

PALEOMAGNETISME EN GEOTEKTONIEK

door

H. Wensink

Geologisch Instituut der Rijksuniversiteit Utrecht
Utrecht.

Wensink, H. Paleomagnetisme en Geotektoniek (Paleomagnetism and Geotectonics). - Meded. Werkgr. Tert. Kwart. Geol., 11 (2): 86-115, 29 figs., mei 1974.

In this paper a review is given of paleomagnetism, and its significance to geological and tectonic problems. The field of Paleomagnetism is outlined: both the earth magnetic field, the natural remanent magnetizations of rocks, and the geological applications are discussed. The research on the magnetic anomalies in the oceans is presented with the consequent theories on spreading of the ocean floor. Finally, the concept of the new global tectonics gives a picture of the structural evolution of the earth, based on geological and geophysical data.

Dr. H. Wensink, Subfaculteit der Geologie en Geophysica der Rijksuniversiteit te Utrecht, Geologisch Instituut, Oudegracht 320, Utrecht, The Netherlands.

INHOUD: Algemeen, p. 87

Het paleomagnetisme, p. 87

Inleiding, p. 87

Het aardmagnetisch veld, p. 90

Magnetisaties van gesteenten, p. 90

Paleomagnetische resultaten, p. 91

De zuidelijke continenten, p. 94

Overige onderwerpen, p. 100

Mariene magnetische anomalieën, p. 100

Inleiding, p. 100

Magnetische anomalieën, p. 101

Omkeringen van het aardmagnetische veld, p. 101

Spreiding van de zeebodem, p. 104

Ouderdom van de oceanen, p. 105

Plaattektoniek, p. 110

Inleiding, p. 110

Platen en hun begrenzingen, p. 110

Verspreiding der aardbevingen, p. 110

Argumenten voor de plaattheorie, p. 111

Geometrie en de beweging der platen, p. 114

Slotbeschouwing, p. 115

Enige literatuur, p. 115

ALGEMEEN

De nieuwere inzichten in de structurele ontwikkeling van onze aarde stoelen voor een niet gering gedeelte op de bijdragen van zowel het paleomagnetisch onderzoek aan continentale gesteenten als de geomagnetische metingen in oceanische gebieden. Eerst wordt in dit artikel het paleomagnetisme behandeld. Deze discipline heeft voor een schokeffect gezorgd; haar resultaten hebben de oude Wegeriaanse gedachte aangaande het uiteendrijven der continenten bevestigd. Besproken zal worden de methodiek van het paleomagnetisch onderzoek, terwijl de resultaten en haar toepassingen worden gegeven in de vorm van paleomagnetische poolposities en posities van de continenten tijdens de geologische geschiedenis. Het gedetailleerde onderzoek in de oceanen naar de sterkte van het aardmagnetisch veld heeft eveneens belangrijke bijdragen geleverd. Het voorkomen van parallel verlopende magnetische anomalieën werd aangetoond, die van fundamenteel belang bleken voor de genese van de oceanen. Het leidde tot de bevestiging van de theorie van het ontstaan van oceanische korst aan de oceanische ruggen, alsmede het zijwaarts uiteendrijven van de aldaar gevormde korst. Met de theorie van "Plate Tectonics" wordt tenslotte een wereldomvattende synthese gegeven. Volgens deze opvatting bestaat de buitenzijde van de aarde uit een aantal grote, starre platen, die behalve de korst ook een gedeelte van de boven mantel omvatten.

