies naar de Poolster richt en bovendien de afwijking van plaats tot plaats verschilde. Daarop heeft men de oorzaak gezocht in de aanwezigheid van een ijzeren berg in het hoge Noorden. Deze berg, die op een zekere afstand van de noordpool zou zijn gelegen, kon de magnetische declinatie verklaren.

Tegen het einde van de zestiende eeuw begonnen Europese wetenschappers te onderkennen dat magnetisme één van de intrinsieke eigenschappen van de aarde is. Het was de Engels natuurkundige William Gilbert (1540-1603), hofarts van koningin Elizabeth I, die aantoonde dat het gedrag van een kompasnaald aan het aardoppervlak bijna gelijk was aan dat van een ijzeren naald boven het oppervlak van een bol van magneetsteen. Hij trok hieruit de scherpzinnige conclusie dat de aarde zelf zich gedraagt alsof ze een enorme magnetische bol is. In zijn verhandeling *De magnetice philosophia nova* (1600), waaraan hij zeventien jaar had gewerkt, beschrijft Gilbert hoe hij had vastgesteld dat 'magnus magnes ipse est globus terrestris' (de aarde zich gedraagt als een grote bolvormige magneet).

De grondslagen voor het moderne onderzoek aan het aardmagnetisme zijn gelegd door wiskundige Carl Friedrich Gauss (1777-1855), die zijn zeer heldere en juiste ideeën in een groot aantal werken heeft vastgelegd. In *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus* en *Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata* geeft Gauss een methode hoe de absolute sterkte van het aardmagnetische veld kan worden gemeten. Tevens wist hij wiskundig aan te tonen dat de oorzaak van het aardmagnetisme voor het grootste deel binnen het aardoppervlak gezocht moet worden. Over het noorderlicht of poollicht schreef hij dat bewegende elektriciteit hier waarschijnlijk een hoofdrol speelt, een vermoeden dat later verrassend juist is gebleken.

Oorzaak van het aardmagnetische veld

De aarde kan eenvoudig worden voorgesteld als een afgeplatte bol met

in het centrum een sterke staafmagneet of dipool. Een magnetische dipool is een eenvoudige magneet met twee polen. Dit model is over het algemeen goed bruikbaar en men kan hiermee zo'n negentig procent van het aardmagnetisme verklaren. De resterende tien procent kan worden toegeschreven aan de onregelmatige verdeling van ferromagnetisch gesteente in de aardkorst. De denkbeeldige aardmagnetische dipool kan dus worden gedacht in het centrum van de aarde. Een iets betere benadering van het werkelijke aardmagnetisch veld zou kunnen worden bereikt door deze dipool excentrisch te plaatsen, op zo'n 500 km van het middelpunt van de aarde, in de richting van Zuidoost-Azië. Dit hangt samen met het feit dat de oostelijke helft van de aarde iets sterker magnetisch is dan de westelijke. Onder het magnetische moment van een magneet wordt verstaan het product van de afstand tussen de magneetpolen en de poolsterkte. Het magnetische moment van de aardse dipool bedraagt circa $7,8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$. Ondanks het feit dat het magnetische dipoolmoment groot is, is het aardmagnetische veld aan het oppervlak relatief zwak. Dit is te wijten aan de grote afstand van de dipool tot het aardoppervlak.

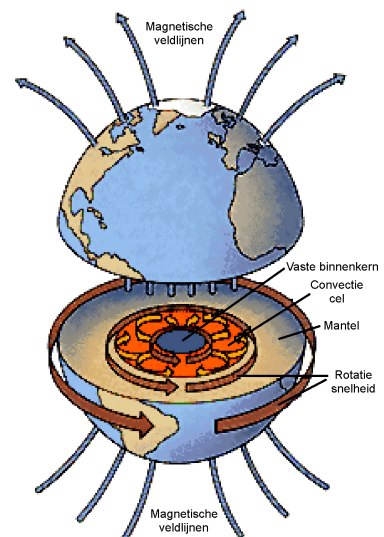


Fig. 1 Een schematische weergave van het 'convectiecellen-model'.

Zoals aan het begin van deze paragraaf naar voren is gekomen mag aan deze aardmagnetische dipool geen realiteit worden toegekend. De ware oorzaak

van het waargenomen aardmagnetisme moet worden gezocht in convectiestromingen nabij het centrum van de aarde. De aardkern kan worden opgesplitst in een vaste binnenkern en een viskeuze buitenkern. Vanwege de enorme druk die in het centrum van de aarde heerst is de binnenkern van de aarde warmer dan haar omgeving. Het gevolg is dat de buitenkern lokaal wordt opgewarmd, waardoor de viskeuze substantie in beweging komt. De ontstane wervelingen zijn dus op zichzelf staande convectiecellen. De stromingsrichting is zo dat aan de raakvlakken van twee convectiecellen de opgewarmde substantie altijd parallel aan elkaar bewegen en nooit tegengesteld (zie fig. 1). Dit laatste zou immers een behoorlijk onstuimige materiële stroming teweeg brengen. Omdat de viskeuze substantie in beweging is, zullen de daarin voorkomende ijzeratomen – mede onder invloed van de warmte – elektronen verliezen met als gevolg dat in de buitenkern reusachtige elektrische stromen zullen ontstaan. Deze elektrische stromen wekken op hun beurt weer lokale magnetische velden op. Met andere woorden: elke convectiecel creëert zijn eigen magneetveld.

De richting van elk opgewekt magneetveldje zal tegengesteld zijn aan dat van zijn buurman, met als nettoresultaat dat er geen dipolair magneetveld aan het oppervlak meetbaar zal zijn. Tenzij de convectiecellen niet geheel identiek aan elkaar zijn. Zeer kleine verschillen in bijvoorbeeld de grootte van de convectiecellen, in convectiesnelheid of in dichtheid kunnen enorme gevolgen hebben. Omdat de opgewekte magneetvelden elkaar dan niet meer volledig opheffen, zal er aan het oppervlak een dipolair magneetveld meetbaar zijn. Dit magneetveld is gelijk aan het verschil in veldsterkte tussen de opgewekte magneetveldjes onderling. Verschillen tussen de convectiecellen onderling in de orde grootte van een procent zijn groot genoeg om het geconstateerde aardmagnetische veld te kunnen verklaren. Met deze theorie, bekend als het *convectiecellenmodel*, kan niet alleen het aardmagnetische veld worden verklaard, maar ook andere effecten als de 'seculaire variatie' en 'magnetische jerks'. Deze geconstateerde verschijnselen zijn niet te verklaren met de tot voor kort algemeen aanvaarde *dynamotheorie* van Elsasser en Bullard uit de jaren veertig en vijftig.

Magnetische polen

Een groot deel van het aardoppervlak is in aardmagnetisch opzicht in kaart gebracht. Talrijke expedities zijn daarvoor noodzakelijk geweest. Voor het onderzoek van de oceanen worden daartoe speciale ijzervrije schepen gebruikt. Daarnaast wordt tegenwoordig ook gebruik gemaakt van satellieten om het globale aardmagnetische veld in kaart te brengen. Zo toont figuur 2 de isogonenkaart voor de epoce 2000,0 (IGRF2000). Op deze wereldkaart zijn lijnen getrokken, *isogonen* genaamd, waar de declinatie dezelfde waarde heeft. De lijn met declinatie 0° heet *agoon*. Alle plaatsen op deze lijn hebben de eigenschap dat het kompas hier exact naar het noorden wijst. Alle isogonen snijden elkaar in de magnetische polen, aangezien hier de declinatie onbepaald is.

De magnetische declinatie wordt in het veld doorgaans bepaald met behulp van een *Boussole-theodoliet*: met dit instrument kan men de verschilhoek tussen de astronomische en de magnetische meridiaan bepalen (fig. 3). De magnetische meridiaan wordt bepaald door een magneetnaald vrij op te hangen. Deze magneetnaald staat in verbinding met de afleescirkel van de theodoliet. Dit is een meetinstrument, bestaande uit een in graden en minuten verdeelde cirkelschijf met draibare kijker, waarmee hoeken nauwkeurig kunnen worden opgemeten. Door de kijker van deze theodoliet op de zon of een ster te richten en het tijdstip te noteren waarop dit zonne- of sterrenbeeld de kruisdraden van de kijker passeert, kan de waarnemer achteraf het azimut van de zon of deze ster berekenen en hieruit de astronomische meridiaan afleiden. Het verschil tussen de astronomische en de magnetische meridiaan, gemeten in het horizontale vlak, is de magnetische declinatie (zie ook het kaderstuk 'De componenten van het aardmagnetische veld' op pagina 5).