HET PALEOMAGNETISME

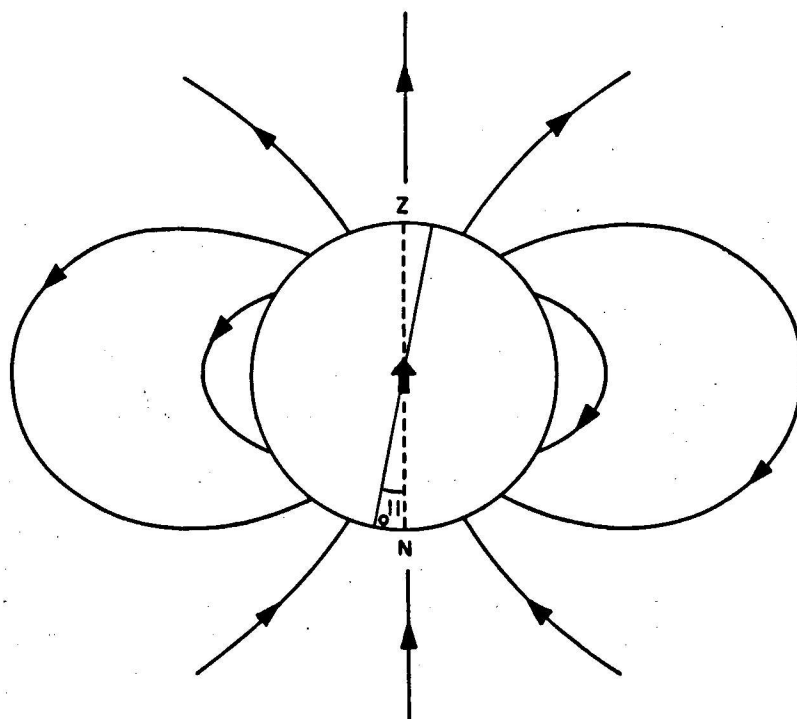
Inleiding

Het paleomagnetisme houdt zich bezig met het onderzoek van zowel het aardmagnetische veld als de magnetisaties van gesteenten tijdens de geologische geschiedenis. De paleomagnetische onderzoeker gaat actualistisch te werk: hij bestudeert het huidige aardmagnetische veld, alsmede de magnetische eigenschappen van recente gesteenten (bijvoorbeeld de jonge uitvloeiingsgesteenten) ten einde conclusies over het magnetisch gedrag tijdens het geologisch verleden te kunnen trekken.

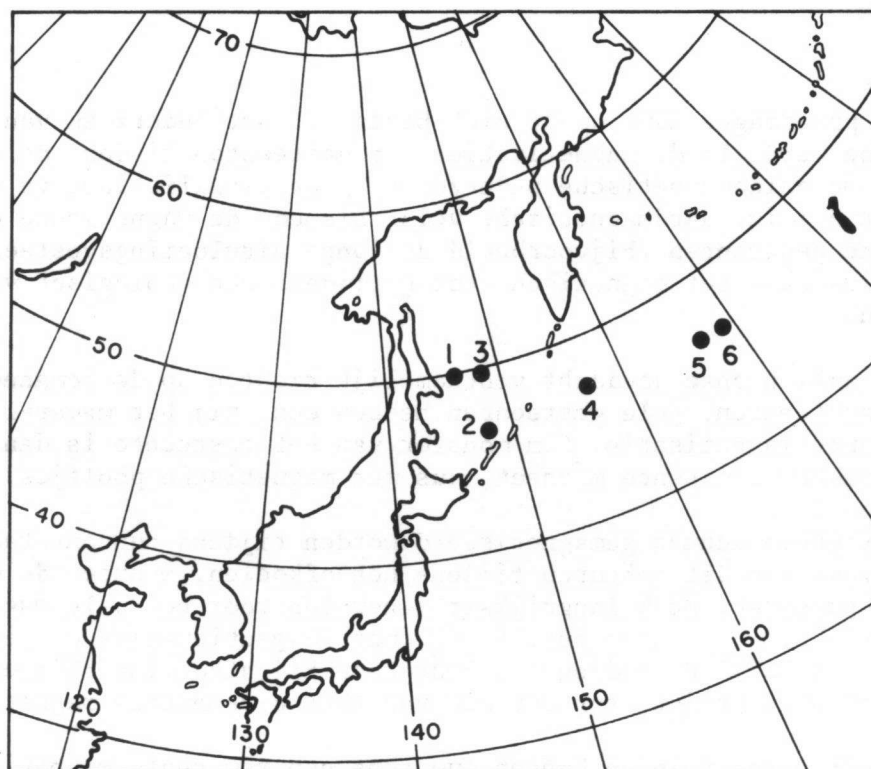
Wij zullen onze aandacht voornamelijk richten op de remanente magnetisaties van gesteenten. Vele gesteenten hebben een, zij het meestal uiterst zwakke, blijvende magnetisatie. Een monster van het gesteente is dan op te vatten als een zwakke permanente magneet, dus met magnetische pooltjes.

Gesteenten kunnen gemagnetiseerd worden tijdens hun ontstaan. Bij een magma en een lava kan dit gebeuren tijdens het afkoelen, wanneer de mineralen hun curiepunt passeren. De belangrijkste mineralen voor het paleomagnetisme zijn magnetiet, Fe_3O_4 , en hematiet, Fe_2O_3 , met respectievelijk curietemperaturen van 578°C en 675°C . Indien een gesteente bij afkoeling blijvende magnetische eigenschappen krijgt, spreekt men van thermo-remanente magnetisatie.

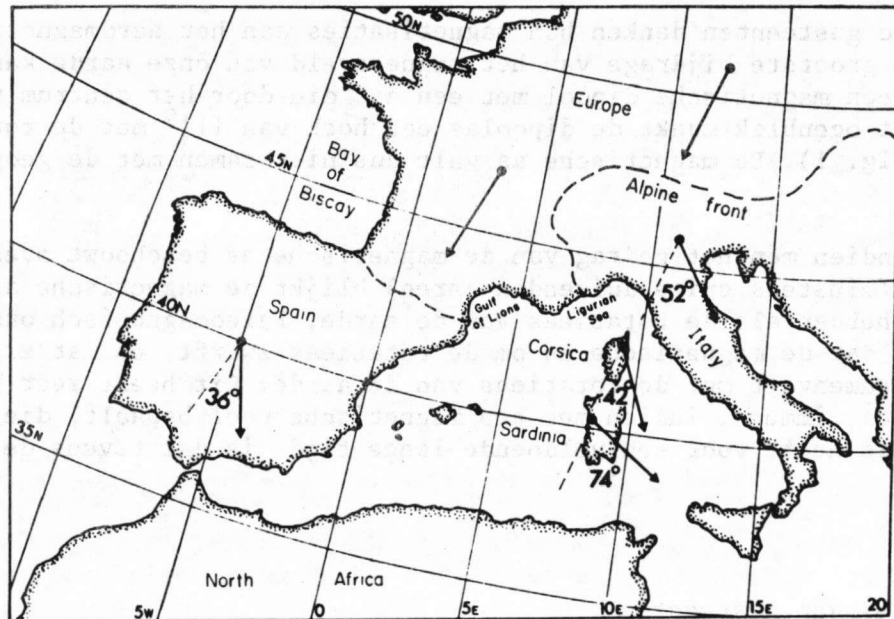
Afzettingsgesteenten kunnen eveneens een remanente magnetisatie krijgen. Tijdens de sedimentatie kunnen de reeds aanwezige, zwak magnetische partikels gericht worden door het heersende aardmagnetische veld. Behouden de magnetische partikels na sedimentatie hun eenmaal ingenomen posities krijgt men een detritische remanente magnetisatie. Dan wordt nog de chemische remanente magnetisatie onderscheiden, wanneer de ijzermineralen hun fossiele magnetisatie verkregen hebben tijdens de vorming bij lage temperaturen.



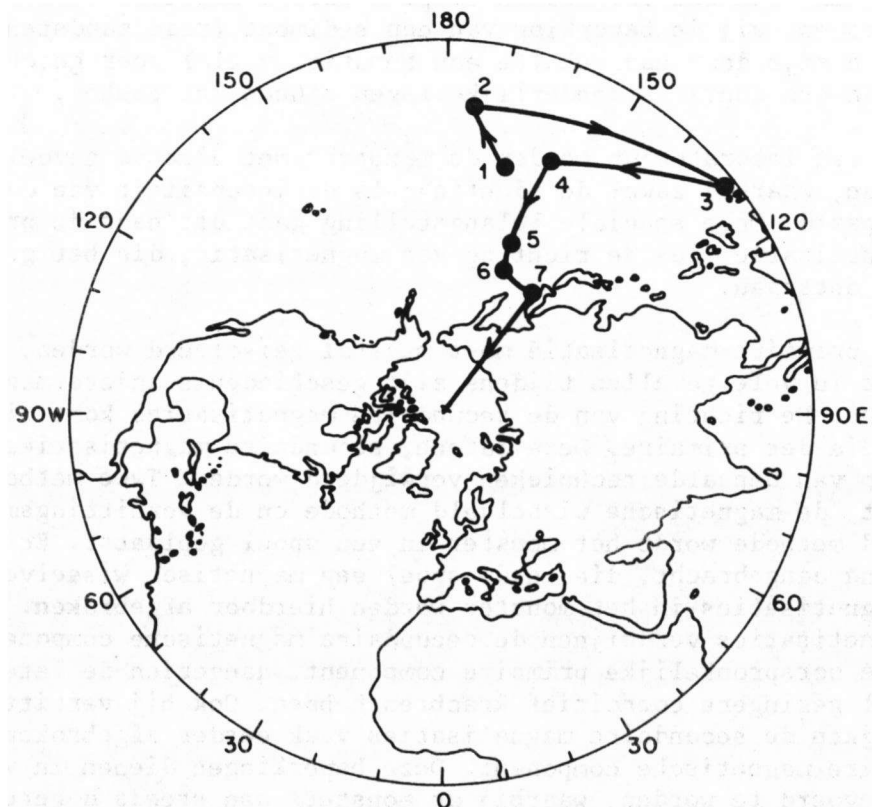
Figuur 1. Geocentrische magnetische dipool met een patroon van krachtlijnen.
Dipoolas maakt een hoek van 11° met de rotatieas van de aarde.



Figuur 2. Kaart van Oost Azië en aangrenzend deel van de Pacifische Oceaan met Permische paleomagnetische poolposities van stabiel Europa, verkregen van lavas, Esterel, Frankrijk (1); rode sedimenten, dôme de Barrot, Frankrijk (2); lavas, Exeter, Engeland (3); lavas, Oslo, Noorwegen (4); lavas, Nahe, Duitsland (5); lavas, Nideck, Frankrijk (6).