Zoals in de voorafgaande paragraaf naar voren is gekomen, kan het waargenomen aardmagnetische veld worden beschouwd als een denkbeeldige sterke staafmagneet of dipool. Maar deze zogeheten geomagnetische dipool loopt niet evenwijdig met de rotatie-as. De as van de dipool maakt een hoek van ongeveer 10,5° met de rotatie-as, waardoor de geomagnetische polen op 79,6° NB, 71,6° WL (geomagnetische noordpool) en 79,6° ZB en 108,4° OL (geomagnetische zuidpool) zijn gelegen. De geomagnetische polen vallen dus niet samen met de geografische polen. Als het aardmagnetische veld zuiver dipolair was, zou op de geomagnetische noordpool een kompasnaald verticaal omlaag wijzen (inclinatie = +90°) en op de geomagnetische zuidpool verticaal naar boven (inclinatie = -90°). In de praktijk blijkt het aardmagnetische veld niet zuiver dipolair te zijn, maar een dipool waarbij min of meer een willekeurig gericht veld is opgeteld – het zogeheten *restveld*. Dit betekent dus dat er op de geomagnetische polen een extra veld aanwezig is dat de inclinatie doet veranderen. De plaatsen waar de inclinaties werkelijk +90° en -90° zijn

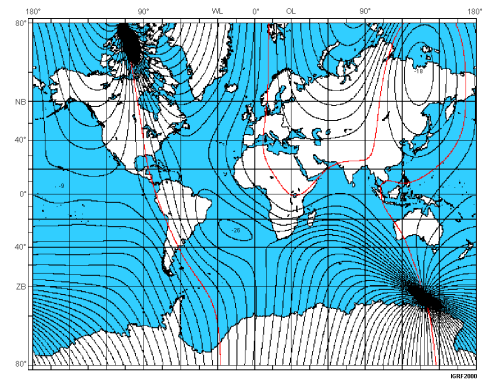


Fig. 2 De isogonenkaart voor de epoce 2000,0 (IGRF2000). De op deze kaart ingetekende lijnen verbinden punten waar de magnetische declinatie dezelfde waarde aanneemt (isolijnen interval: 5°). De rode lijn is de 'agoon' en plaatsen die op deze lijn zijn gelegen vertonen de eigenschap dat het kompas hier precies naar het geografische noorden wijst [18].



Fig. 3 Een Wild T0 Boussole-theodoliet, opgesteld op de geodetische pijler op het waarneemdak van de Utrechtse sterrenwacht 'Sonnenborgh'. Met een dergelijk meetinstrument kan onder andere de magnetische declinatie nauwkeurig worden bepaald. (Foto: P.J.K. Louwman)

liggen elders en wel op de zogeheten *magnetische polen*. De magnetische noordpool bevond zich in 2000 op ongeveer 80,7° NB en 109°,1 WL en de magnetische zuidpool op ongeveer 64,6° ZB en 138,4° OL. Omdat het restveld onregelmatig is en op elk van de halfronden verschilt, ondervindt niet elk poolgebied hetzelfde effect. Daarnaast is gebleken dat de as van de geomagnetische dipool niet volledig op haar plaats blijft. Op dit moment beweegt de geomagnetische noordpool met een snelheid van vijf kilometer per jaar in noordelijke en met één kilometer per jaar in westelijke richting. Het gevolg hiervan is onder meer dat de magnetische declinatie op elke plaats

op aarde aan verandering onderhevig is.

Wanneer het aardmagnetische veld zuiver dipolair geweest zou zijn, zou de sterkte van dit veld (de magnetische fluxdichtheid) aan de geomagnetische polen 0,6 Gauss bedragen en aan de geomagnetische evenaar 0,3 Gauss. Maar ook hier wijkt de lokale veldsterkte, ten gevolge van het restveld, sterk af. Daarnaast blijkt uit nauwkeurige metingen dat de sterkte van de geomagnetische dipool de afgelopen honderd jaar met ongeveer zes procent is afgenomen.

Variaties in het aardmagnetische veld

Het aardmagnetische veld verandert voortdurend. Niet alleen in richting maar ook qua intensiteit. Er zijn dagen waarop de veranderingen sterk en zeer onregelmatig zijn, maar er zijn ook dagen waarop er geen grote, wisselende veranderingen optreden. Zowel op kalme als op niet kalme of gestoorde dagen ondergaat het aardmagnetisch veld een geleidelijke toename of afname, die elke dag weer terugkeert en lijkt samen te vallen met de dagelijkse wenteling van de aarde om haar as. Deze dagelijkse variatie is klein – zo klein dat deze op gestoorde dagen door de magnetische storingen volledig wordt overheerst. Zo is de richting van het kompas in de zomer op onze breedtegraad om 8 uur 's ochtends het verst oostelijk en bereikt tegen 2 uur 's middags haar grootste uitwijking naar het westen; het verschil in declinatie tussen 8 en 14 uur lokale zonnetijd (LMT) wordt de *dagelijkse variatie* genoemd en bedraagt gemiddeld ongeveer acht boogminuten. Op andere plaatsen bereikt de dagelijkse variatie haar grootste en kleinste waarden op ongeveer dezelfde tijdstippen van de dag, mits men de lokale zonnetijd (LMT) neemt. De oorzaak van deze schommelingen loopt dus met de zon mee. Er is ook een

invloed van de maan; daarom kan de dagelijkse variatie worden opgesplitst in een *solaire* en een *lunaire* variatie.

Wanneer men solaire variaties voor de gehele aarde beschouwt, lijkt het alsof er om ongeveer 10.30 uur lokale zonnetijd een reusachtige hoefijzermagneet loodrecht boven de aarde staat, met zijn zuidpool op ongeveer ruim 35° NB en met zijn noordpool op ongeveer ruim 35° ZB (fig. 4). Vanaf de zon gezien, zou de aarde onder deze hoefijzermagneet naar het oosten wegdraaien. Deze denkbeeldige hoefijzer wekt in de ionosfeer op hoogten tussen 100 en 150 km wervelstromen op. Door de werking van de zon kent de aardatmosfeer, net als de zeeën en de oceanen, eb- en vloedgolven. Hierdoor ontstaan, door elektromagnetische inductie in het dipoolveld van de aarde, de genoemde wervelstromen die de dagelijkse solaire variatie veroorzaken. Ook de maan veroorzaakt eb- en vloedgolven in de aardatmosfeer. Maar anders dan bij zeeën en oceanen zijn de atmosferische getijdengolven die de zon veroorzaakt groter dan die vanwege de maan. Dit heeft te maken met het feit dat de solaire drukvariaties hoofdzakelijk het gevolg zijn van de verwarming van de atmosfeer door de zonnestraling. Het gevolg is dan ook dat de solaire variatie van het aardmagnetische veld groter is – ongeveer tien maal – dan de lunaire. Omdat de ionosfeer overdag veel sterker geleidend is dan 's nachts, zullen de lunaire variaties alleen overdag merkbaar zijn.

Het is gebleken dat de grootte van zowel de solaire als de lunaire variatie enerzijds afhankelijk is van de geografische breedtegraad en anderzijds van het jaargetijde. Op zomerdagen zijn deze variaties groter dan op winterdagen. Daarnaast is de grootte van beide variaties mede afhankelijk van de elfjarige cyclus van de zonnevlekken: ten tijde van het

zonnevlekkenmaximum zijn de dagelijkse variaties bijna dubbel zo groot als wanneer de zon vrij van vlekken is. De ionosfeer bevat dan meer elektronen, omdat de zon dan sterkere ioniserende straling uitzendt. Het was de Schotse astronoom J. Lamont (1805-1879), directeur van de sterrenwacht te München, die in 1851 ontdekte dat de periode waarin de grootte van de dagelijkse variatie varieert overeenkomt met die van de zonnevlekken. Figuur 5 toont de grootte van de dagelijkse variatie in het aardmagnetische veld enerzijds en het gemiddeld aantal zonnevlekken op de zon anderzijds. Duidelijk zichtbaar is de correlatie tussen beide variabelen.

Naast de dagelijkse variaties ten gevolge van de zon en de maan ondergaat het aardmagnetische veld ook nog een langzame en geleidelijke verandering, zowel in sterkte als in richting, die wordt aangeduid als de *seculaire variatie*. Zo was de declinatie van het kompas in ons land omstreeks 1860 ongeveer 19° west, terwijl zij in 2000 voor het midden van Nederland nog maar 1¼° west bedroeg. Figuur 6 toont de magnetische declinatie, zoals gemeten in Nederland tussen 1862 en 1988. Men verwacht dat omstreeks 2010 de declinatie hier ongeveer 0° zal zijn. Daarna zal de declinatie in Nederland (en België) oostelijk worden. Vanwege deze seculaire verandering past men de kaarten van de verdeling van de aardmagnetische elementen, die van belang zijn voor de navigatie, elke vijf jaar aan. Bij vergelijking van kaarten die in de loop der jaren zijn gemaakt, blijkt dat het veldpatroon ten opzichte van het aardoppervlak langzaam in westwaartse richting verschuift. De oorzaak van deze verplaatsing moet in het binnenste van de aarde worden gezocht. Gebleken is dat de aardkern iets langzamer om de aardas roteert dan de aardmantel, waardoor het restveld met ongeveer 0,15 lengtegraad per jaar naar het westen verschuift.