Figuur 3. Kaart van Europa met aangegeven de gemiddelde paleomagnetische declinatie van het Perm voor stabiel Europa, alsmede de afwijkende declinaties in enige Zuid-Europese gebieden. Het bedrag in graden van de rotatie sedert het Perm is aangegeven.



Figuur 4. Paleomagnetische poolbaan voor stabiel Europa met posities voor Cambrium (1), Ordovicium (2), Boven Siluur (3), Devoon-Carboon (4), Perm (6) en Trias (7). Er zijn geen poolposities voor het hogere Mesozoicum; de Tertiaire polen liggen in de buurt van de huidige pool.

Het aardmagnetisch veld

De gesteenten danken hun magnetisaties aan het aardmagnetische veld. Verreweg de grootste bijdrage van het magneetveld van onze aarde kan opgevat worden als een magnetische dipool met een as, die door het centrum van de aarde gaat. Op dit ogenblik maakt de dipoolas een hoek van $11\frac{1}{2}^{\circ}$ met de rotatieas van de aarde (fig. 1). De magnetische as valt dus niet samen met de geografische as.

Indien men het gedrag van de magnetische as beschouwt over een langere periode (minstens enige duizenden jaren) blijkt de magnetische as dezelfde positie te hebben als de rotatieas van de aarde. Paleomagnetisch onderzoek heeft aangetoond, dat de magnetische as om de rotatieas zwerft, en dat zijn gemiddelde positie samenvalt met de rotatieas van de aarde. Dit heeft zeer belangrijke consequenties, immers, indien men een magnetische pool bepaalt, die een gemiddelde positie heeft voor een voldoende lange tijd, is dat tevens de geografische pool.

Magnetisaties van gesteenten

Voor een paleomagnetisch onderzoek van een gesteentecomplex worden georiënteerde monsters verzameld, zodanig, dat de monsters een voldoende lange tijdsperiode beslaan, teneinde een betrouwbare gemiddelde magnetische richting te kunnen vinden. Van een vulkanisch complex worden monsters verzameld van diverse lavastromen; bij de bewerking van een sediment (rode zandstenen en rode siltgesteenten zijn door hun gehalte aan hematiet veelal zeer geschikt) wordt gemonsterd aan een aantal afzonderlijke lagen binnen het pakket.

In het laboratorium worden de monsters met uiterst gevoelige magnetometers gemeten, waarbij zowel de richting als de intensiteit van de magnetisatie wordt bepaald. Onze speciale belangstelling gaat uit naar de primaire richting van magnetisatie, dus de richting van magnetisatie, die het gesteente kreeg tijdens zijn ontstaan.

De primaire magnetisatie moet meestal geïsoleerd worden, want het gesteente heeft in vele gevallen tijdens zijn geschiedenis andere magnetisaties erbij gekregen. De richting van de secundaire magnetisaties komt dikwijls niet overeen met die der primaire. Deze latere, secundaire magnetisaties kunnen meestal met behulp van bepaalde technieken verwijderd worden. Twee methoden worden veel gebruikt, de magnetische wisselveld methode en de verhittingsmethode. Bij de wisselveld methode wordt het monster in een spoel geplaatst. Er wordt een wisselspanning aangebracht, die in de spoel een magnetisch wisselveld veroorzaakt. De magnetisaties in het monster worden hierdoor afgebroken. Bij de samengestelde magnetisaties verdwijnen de secundaire magnetische componenten dikwijls eerder dan de oorspronkelijke primaire component, aangezien de latere magnetisaties veelal geringere coercitief krachten hebben. Ook bij verhitting van de monsters blijken de secundaire magnetisaties vaak eerder afgebroken te worden dan de primaire magnetische component. Deze bewerkingen dienen in verschillende stappen uitgevoerd te worden, waarbij de monsters aan steeds hogere wisselvelden, c.q. temperaturen worden blootgesteld; na elke "stap" worden de monsters gemeten op de magnetometers.

Uiteindelijk kunnen deze tijdrovende bewerkingen van de monsters ons

de primaire richting van magnetisatie verschaffen. Een aantal van minstens enige tientallen monsters dient aldus bewerkt te worden om een betrouwbare gemiddelde richting te krijgen.

Het paleomagnetisch onderzoek heeft aangetoond, dat gesteenten, die ouder zijn dan ca 50 miljoen jaar, een primaire richting van magnetisatie hebben, die sterk kan afwijken van de richting, die het magnetisch veld van de aarde heeft op dit ogenblik op de plaats van monsternamen. De Permische vulkanische gesteenten uit het Oslo gebied, bijvoorbeeld, hebben een primaire magnetisatierichting met een declinatie van 204° , en een inclinatie van -36° , d.w.z. dat de noordpoolzoekende richting naar het ZZW (204°) en naar boven (negatieve inclinatie) is gericht. In het Oslo gebied is nu de noordpoolzoekende richting naar het NNW en steil naar beneden gericht.

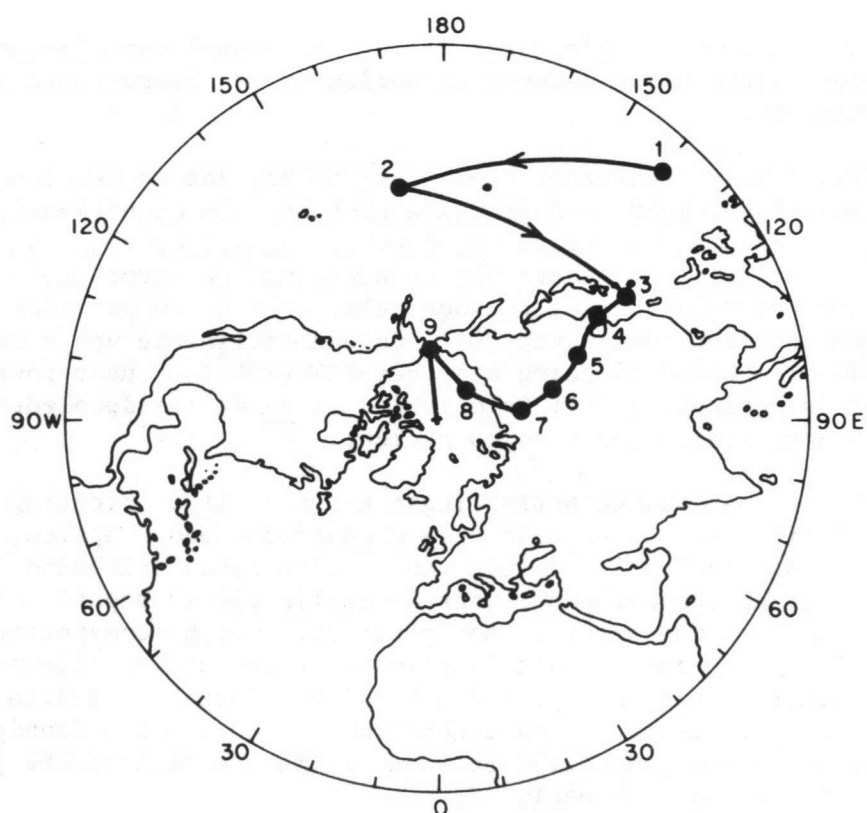
Met behulp van eenvoudige betrekkingen kan men uit de richting van de magnetisatie de positie van de bijbehorende magnetische pool bepalen, o.a. met $\tan i = 2 \cot g p$, waarbij i = inclinatie van de magnetisatierichting en p = poolafstand, de bolafstand van het punt, waar de inclinatie is bepaald tot het doorprikkpunt van de magnetische as. Voor het gesteente, dat paleomagnetisch onderzocht is, betekent het, dat men uit de primaire richting van zijn magnetisatie, de bijbehorende magnetische pool kan bepalen.. Derhalve, indien de gemiddelde richting van magnetisatie is samengesteld uit een aantal afzonderlijke richtingen, die een voldoende lange tijd beslaan, is met de magnetische pool tevens de rotatieas van de aarde bepaald.

Aan de hand van het voorbeeld van de Permische vulkanieten van de Oslo slenk kan dit nader worden toegelicht. In genoemd gebied zijn een aantal georiënteerde monsters verzameld van alle ca 17 lavastromen. Van elk der afzonderlijke stromen is de primaire richting van magnetisatie bepaald. Afgezien van de invloed van meetfouten hebben de stromen onderling enigszins verschillende richtingen van magnetisatie; deze verschillen zijn een gevolg van de seculaire variatie van het toenmalige aardmagnetische veld. De opeenvolgende stromen zijn uitgevloeid met een zeker tijdsinterval. De gemiddelde richting van magnetisatie, bepaald van de 17 afzonderlijke stromen, beslaat dus een vrij lange periode. De positie van de paleomagnetische pool, die berekend wordt van de gemiddelde primaire magnetisatierichting van de Permische Oslo lava's, is gelijktijdig de positie van de geografische pool. Deze pool ligt op 157° O.L. en 47° N.B. ten Oosten van Japan.