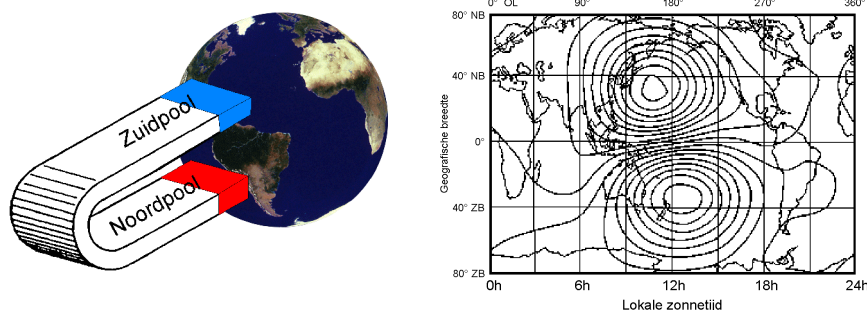


Fig.4 Links een vereenvoudigde voorstelling van de oorzaak van de solaire dagelijkse variaties in het aardmagnetische veld en rechts het systeem van elektrische wervelstromen in de ionosfeer van de aarde.

Naast de geleidelijke verplaatsing van het restveld ten gevolge van het iets langzamer roteren van de aardkern dan de aardmantel, kunnen er ook plotselinge veranderingen in het restveld optreden: de zogeheten *magnetische schokken* of *jerks*. Deze magnetische schokken kunnen goed worden verklaard met het eerder besproken convectiecellenmodel. Stel dat de stromingssnelheid van de lokaal opgewarmde viskeuze substantie in één van de convectie cellen uit de buitenkern enigszins verandert, dan zal deze verandering leiden tot een directe verandering in het aardmagnetische veld. Doordat de stromingssnelheid van deze viskeuze substantie is veranderd, zal ook de wrijvingscoëfficiënt tussen de buitenkern en de mantel veranderen met als gevolg dat – zij het met enige vertraging – ook de rotatie van de mantel om de aardas zal wijzigen. Dit laatste resulteert in een verandering van de daglengte: wordt de snelheid waarmee het restveld zich naar het westen verplaatst kleiner, dan wordt enkele jaren later ook de daglengte langer; neemt de westelijke verplaatsingssnelheid van het restveld toe, dan wordt enkele jaren later de daglengte korter.

Op basis van de in Nederland uitgevoerde metingen blijkt dat de verandering in de rotatiesnelheid van de aarde gemiddeld zo'n acht jaar achterloopt op de veranderingen in het aardmagnetische veld. Figuur 7 toont de verandering in de magnetische declinatie zoals gemeten door het KNMI (blauwe lijn) en de rotatiesnelheid van de aarde (rode lijn).

Magnetische storm

Het komt zelden voor dat het aardmagnetische veld, afgezien van de hiervoor beschreven dagelijkse variatie, een gehele dag rustig is. Behalve de regelmatige dagelijkse variatie treden ook onregelmatige veranderingen op: de storingen. Deze storingen kunnen gering zijn, maar kunnen ook buitengewone proporties aannemen. Storingen van groot formaat en van lange duur worden *magnetische stormen* genoemd.

Sterke magnetische stormen worden overal op aarde gelijktijdig geregistreerd, al zijn ze nabij de geomagnetische polen veel sterker dan aan de magnetische equator. Het optreden van magnetische storingen is in hoge mate gecorreleerd met het aantal vlekken op de zon: jaren met een groot aantal zonnevlekken zijn tevens jaren waarin veel magnetische stormen voorkomen en omgekeerd. Deze samenhang werd in 1852 voor het eerst opgemerkt door de Britse legerofficier E. Sabine (1788-1883). De oorzaak van deze magnetische stormen moet dus worden gezocht in uitbarstingen die plaatsvinden op het oppervlak en in de atmosfeer van de zon. Tijdens zo'n uitbarsting wordt een stroom van elektrisch geladen deeltjes

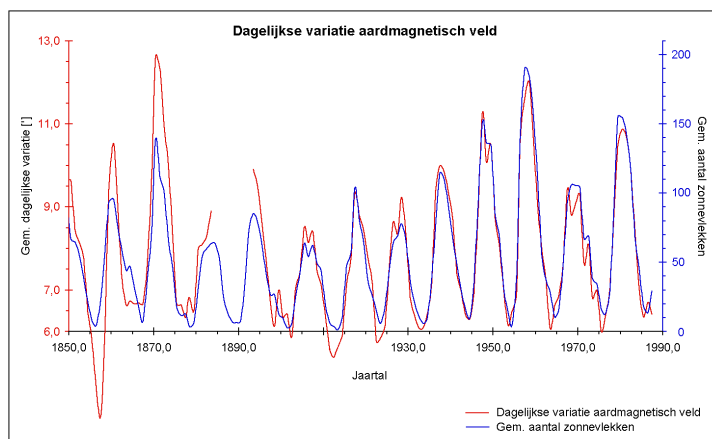


Fig. 5. De grootte van de dagelijkse variatie in magnetische declinatie zoals gemeten door het KNMI in Nederland (rode lijn) en het gemiddelde aantal zonnevlekken (blauwe lijn), voor de periode 1850 tot 1988. Voor de periode 1884-1892 ontbreekt de dagelijkse variatie in magnetische declinatie aangezien de fotografische registraties toentertijd, wegens een tekort aan personeel, nooit systematisch zijn uitgewerkt.

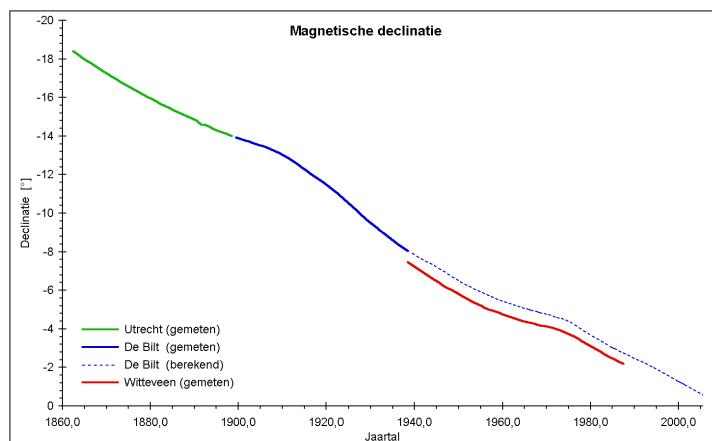


Fig. 6. De seculaire verandering van de magnetische declinatie zoals gemeten door het KNMI in Nederland. Tot en met 1898 is de magnetische declinatie te Utrecht bepaald (UTR: $I = 5^{\circ}07',8$ OL; $j = 52^{\circ}05',2$ NB), tussen 1899 en 1938 te De Bilt (DBN: $I = 5^{\circ}10',7$ OL; $j = 52^{\circ}06',1$ NB) en van 1938 tot 1988 te Witteveen (WIT: $I = 6^{\circ}40',2$ OL; $j = 52^{\circ}48',8$ NB).

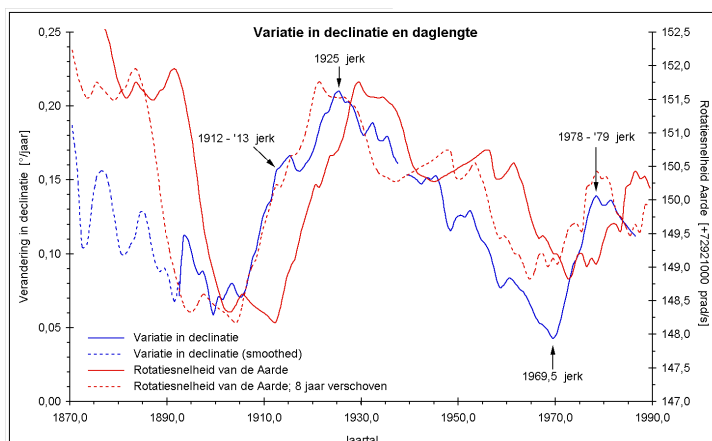


Fig. 7. De verandering in magnetische declinatie zoals gemeten door het KNMI en de verandering in rotatiesnelheid van de aarde, beide voor de periode 1870 en 1990. De gegevens vóór 1893 bevatten veel 'meetruis' en zijn om deze reden bewerkt ('smoothed', blauwe stippellijn). Als de rotatiesnelheid van de aarde (rode lijn) acht jaar vooruit in de tijd wordt geplaatst (rode stippellijn), valt deze vrijwel samen met de verandering in magnetische declinatie. De gekwadeerde correlatiecoëfficiënt (R^2) tussen de verandering in magnetische declinatie en de in de tijd verschoven rotatiesnelheid van de aarde over de periode 1891-1988 bedraagt 0,8.

(elektronen en protonen) de ruimte in gestuwd. Met een vertraging van gemiddeld 26 uur bereikt deze deeltjesstroom de aarde. Daar ondervindt hij de invloed van het aardmagnetische veld, en een deel komt in de magnetosfeer van de aarde terecht. Ingevangen in het aardmagnetische veld worden ze langs de magnetische veldlijnen afgebogen in de richting van de geomagnetische polen. Op weg daarheen worden deze geladen deeltjes zodanig versneld dat zij, als zij de ijle atmosfeer van de aarde binnendringen, de aldaar aanwezige gasmoleculen kunnen ioniseren. Dit proces, dat zich afspeelt op een hoogte van ongeveer honderd kilometer, gaat gepaard met lichtverschijnselen die poollicht worden genoemd: het bekende noorder- en zuiderlicht. Een vervelend bijverschijnsel is echter dat het radioverkeer op de korte- en ultrakorte golf ernstig gestoord raken, doordat de ionosfeer elektrisch meer geladen is ten gevolge van de geladen deeltjes afkomstig van de zon. In het ergste geval worden deze radiogolven geheel door de ionosfeer geabsorbeerd. Onder andere GPS-gebruikers kunnen hiervan veel hinder ondervinden (zie Van Odiijk (2000)).

Figuur 8 toont de variatie in de drie aardmagnetische veldcomponenten, zoals gemeten op het Duitse Adolf-Schmidt Observatorium voor aardmagnetisme te Niemegek voor de maand juli van het jaar 2000. Duidelijk zichtbaar is de dagelijkse variatie, evenals de geomagnetische storm die plaatsvond op 15 juli 2000. Die avond werden door verschillende waarnemers in binnen- en buitenland prachtige poollichtverschijnselen waargenomen, dit ondanks de volle maan! Voorafgaand aan de magnetische storm werd een kleine, kortstondige verstoring geregistreerd. Deze verstoring was het directe gevolg van de uitbarsting die acht minuten daarvoor plaats vond op de zon: dergelijke uitbarstingen gaan gepaard met een sterke emissie van ultraviolet licht die tijdelijk de ionisatiegraad van de ionosfeer aanzienlijk doen vergroten (zie ook Echternach (2001)). Het gevolg daarvan is dat het geleidend vermogen van de ionosfeer toeneemt, waardoor de in de ionosfeer opgewekte elektrische wervelstromen in sterkte toenemen. Het resultaat is dat het aardmagnetische veld tijdelijk enigszins wordt verstoord. Deze, relatief kleine verstoringen worden overigens alleen aan de dagzijde van de aarde waargenomen.

Aardmagnetische waarnemingen in Nederland

Kort na de ontdekking van de dagelijkse variatie van het aardmagnetische veld door de Engelse instrumentmaker G. Graham (1675-1752) in 1722 heeft de Nederlandse natuur- en sterrenkundige P. van Musschenbroek (1692-1761) getracht

deze dagelijkse variatie na te speuren met behulp van een kompas. De zes duim lange naald van dit kompas was aan beide uiteinde voorzien van een nonius, waardoor de stand ervan tot op de boogminuut nauwkeurig kon worden afgelezen. Van Musschenbroeks eerste waarnemingen dateren uit maart/april 1728. Sinds 1729 bepaalde hij vrijwel

dagelijks de magnetische declinatie en vervolgde dat werk gedurende een periode van bijna dertig jaar.

Van 1728 tot 1740 werden de magnetische waarnemingen te Utrecht verricht, van 1741 tot en met 1758 te Leiden (fig. 10). Daarmee vormen Van Musschenbroeks metingen de oudste aardmagnetische waarnemingsreeks in

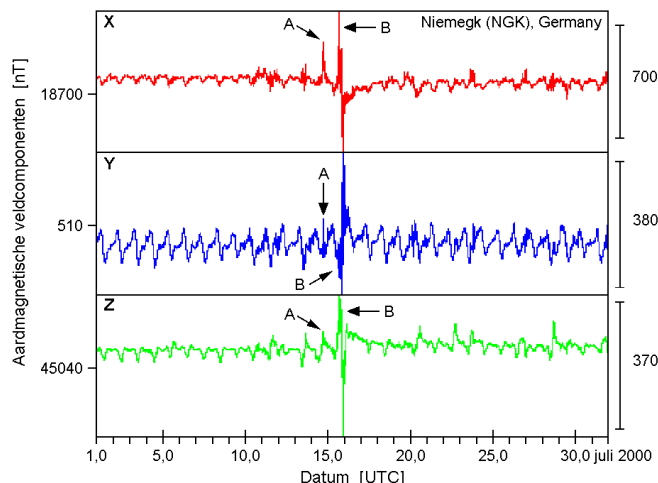


Fig. 8. De variatie in de drie aardmagnetische veldcomponenten X, Y en Z zoals gemeten op het Duitse Adolf-Schmidt Observatorium voor aardmagnetisme te Niemegek (NGK: $l = 12^{\circ}40',5$ OL; $j = 52^{\circ}04',3$ NB) voor de maand juli 2000. Duidelijk zichtbaar is de dagelijkse variatie, evenals de geomagnetische storm die plaatsvond op 15 juli 2000: de drie magnetogrammen laten om 14.40 UTC een verhoogde activiteit zien, met een maximum omstreeks 22.00 uur UTC (aangeduid met de letter B). Voorafgaand aan de magnetische storm werd een kleine, kortstondige verstoring geregistreerd. Deze verstoring, aangeduid met de letter A, was het directe gevolg van de uitbarsting die acht minuten daarvoor plaats vond op de zon.

De componenten van het aardmagnetische veld

Het aardmagnetische veld kan in elk punt aan het aardoppervlak worden beschreven door een vectoriële grootte: de vector loopt evenwijdig aan de aardmagnetische veldlijnen in het betreffende punt en de grootte van deze vector is gelijk aan de veldintensiteit aldaar. Deze vector kan worden ontbonden in een horizontale en een verticale component. De intensiteit F van het magneetveld geprojecteerd in het horizontale vlak levert de horizontale component H op. De hoek tussen het horizontale vlak en de magnetische vector wordt de inclinatie I genoemd. De hoek tussen de horizontale component H en het astronomische of geografische noorden wordt de declinatie D genoemd: de declinatie is dus de hoek tussen het magnetische noorden en het geografische noorden en wordt positief gemeten naar het oosten. De horizontale component H kan verder worden ontbonden in twee orthogonale componenten: de noordelijke component X en de oostelijke component Y. De projectie van F in het verticale vlak levert tenslotte de verticale component Z op.

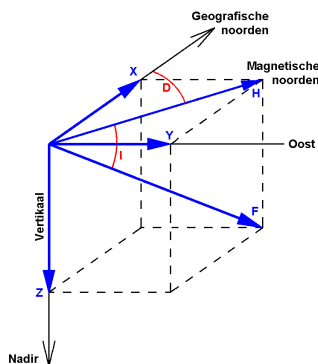


Fig. 9 De aardmagnetische veldsterkte en haar componenten.

Nederland. Zijn dagelijkse waarnemingen zijn gebundeld in een handschrift, getiteld: *Ephemerides Meteorologicae et Magneticae conscriptae primo Ultrajecti, deinde continuatae Leydae per Petrum van Musschenbroek, ab Anno 1729 ad finem Anni 1758*. Jammer is echter wel dat de beweeglijkheid van de kompasnaald Van Musschenbroek niet in staat stelde om een dagelijkse gang waar te nemen.

Ook de Nederlandse wis- en natuurkundige J.H. van Swinden (1746-1823) hield zich met de bestudering van het aardmagnetische veld bezig. Net als Van Musschenbroek trachtte Van Swinden de dagelijkse variatie vast te stellen. Daartoe had hij de beschikking over een kompas dat in

een speciaal daarvoor ingerichte instrumentenkamer stond opgesteld. De stand van de kompasnaald werd elk uur van de dag van 6 uur 's ochtends tot 10 uur 's avonds zorgvuldig afgelezen en opgetekend en dat gedurende een periode van meer dan tien jaar (1771-'84). Ook had Van Swinden een bovenkamer van zijn woonhuis laten inrichten voor het waarnemen van het noorderlicht. Ook in de jaren daarna heeft men in de vaste regelmaat metingen verricht aan het aardmagnetische veld. Zo werd in de eerste helft van de negentiende eeuw door een van de observatoren van het Utrechtse observatorium, G. Simons (1802-1868), vrijwel dagelijks de magnetische declinatie bepaald en eens in de twee maanden de magnetische inclinatie.

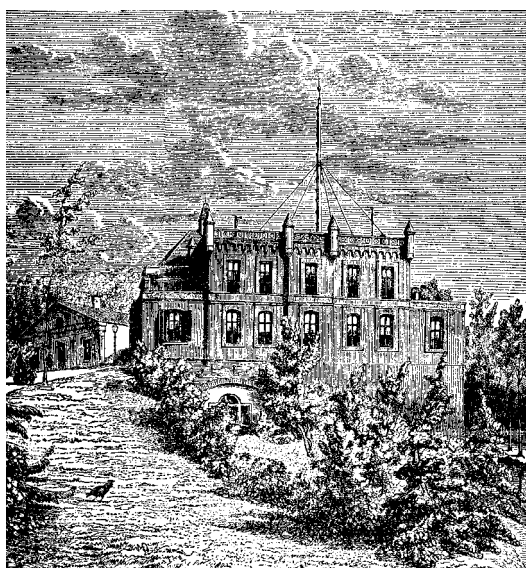


Fig. 11 Het 'Weerkundig Observatorium' te Utrecht omstreeks 1857 naar een tekening van H. Hekking jr.