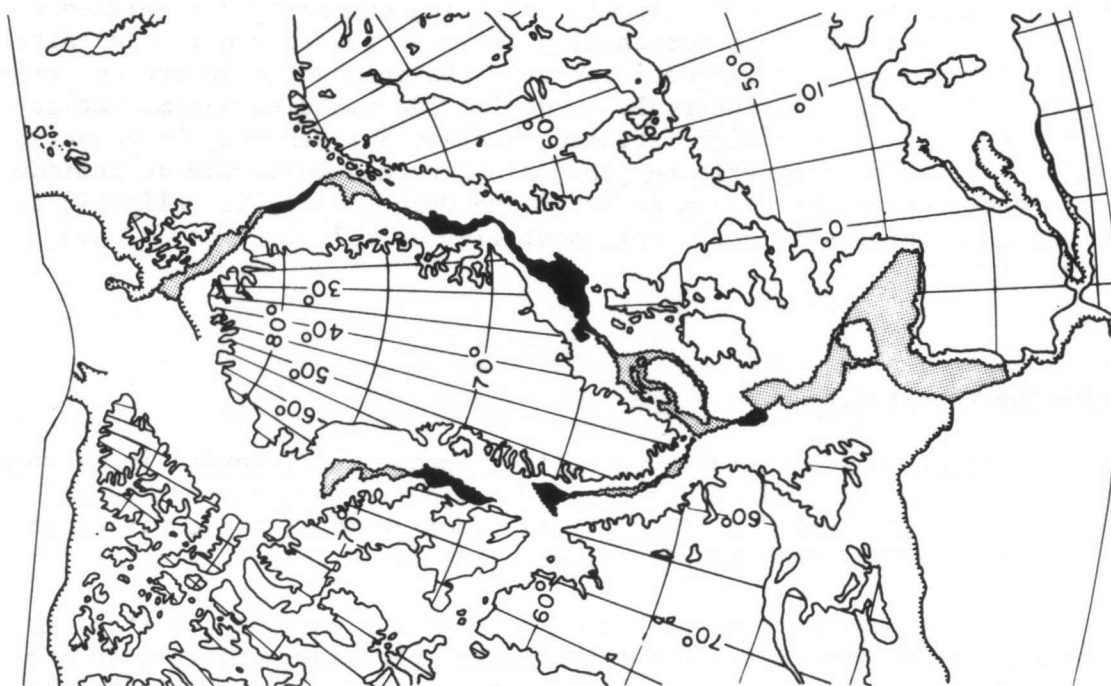
Paleomagnetische resultaten

De paleomagnetische resultaten zullen gepresenteerd worden in de vorm van paleomagnetische poolposities, die afgeleid zijn van de primaire magnetisatierichtingen der gesteenten. Aan de criteria voor gemiddelde richtingen is voldaan, zodat de magnetische polen indentiek zijn met de rotatiepolen.

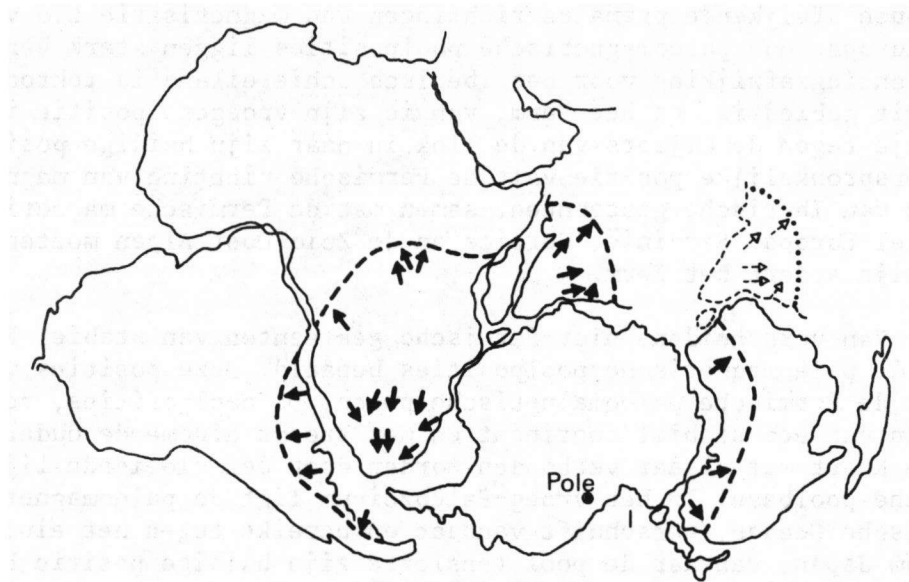
Eerst zullen resultaten van Europa bekeken worden. Van het stabiele deel van Europa, dat is Europa ten N van de Alpiene plooiingsgordel, zijn gesteenten van Permische ouderdom van diverse localiteiten paleomagnetisch onderzocht. Alle daaruit berekende paleomagnetische poolposities bleken in de buurt van Japan te liggen (fig. 2). Dit was een zeer belangrijk resultaat, omdat hiermede werd aangetoond, dat de werkmethode in beginsel juist is.