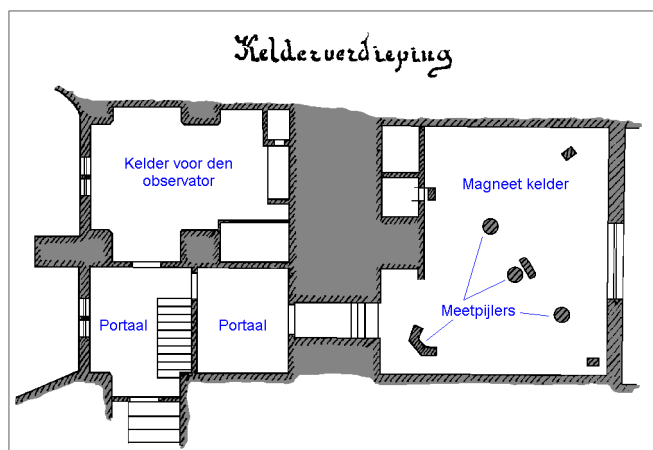


Fig. 12 Schematische tekening van de aardmagnetische meetopstelling in de kelder van het 'Weerkundig Observatorium' te Utrecht. Op de meetpijlers stonden diverse meetinstrumenten opgesteld waarmee veranderingen in het aardmagnetische veld nauwkeurig konden worden geregistreerd [3].

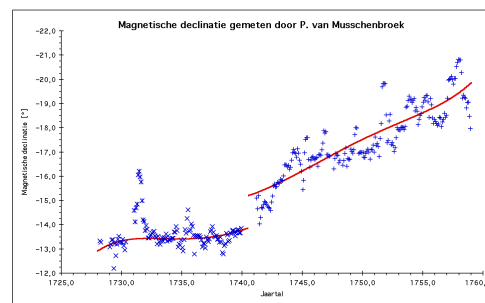


Fig. 10 De magnetische declinatie (maand-gemiddelden) en de gemiddelde seculaire verandering zoals gemeten door P. van Musschenbroek te Utrecht (1728-'39) en te Leiden (1741-'58).

Het Utrechtse observatorium was in die tijd (1826-'32) belast met de zorg voor de zee-instrumenten van de Koninklijke Marine, hetgeen onder andere de verificatie van scheepskompassen en -chronometers inhield. Maar na het vertrek van Simons in 1832 ging het mis. De verhouding tussen de directeur van het observatorium, professor G. Moll (1785-1838), de marinedirecties en de instrumentmakers werd voortdurend slechter en de achteloosheid waarmee Moll de zaken waarnam, leidde er tenslotte toe dat de Utrechtse sterrenkundigen deze belangrijke taken niet meer mochten uitvoeren.

Kinderwagens

Echt regelmatige waarnemingen aan de magnetische declinatie begonnen in 1849 op het Utrechtse bolwerk 'Sonnenborgh'. Eind 1848 werd dit 16de eeuwse bolwerk ingericht tot meteorologisch observatorium, hetgeen in 1854 uitmondde in de oprichting van het KNMI (fig. 11). Sedert 1853 is op dit bolwerk ook de Utrechtse sterrenwacht gevestigd, thans de oudste koepelsterrenwacht van Nederland. In één van de kelders aldaar (fig. 12) stonden precisie-meetinstrumenten opgesteld waarmee veranderingen in het aardmagnetische veld konden worden geregistreerd. Driemaal daags werd de stand van de magneetnaald van dit meetinstrument, in vaktermen variometer genaamd, zorgvuldig afgelezen, waarbij gebruik werd gemaakt van een afleesmicroscopje. Ontdekte men een storing, dan werden de aflezingen elke vijf minuten herhaald.

In 1861 werden enkele magnetische instrumenten overgebracht naar een speciaal ijzer vrij gebouwde in het plantsoen bij 'Sonnenborgh', waarmee behalve de declinatie ook de inclinatie en de horizontale intensiteit kon worden bepaald. Dit was geen ideale plek, want het was in latere jaren nodig voorzieningen te treffen om van storingen door ijzeren voorwerpen, met name kinderwagens, te worden verlost: onder meer door het verleggen van het wandelpad. In 1882 moest zelfs van gemeentewege worden overgegaan tot



Fig. 13 Het voormalig aardmagnetische paviljoen van het KNMI te De Bilt omstreeks 1898 (Foto: KNMI).



Fig.14 Het voormalig aardmagnetische paviljoen van het KNMI in het Drentse Witteveen. Dit paviljoen doet thans dienst als seismisch station (Foto: KNMI)

het plaatsen van een doornhaag op zes meter afstand, om 'ongewenste' bezoekers op een behoorlijke afstand te houden.

De Bilt

In 1898 verhuisden de magnetische instrumenten, net als de rest van het KNMI, van Utrecht naar De Bilt. Daar werd de magnetische afdeling ondergebracht in twee paviljoens: één voor het registreren van de variaties en één voor absolute bepalingen (fig. 13). Het materiaal waaruit de gebouwen waren opgebouwd mocht geen invloed uitoefenen op de gevoelige meetinstrumenten. Daarnaast moest het instrumentarium trillingsvrij én droog kunnen worden opgesteld. De paviljoenen werden daarom opgebouwd uit 'storingsvrije' materialen als hout, zandsteen en rietplanken. Ook spijkers, houtschroeven, hengsels, scharnieren en uit koper vervaardigde sloten zijn uitvoerig op magnetisme onderzocht.

Om temperatuurvariaties in de meetlokalen te beperken, waren de vertrekken voorzien van dubbele deuren en werden de ruimten tussen de dubbele wanden opgevuld met zaagsel. De meetinstrumenten zelf stonden op zwaar gefundeerde pijlers opgesteld. De fundamenten van deze pijlers en die van de paviljoenen waren gescheiden van elkaar, dit ter wille van de stabiliteit van de pijlers. Het ene paviljoen is thans als museum ingericht, het andere is tijdens een brand in november 1902 verloren gegaan (de in het paviljoen aanwezige meetinstrumenten konden tijdens de brand voor het merendeel in veiligheid worden gebracht).

In verband met de grote gevoeligheid van de meetinstrumenten heeft de aardmagnetische afdeling van het KNMI altijd strijd moeten leveren tegen storende invloeden. Om te beginnen in 1909, toen de paardentram die Utrecht met Zeist verbond werd vervangen door een elektrische tram. De tram reed op gelijkstroom en passeerde het KNMI op korte afstand. Elke keer als de tram voorbij reed, sloegen de gevoelige meetinstrumenten op hol. In overleg met de Ooster Stoomtram Maatschappij werd er naar een oplossing gezocht.

Ter hoogte van het KNMI werd een tweede bovenleiding aangelegd die de retourstroom van de tram afvoerde in plaats van, zoals gebruikelijk, deze weg te laten vloeien via de rails. Een enkele maal vergat de conducteur de tweede stroomafnemer in te schakelen, en prompt volgde dan een klacht van het KNMI aan de directie van de Zeister Tram.

Toen eind jaren dertig de elektrificering van de spoorwegen aan de orde kwam, was er geen houden aan en richtte de hoofddirecteur zich tot de Minister van Waterstaat. Hij besloot dat het KNMI zijn aardmagnetische afdeling moest verplaatsen naar een andere locatie in Nederland. In 1938 verhuisde de afdeling naar het Drentse Witteveen (fig. 14); ver weg van de bewoonde wereld, ver weg van storende invloeden. Ook daar was het moeilijk zeer nauwkeurige metingen te verrichten: in 1972 was Rijkswaterstaat genoodzaakt de weg Emmen-Drachten een paar honderd meter verderop aan te leggen en ook de Gasunie moest met haar gasbuizen met een grote boog om het paviljoen heen. Begin 1988 werd het aardmagnetische onderzoek in Nederland wegens bezuinigingen stopgezet.

Opmeting aardmagnetische veld in Nederland

De eerste echte opmeting van het aardmagnetische veld in Nederland vond plaats eind 19de eeuw. In de jaren 1889 tot 1892 verrichtte E. van Rijckevorsel (1845-1928) op eigen kosten op meer dan 300 plaatsen in ons land metingen aan de declinatie, de inclinatie en aan de horizontale intensiteit [11]. Midden jaren veertig werden deze aardmagnetische metingen door het KNMI grondig overgedaan. Dit omdat in de eerste plaats tengevolge van de seculaire variatie het aardmagnetisme nogal was veranderd, in de tweede plaats omdat het KNMI nu over betere meetinstrumenten beschikte en ten slotte, omdat men vermoedde dat er grote fouten in de metingen van Van Rijckevorsel voorkwamen [14]. In het kader van het onderzoek naar de seculaire verandering in het aard-

magnetische veld werden tussen 1980 en '87 nieuwe aardmagnetische metingen in Nederland verricht waarvan de einduitkomsten in 1988 werden gepubliceerd [10].

Figuur 16 op pagina 8 toont de magnetische declinatie in Nederland. Deze kaart is geconstrueerd overeenkomstig de toestand voor het midden van 1985 en is gebaseerd op de metingen uitgevoerd in de jaren tachtig onder leiding van J.H. Rietman [10]. Wil men de magnetische declinatie op een ander tijdstip weten, dan moet men de seculaire verandering in rekening brengen. De laatste vijftien jaar verandert de magnetische declinatie in Nederland gemiddeld met zo'n zeven boogminuten per jaar. De declinatie is in het zuidwesten van het land ruim anderhalve graad groter dan in het noordoosten. De lijnen van gelijke declinatie, *isogonen* genaamd, lopen globaal van noord naar zuid. Aangezien deze lijnen niet geheel rechtlijnig zijn, mag worden verondersteld dat verschillende gedeelten in ons land magnetisch gestoord zijn. Bij nauwkeuriger bestudering blijken deze storingen samen te hangen met de geologische structuur van de ondergrond. Dit kan als volgt worden verklaard. De oudere diep gelegen gesteenten zijn over het algemeen rijker aan magnetiet (Fe_3O_4) dan de jongere aardlagen. Waar deze oudere lagen dicht aan de oppervlakte komen, bijvoorbeeld bij een horst of een massief, zal het magneetveld afwijken van de normale waarde. Zeer duidelijk is deze invloed in een gebied dat zich uitstrekt van Midden-Limburg tot aan Flevoland en waarin onder andere de Peelhorst en de horst bij Mill zijn gelegen. De verstoringen in Zeeland en in het zuidwesten van Noord Brabant zijn het gevolg van het Londen-Brabant Massief en die in het zuidwesten van Limburg, nabij Eijsden, door het Massief van Stavelot-Hehe Venn.

De verstoringen in het aardmagnetische veld in de Achterhoek worden enerzijds veroorzaakt door het Massief van Lingen en anderzijds door de Gronau-breukzone en die in het oosten van Groningen door het Massief van Emden. De lokale verstoringen

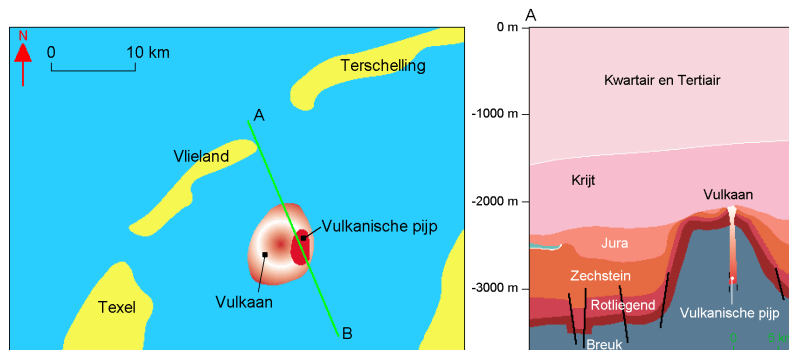


Fig. 15
Profieldoorsnede van de Zuidwal vulkaan welke op een diepte van ca. 2,5 km in de Waddenzee is gelegen, iets ten zuidwesten van het eilandje Griend [1] en [6].

nabij Marken wordt naar alle waarschijnlijkheid veroorzaakt door de Gouwtrog. De zeer merkwaardige storing in de Waddenzee, iets ten zuidwesten van het eilandje Griend, wordt veroorzaakt door de Zuidwalvulkaan. In de ondergrond aldaar, op een diepte van circa tweeënhalve km, komt vulkanisch gesteente voor die de Zuidwalvulkaan zo'n 160 miljoen jaar geleden moet hebben uitgespuwd (fig. 15). Dit vulkanische gesteente is sterk magnetisch, hetgeen het aardmagneetveld aldaar doet afwijken. Dat storingen geconstateerd in het aardmagnetische veld daadwerkelijk terug te voeren zijn naar verstoringen in de ondergrond blijkt des te duidelijker als de isogonen uit figuur 16 worden geplot in een Bouguer - zwaartekrachtanomalieënkaart. In deze kaart wordt het verschil tussen de waargenomen zwaartekracht g_0 , herleid tot middelbaar zeeniveau ($H = 0$), en de berekende normaal-

zwaartekracht γ_0 weergegeven. De zwaartekracht verschilt van plaats tot plaats aan het oppervlak. Zij is afhankelijk van de afstand tot het massamiddelpunt van de aarde, van de geografische breedtegraad ϕ en van de massadichtheid ρ van de aardkorst. De twee eerste factoren zorgen voor een geleidelijke, regelmatige verandering van de zwaartekracht over de aardoppervlakte; onregelmatigheden in de massaverdeling vertalen zich in afwijkende zwaartekrachtwaarden. Uit zwaartekrachtmetingen kan men dus informatie verkrijgen over de geologische structuur van de aardkorst: de soortelijke massa en daarmee de gravimetrische aantrekkingskracht van het gesteente neemt in het algemeen toe met de geologische ouderdom. Daar waar ouder gesteente aan of dicht onder de oppervlakte ligt, bijvoorbeeld bij een horst of een massief, zal de

gemeten zwaartekracht groter zijn dan normaal (positieve zwaartekracht-anomalie; $g_0 > \gamma_0$), aangezien de soortelijke massa van ouder gesteente over het algemeen groter is dan die van jonger gesteente. Daar waar oude gesteenten diep zijn weggezakt en hierdoor met een laag van jongere, soortelijk lichtere afzetting zijn bedekt, bijvoorbeeld in een slenk, zal een 'tekort' aan zwaartekracht worden gemeten ($g_0 < \gamma_0$). Hetzelfde is het geval waar in de ondergrond dikkere steenzoutlagen voorkomen, die een geringere soortelijke massa hebben dan andere oude gesteenten.

$$\gamma_0 = 978032,677 + 5185,960 \sin^2 \phi - 5,737 \sin^2 2\phi$$

$$g_0 = g + (0,3086 - 0,04193 \rho) H$$

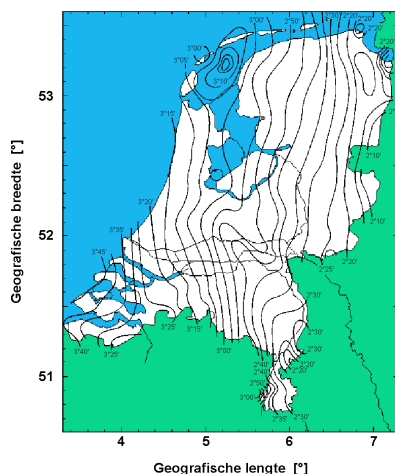


Fig.16 Kaart van de miswijzing van een magneetnaald (magnetische declinatie) in ons land voor het midden van 1985 volgens Rietman [10]. Het ware noorden ligt oostelijker dan de magneetnaald aanwijst. De ingetekende lijnen verbinden punten waar de magnetische declinatie dezelfde waarden aanneemt (isolijnen interval: 5'). Per jaar verandert de magnetische declinatie met ca. 7 boogminuten.

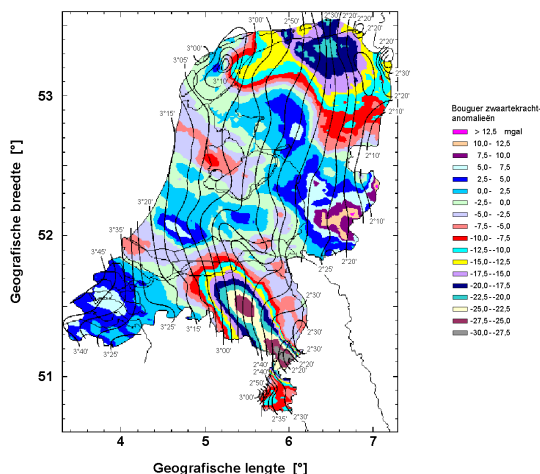


Fig.17 Isogonenkaart gecombineerd met een (simpele) Bouguer-zwaartekrachtanomalieënkaart voor Nederland. De isogonenkaart geeft de miswijzing van een magneetnaald (magnetische declinatie) in ons land weer voor het midden van 1985 (naar Rietman (1988)). De Bouguer-zwaartekrachtanomalieënkaart geeft het verschil tussen de waargenomen zwaartekracht g_0 , herleid tot middelbaar zeeniveau, en de berekende normaal zwaartekracht γ weer (isolijnen interval: 2,5 mgal). Een Bouguer-zwaartekrachtanomalieënkaart geeft informatie over de geologische structuur van de aardkorst: de soortelijke massa en daarmee de gravimetrische aantrekkingskracht van het gesteente neemt in het algemeen toe met de geologische ouderdom. Voor de berekening van de Bouguer-anomalieën is voor de gemiddelde dichtheid van het gesteente $2,65 \text{ g/cm}^3$ genomen.

In figuur 17 wordt een (simpele) Bouguer-zwaartekrachtkaart voor Nederland gegeven. Deze kaart is gebaseerd op zwaartekrachtmetingen uitgevoerd in 1979 in Zuid Limburg [2], in 1992 op het IJsselmeer en de Waddenzee [17] en tussen 1984-'94 in de rest van Nederland [7] en [8]. Voor de berekening van de Bouguer anomalieën is voor de gemiddelde dichtheid van het gesteente $2,65 \text{ g/cm}^3$ genomen. De hier gepresenteerde Bouguer - zwaartekrachtanomalieënkaart komt, afgezien van een systematische afwijking in de orde grootte van 5 à 6 mgal, alleszins overeen met de 'oude' Bouguer-zwaartekrachtanomalieënkaart uit de *Wetenschappelijke Atlas van Nederland* die gebaseerd is op metingen uitgevoerd door de Bataafsche Petroleum Maatschappij (BPM) in de periode 1940-'55 [16]. Sterke negatieve zwaartekrachtanomalieën vindt men in het gebied van de Centrale Slenk (oosten van Noord-Brabant), in Groningen en in het Markermeer ter hoogte van Marken. Positieve anomalieën vindt men onder meer in de Achterhoek, in Zeeland en het zuidwesten van Noord-Brabant, in het zuidwesten van Limburg en in de Waddenzee ter hoogte van de eerder genoemde Zuidwal-vulkaan. Deze laatste locatie wordt dus niet alleen gekenmerkt door een opmerkelijke verstoring in het aardmagnetische veld, maar ook in het zwaartekrachtveld.