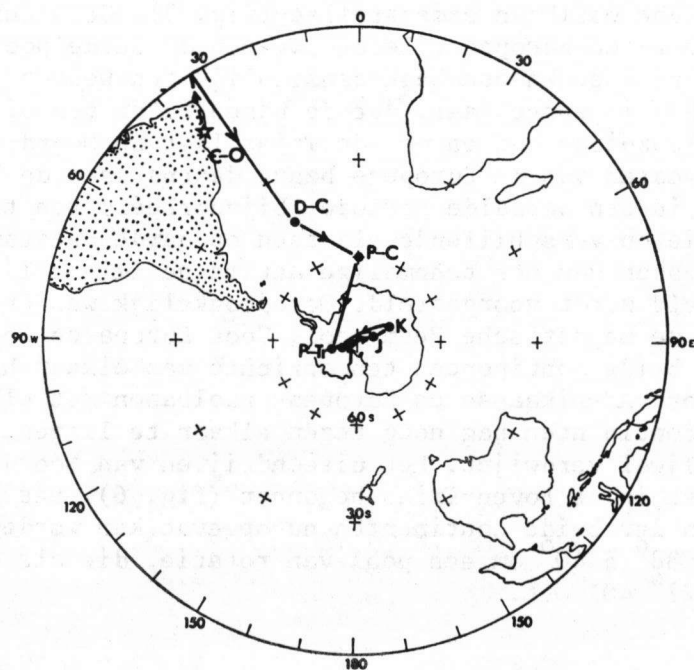
Figuur 5, Paleomagnetische poolbaan voor Noord-Amerika met posities voor Cambrium (1), Ordovicium (2), Siluur-Devoon (3), Carboon (4), Perm (5), Onder Trias (6), Boven Trias (7), Jura (8) en Krijt (9).



Figuur 6. Reconstructie van Europa en Noord-Amerika tijdens het Perm, Zwart zijn stroken, die elkaar overlappen; gearceerd zijn zeeën. Spanje vult echter de Golf van Biskaje (zie ook fig. 3).



Figuur 7. Reconstructie van Gondwanaland met de begrenzing van de Permo-Carbonische glaciatie, alsmede de stroomrichtingen van het ijs.



Figuur 8. Paleomagnetische poolbaan voor Zuid-Amerika met posities achtereenvolgens voor Cambrium-Ordovicium, Devoon-Carboon, Permo-Carboon, Permo-Trias, Krijt, Jura en Tertiair.

Permische gesteenten uit de Alpiene plooiingsgordel en ten zuiden ervan vertonen afwijkende primaire richtingen van magnetisatie t.o.v. die van stabiel Europa. Hun paleomagnetische poolposities liggen sterk verspreid (fig. 3). De richtingsafwijking voor het Iberisch schiereiland is tektonisch te verklaren. Dit gebied is, na het Perm, vanuit zijn vroegere positie in de Golf van Biskaje tegen de wijzers van de klok in naar zijn huidige positie geroteerd. In die oorspronkelijke positie valt de Permische richting van magnetisatie, verkregen van Iberische gesteenten, samen met de Permische magnetisatierichting van stabiel Europa. Sardinië, Corsica en de Zuid-Oost Alpen moeten eveneens geroteerd zijn sedert het Perm.

Van verscheidene niet-Permische gesteenten van stabiel Europa zijn eveneens de paleomagnetische poolposities bepaald. Deze posities vallen niet samen met de Permische paleomagnetische polen. De poolposities, verkregen van gesteenten van een stabiel continent en met steeds afnemende ouderdommen, kunnen op de kaart met elkaar verbonden worden door een vloeiende lijn, de paleomagnetische poolbaan. In het vroeg-Paleozoïcum ligt de paleomagnetische pool in de Pacifische Oceaan, verschuift vandaar en bereikt tegen het einde van het Mesozoïcum Japan, vanwaar de pool tenslotte zijn huidige positie bereikt (fig. 4).