Slotopmerking

Alle in dit artikel genoemde aardmagnetische parameters zijn berekend aan de hand van het IGRF2000-model voor de epoche 2000,0. Met dank aan dr. H.W. Haak van de afdeling Seismologie van het

KNMI, mej. A.K. Hemmes en het Bureau Gravimetrie International te Toulouse Cedex.

Literatuur

1. Beekman, G.W.E., 'De vulkaan van Vlieland', *intermediair* **10**, mei 2001, p. w&t 19 (2001);
2. Bless, M.J.M., W. Bosum, J. Bouckaert, H.J. Dürbaum, F. Kockel, E. Paproth, H. Querfurth, P. van Rooyen, Geophysikalische Untersuchungen am Ost-Rand des Brabanter Massivs in Belgien, den Niederlanden und der Bundesrepublik Deutschland, *Mededelingen Rijksgelogische Dienst*, Vol. **32-17**, p. 313-343 (1980);
3. Boll van Buuren, C.A., bouwtekeningen van het 'Weerkundig Observatorium te Utrecht', tek. no. **19 289/42**, (1854);
4. Courtillot, V., J.L. le Mouél, 'Time variations of the Earth's magnetic field: from daily to secular', *Annual Review Earth Planetary Science*, vol. **16**, p. 389-476 (1988);
5. Echternach, E.W., 'Met de actieve zon in de weer', *Zenit* **28**, p. 76-79 (2001);
6. Gans, W. de, *De geologie van Nederland*, TNO-NITG, CD-Rom, Delft (2000);
7. Min, E.J. de, *Het eerste orde Zwaartekrachtmetnet van Nederland, en het Nederlandse Zwaartekracht-datum 1993 (NEDZWA93)*, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Publikatie **32**, Delft (1995);
8. Min, E.J. de, W. Groenewoud, 'A new second order gravity network in The Netherlands', IUGG XXI General Assembly, Boulder Colorado USA, (1995);
9. Odijk, D. van, 'Het effect van de ionosfeer op precieze GPS-puntsbepaling, Langer meten door maximum in zonnevlekcyclus', *Geodesia* **42**, no. 3, p. 113-118 (2000);
10. Rietman, J.H., *Opmeting van het aardmagnetisch veld in Nederland, herleid naar 1985*, KNMI, Technisch rapport **109**, De Bilt (1988);
11. Rijkkevorsel, E. van, *A magnetic survey of the Netherlands for the epoch January 1, 1891*, Rotterdam (1895);
12. Schreutelkamp, F.H., 'Het aardmagnetische veld ontrafeld', *Zenit* **28**, p. 136-141 (2001);
13. Schreutelkamp, F.H., 'Het aardmagnetische veld in Nederland', *Zenit* **28**, p. 186-190 (2001);
14. Veldkamp, J., *The geomagnetic field of the Netherlands reduced to 1945.0*, KNMI, Publicatie **134**, 's-Gravenhage (1951);
15. Veldkamp, J., *Geofysica*, Utrecht (1965);
16. Weelde, A. van, 'History of gravity observations in the Netherlands', *Verhandelingen van het Koninklijk Nederlandsch Geologisch-Mijnbouwkundig Genootschap*, Geologische serie deel **XVIII**, (1957);
17. Weesie, E.J.M., *WADGRAV zeegravimetrie binnen Nederland*, Afstudeerscriptie Faculteit der Geodesie, TU Delft (1993);
18. World data Center for Geomagnetism te Kyoto, Japan.

Jaargemiddelden van de aardmagnetische componenten

Epoche	Locatie	Type	Declinatie	Inclinatie	H	X	Y	Z	F
1862.5	Utrecht	O	-18°18'.7	68°00'.8					
1863.5	Utrecht	O	-18°11'.2	67°57'.3					
1864.5	Utrecht	O	-18°03'.1	67°54'.1					
1865.5	Utrecht	O	-17°57'.3	67°52'.6					
1866.5	Utrecht	O	-17°46'.8	67°50'.9					
1867.5	Utrecht	O	-17°38'.2	67°49'.8					
1868.5	Utrecht	O	-17°28'.9	67°48'.5					
1869.5	Utrecht	O	-17°27'.3	67°43'.7					
1870.5	Utrecht	O	-17°14'.1	67°47'.9					
1871.5	Utrecht	O	-17°00'.5	67°40'.8					
1872.5	Utrecht	O	-16°56'.2	67°42'.0					
1873.5	Utrecht	O	-16°50'.2	67°39'.4					
1874.5	Utrecht	O	-16°41'.6	67°32'.1					
1875.5	Utrecht	O	-16°35'.1	67°35'.6	18041	17290	-5150	43756	47330
1876.5	Utrecht	O	-16°23'.9	67°31'.7	18045	17311	-5094	43625	47210
1877.5	Utrecht	O	-16°14'.7	67°33'.9	18073	17351	-5056	43772	47357
1878.5	Utrecht	O	-16°07'.5	67°30'.1	18075	17364	-5020	43641	47236
1879.5	Utrecht	O	-15°56'.5	67°24'.4	18093	17397	-4969	43480	47094
1880.5	Utrecht	O14	-15°53'.5	67°24'.3	18115	17423	-4960	43529	47148
1881.5	Utrecht	O14	-15°45'.9	67°23'.1	18162	17479	-4934	43599	47231
1882.5	Utrecht	O14	-15°31'.0	67°22'.7	18181	17518	-4864	43631	47267
1883.5	Utrecht	O14	-15°34'.0	67°21'.9	18198	17530	-4884	43642	47285
1884.5	Utrecht	O14	-15°26'.5	67°20'.5	18208	17551	-4848	43617	47265
1885.5	Utrecht	O14	-15°18'.1	67°19'.1	18256	17609	-4818	43681	47342
1886.5	Utrecht	A14	-15°11'.4	67°18'.0	18271	17633	-4787	43679	47346
1887.5	Utrecht	A14	-15°04'.8	67°17'.0	18278	17649	-4755	43658	47330
1888.5	Utrecht	A14	-14°59'.9	67°17'.8	18277	17654	-4730	43685	47354
1889.5	Utrecht	A14	-14°54'.6	67°16'.6	18297	17681	-4708	43693	47369
1890.5	Utrecht	A14	-14°49'.0	67°15'.0	18338	17728	-4690	43730	47419
1891.5	Utrecht	A14	-14°43'.9	67°14'.9	18352	17749	-4667	43762	47454
1892.5	Utrecht	A14	-14°41'.8	67°13'.7	18375	17774	-4662	43774	47474
1893.5	Utrecht	A14	-14°34'.8	67°12'.2	18397	17805	-4631	43772	47482
1894.5	Utrecht	A14	-14°27'.2	67°10'.1	18414	17831	-4596	43737	47455
1895.5	Utrecht	A14	-14°21'.2	67°07'.4	18434	17859	-4570	43688	47418
1896.5	Utrecht	A14	-14°15'.0	67°04'.5	18447	17879	-4541	43618	47358
1891.5	Utrecht	A	-14°37'.1		18354	17760	-4632		
1892.5	Utrecht	A	-14°34'.5		18376	17785	-4624		
1893.5	Utrecht	A	-14°28'.5		18398	17814	-4599		
1894.5	Utrecht	A	-14°21'.1		18416	17841	-4565		
1895.5	Utrecht	A	-14°15'.5		18435	17867	-4540		
1896.5	Utrecht	A	-14°09'.7		18448	17887	-4513		
1897.5	Utrecht	A	-14°05'.2		-	-	-		
1898.5	Utrecht	A	-13°59'.1		18487	17939	-4468		
1899.5	De Bilt	A	-13°54'.7	67°03'	18502	17959	-4448	43701	47456
1900.5	De Bilt	A	-13°50'.6	66°58'	18508	17970	-4428	43539	47310
1901.5	De Bilt	A	-13°46'.2	66°55'	18524	17992	-4409	43471	47253
1902.5	De Bilt	A	-13°42'.3	66°54'.0	18547	18019	-4394	43483	47273
1903.5	De Bilt	A	-13°37'.2	66°52'.6	18556	18034	-4370	43455	47251
1904.5	De Bilt	A	-13°32'.7	66°50'.4	18561	18045	-4347	43390	47193
1905.5	De Bilt	A	-13°28'.5	66°49'.6	18561	18050	-4325	43361	47166
1906.5	De Bilt	A	-13°24'.2	66°54'.5	18569	18063	-4304	43552	47345
1907.5	De Bilt	A	-13°19'.0	66°51'.1	18559	18060	-4275	43408	47209
1908.5	De Bilt	A	-13°12'.8	66°48'.4	18551	18060	-4240	43297	47104
1909.5	De Bilt	A	-13°06'.6	66°48'.9	18546	18063	-4207	43302	47107
1910.5	De Bilt	A	-12°58'.2	66°47'.7	18541	18068	-4161	43249	47056
1911.5	De Bilt	A	-12°50'.7	66°46'.7	18540	18076	-4122	43211	47021
1912.5	De Bilt	A	-12°41'.7	66°46'.5	18537	18084	-4074	43200	47009
1913.5	De Bilt	A	-12°32'.1	66°46'.0	18525	18083	-4020	43151	46959
1914.5	De Bilt	A	-12°22'.6	66°46'.5	18512	18082	-3968	43140	46944
1915.5	De Bilt	A	-12°12'.5	66°48'.0	18481	18063	-3908	43117	46910
1916.5	De Bilt	A	-12°02'.7	66°48'.8	18461	18054	-3852	43101	46888
1917.5	De Bilt	A	-11°53'.6	66°50'.1	18443	18047	-3801	43103	46883
1918.5	De Bilt	A	-11°44'.0	66°50'.7	18424	18039	-3747	43081	46855
1919.5	De Bilt	A	-11°34'.3	66°51'.5	18410	18036	-3693	43075	46844
1920.5	De Bilt	A	-11°24'.2	66°51'.8	18397	18034	-3637	43056	46822
1921.5	De Bilt	A	-11°13'.6	66°52'.6	18389	18037	-3580	43065	46827
1922.5	De Bilt	A	-11°01'.9	66°52'.8	18382	18042	-3517	43054	46814
1923.5	De Bilt	A	-10°50'.2	66°52'.6	18378	18051	-3456	43038	46798
1924.5	De Bilt	A	-10°38'.3	66°52'.7	18372	18056	-3392	43024	46782
1925.5	De Bilt	A	-10°25'.4	66°53'.5	18359	18056	-3322	43026	46779
1926.5	De Bilt	A	-10°13'.1	66°55'.5	18337	18046	-3253	43040	46783
1927.5	De Bilt	A	-10°01'.0	66°55'.9	18330	18050	-3188	43041	46782
1928.5	De Bilt	A	-9°48'.8	66°57'.4	18313	18045	-3121	43052	46785

Epoche	Locatie	Type	Declinatie	Inclinatie	H	X	Y	Z	F
1929.5	De Bilt	A	-9°37'.3	66°58'.6	18300	18042	-3059	43063	46790
1930.5	De Bilt	A	-9°26'.3	67°00'.4	18282	18034	-2998	43084	46802
1931.5	De Bilt	A	-9°15'.7	67°00'.8	18278	18039	-2942	43089	46806
1932.5	De Bilt	A	-9°04'.2	67°02'.3	18264	18036	-2879	43107	46816
1933.5	De Bilt	A	-8°53'.1	67°03'.0	18258	18039	-2820	43115	46821
1934.5	De Bilt	A	-8°43'.0	67°03'.7	18254	18043	-2766	43132	46836
1935.5	De Bilt	A	-8°31'.9	67°05'.4	18244	18042	-2707	43169	46866
1936.5	De Bilt	A	-8°21'.4	67°06'.9	18236	18042	-2650	43202	46893
1937.5	De Bilt	A	-8°11'.8	67°08'.4	18228	18042	-2599	43237	46923
1938.5	De Bilt	A	-8°02'.1	67°09'.8	18219	18040	-2547	43262	46942
1938.5	Witteveen	A	-7°27'.6	67°36'.5	17952	17800	-2331	43571	47125
1939.5	Witteveen	A	-7°18'.1	67°38'.2	17948	17802	-2281	43624	47172
1940.5	Witteveen	A	-7°09'.2	67°39'.2	17948	17808	-2235	43660	47205
1941.5	Witteveen	A	-6°59'.8	67°40'.1	17945	17811	-2186	43685	47227
1942.5	Witteveen	A	-6°51'.2	67°40'.7	17951	17823	-2142	43723	47264
1943.5	Witteveen	A	-6°42'.2	67°42'.0	17943	17821	-2094	43749	47285
1944.5	Witteveen	A	-6°33'.0	67°42'.2	17950	17832	-2048	43773	47311
1945.5	Witteveen	A	-6°24'.3	67°42'.5	17954	17842	-2003	43795	47332
1946.5	Witteveen	A	-6°14'.7	67°45'.0	17935	17829	-1951	43840	47366
1947.5	Witteveen	A	-6°07'.1	67°46'.1	17929	17827	-1911	43863	47386
1948.5	Witteveen	A	-6°00'.0	67°45'.6	17944	17846	-1876	43883	47410
1949.5	Witteveen	A	-5°53'.2	67°45'.8	17957	17862	-1842	43923	47452
1950.5	Witteveen	A	-5°45'.2	67°45'.4	17973	17882	-1802	43946	47479
1951.5	Witteveen	A	-5°38'.1	67°45'.2	17987	17900	-1766	43973	47510
1952.5	Witteveen	A	-5°30'.2	67°44'.8	18003	17920	-1727	43999	47539
1953.5	Witteveen	A	-5°22'.6	67°44'.1	18021	17941	-1689	44016	47562
1954.5	Witteveen	A	-5°15'.8	67°43'.7	18038	17962	-1655	44043	47594
1955.5	Witteveen	A	-5°09'.3	67°43'.8	18046	17973	-1621	44066	47618
1956.5	Witteveen	A	-5°03'.0	67°44'.2	18051	17981	-1589	44095	47647
1957.5	Witteveen	A	-4°57'.3	67°44'.1	18066	17998	-1560	44127	47681
1958.5	Witteveen	A	-4°52'.5	67°43'.7	18082	18016	-1537	44150	47709
1959.5	Witteveen	A	-4°48'.0	67°43'.3	18097	18033	-1514	44174	47737
1960.5	Witteveen	A	-4°43'.0	67°43'.0	18114	18052	-1490	44203	47770
1961.5	Witteveen	A	-4°38'.0	67°41'.7	18140	18081	-1465	44218	47794
1962.5	Witteveen	A	-4°33'.3	67°40'.3	18165	18108	-1443	44230	47815
1963.5	Witteveen	A	-4°28'.8	67°39'.8	18181	18126	-1420	44251	47841
1964.5	Witteveen	A	-4°24'.5	67°38'.9	18201	18148	-1399	44266	47862
1965.5	Witteveen	A	-4°20'.7	67°37'.7	18224	18172	-1381	44277	47881
1966.5	Witteveen	A	-4°17'.3	67°37'.4	18239	18188	-1364	44301	47908
1967.5	Witteveen	A	-4°14'.3	67°37'.1	18253	18203	-1349	44326	47937
1968.5	Witteveen	A	-4°11'.1	67°36'.3	18275	18227	-1334	44351	47969
1969.5	Witteveen	A	-4°08'.5	67°35'.1	18304	18257	-1322	44375	48002
1970.5	Witteveen	A	-4°06'.0	67°34'.1	18331	18284	-1311	44407	48042
1971.5	Witteveen	A	-4°02'.8	67°32'.7	18363	18317	-1296	44432	48077
1972.5	Witteveen	A	-3°58'.7	67°31'.9	18388	18343	-1275	44462	48114
1973.5	Witteveen	A	-3°53'.8	67°31'.1	18412	18369	-1251	44491	48151
1974.5	Witteveen	A	-3°47'.8	67°30'.7	18432	18392	-1221	44526	48190
1975.5	Witteveen	A	-3°42'.1	67°29'.6	18461	18423	-1192	44553	48226
1976.5	Witteveen	A	-3°35'.0	67°28'.8	18483	18447	-1155	44579	48259
1977.5	Witteveen	A	-3°27'.5	67°28'.2	18502	18468	-1116	44601	48286
1978.5	Witteveen	A	-3°19'.0	67°28'.8	18506	18475	-1071	44633	48317
1979.5	Witteveen	A	-3°10'.8	67°28'.6	18517	18489	-1027	44652	48339
1980.5	Witteveen	A	-3°03'.0	67°28'.1	18528	18501	-985	44662	48353
1981.5	Witteveen	A	-2°54'.9	67°29'.0	18524	18500	-942	44686	48373
1982.5	Witteveen	A	-2°46'.7	67°30'.0	18519	18497	-898	44709	48393
1983.5	Witteveen	A	-2°39'.4	67°30'.0	18524	18504	-858	44722	48406
1984.5	Witteveen	A	-2°31'.9	67°30'.5	18523	18505	-818	44737	48420
1985.5	Witteveen	A	-2°25'.0	67°31'.0	18522	18506	-781	44754	48435
1986.5	Witteveen	A	-2°18'.0	67°32'.0	18517	18502	-743	44777	48454
1987.5	Witteveen	A	-2°11'.6	67°32'.5	18517	18504	-709	44796	48472

Type

A: Iedere dag;
A14: Iedere dag en herleid tot 14^h LMT;
O: Incidenteel;
O14: Incidenteel en herleid tot 14^h LMT.

Opmerkingen

- De dagelijkse waarnemingen aan het aardmagnetische veld werden in de periode april tot en met begin juni 1945 door omstandigheden tijdelijk stopgezet. Bij de berekening van de jaargemiddelden is rekening gehouden met deze tijdelijke onderbreking (zie KNMI Yearbook B 1945 (Geomagnetism)).
- De waarnemingen zijn gecorrigeerd voor systematische verschillen tussen de gebruikte meetinstrumenten (zie KNMI Yearbook B 1912 én 1960 (Geomagnetism)).

Bronnen

- Nederlandsch Meteorologisch Jaarboeken, KNMI Yearbooks B (Geomagnetism) en het archief van de British Geological Survey.