Het paleomagnetische onderzoek, verricht aan gesteenten van de andere continenten toont aan dat, indien men de resultaten van een bepaalde tijdsperiode met elkaar vergelijkt, de paleomagnetische poolposities noch onderling, noch met de Europese posities samenvallen. Slechts de resultaten van gesteenten van een bepaalde periode van éénzelfde continent komen met elkaar overeen. Zeer verrassend zijn de gegevens, verkregen van paleomagnetische studies aan Noord-Amerikaanse gesteenten. Evenals voor stabiel Europa kan men voor Noord-Amerika een paleomagnetische poolbaan samenstellen (fig. 5). Geen enkele Amerikaanse pool valt samen met een Europese. Beschouwt men de beide poolbanen nauwkeurig, dan blijkt de Noord-Amerikaanse baan aanzienlijk ten Westen van de Europese baan te liggen. Het is zonneklaar, dat de banen ieder een eigen bestaan leiden. Van het vroeg-Paleozoïcum tot en met de Trias ligt de Noord-Amerikaanse poolbaan ca 40° ten westen van de Europese baan; daarna gaan de banen naar elkaar toe. Toch zullen in een bepaalde periode, bijvoorbeeld ten tijde van het Perm, de gesteenten, die op verschillende plaatsen op aarde ontstonden, hun magnetisatie gekregen hebben van het toenmalige aardmagnetische veld, dat evenals nu door een dipoolveld wordt voorgesteld. Oorspronkelijk was er derhalve slechts één positie voor de magnetische Perm pool. Voor Europa en Noord-Amerika impliceert dit dat de beide continenten ten opzichte van elkaar hebben bewogen. Brengt men de Noord-Amerikaanse en Europese poolbanen met elkaar tot dekking, dan komen beide continenten nagenoeg tegen elkaar te liggen, waardoor de Atlantische Oceaan vrijwel verdwijnt. Het uiteendrijven van Noord-Amerika en Europa is op zijn vroegst in de Boven-Trias begonnen (fig. 6). Het is aangetoond, dat het uiteendrijven der beide continenten nu opgevat kan worden als een rotatie met een hoek van 38° à 40° om een pool van rotatie, die als coördinaten heeft $88^{\circ} 30' \text{ N.B.}$ en $27^{\circ} 40' \text{ O.L.}$

De zuidelijke continenten

Het paleomagnetisch onderzoek heeft aangetoond, dat voor elk continent een eigen specifieke paleomagnetische poolbaan samengesteld kan worden; elk continent heeft dus zijn eigen geotektonische geschiedenis.

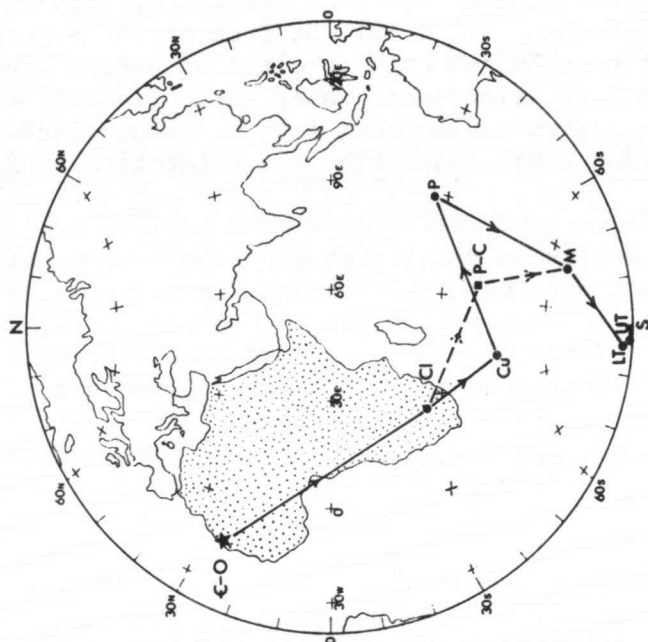
Tot de zuidelijke continenten worden gerekend Zuid-Amerika, Afrika, Australië, Antarctica en India, die ten tijde van het Perm één supercontinent hebben gevormd, het Gondwanaland. Op grond van geologische argumenten werd reeds in 1923 door Alfred Wegener het bestaan van één groot zuidelijk continent gepostuleerd. Van geofysische zijde werd echter de idee van Gondwanaland verworpen, aangezien er geen laterale verplaatsing van continenten mogelijk zou zijn vanwege de hoge viscositeit van de mantel. Argumenten vóór het bestaan van Gondwanaland vormden o.a. de gelijkvormigheid van de kustlijnen van oostelijk Zuid-Amerika en westelijk Afrika, alsmede de geologische punten van overeenkomst op beide continenten. Op alle Gondwanacontinenten werden sporen van een Permo-Carbonische ijstijd gevonden. Men trof glaciaal materiaal aan in Zuid-Amerika, dat afkomstig bleek te zijn uit zuidwest Afrika. Bij de reconstructie van Gondwanaland vormen de Permo-Carbonische glaciale gebieden één aaneengesloten gebied (fig. 7).

Het bestaan van Gondwanaland is door het paleomagnetisch onderzoek aan gesteenten van de zuidelijke continenten bevestigd. Er is vrij veel onderzoek verricht aan gesteenten van diverse ouderdommen in Afrika, Zuid-Amerika en Australië. De gegevens van Antarctica zijn nog schaars. Interessante resultaten zijn verkregen van India en Pakistan.

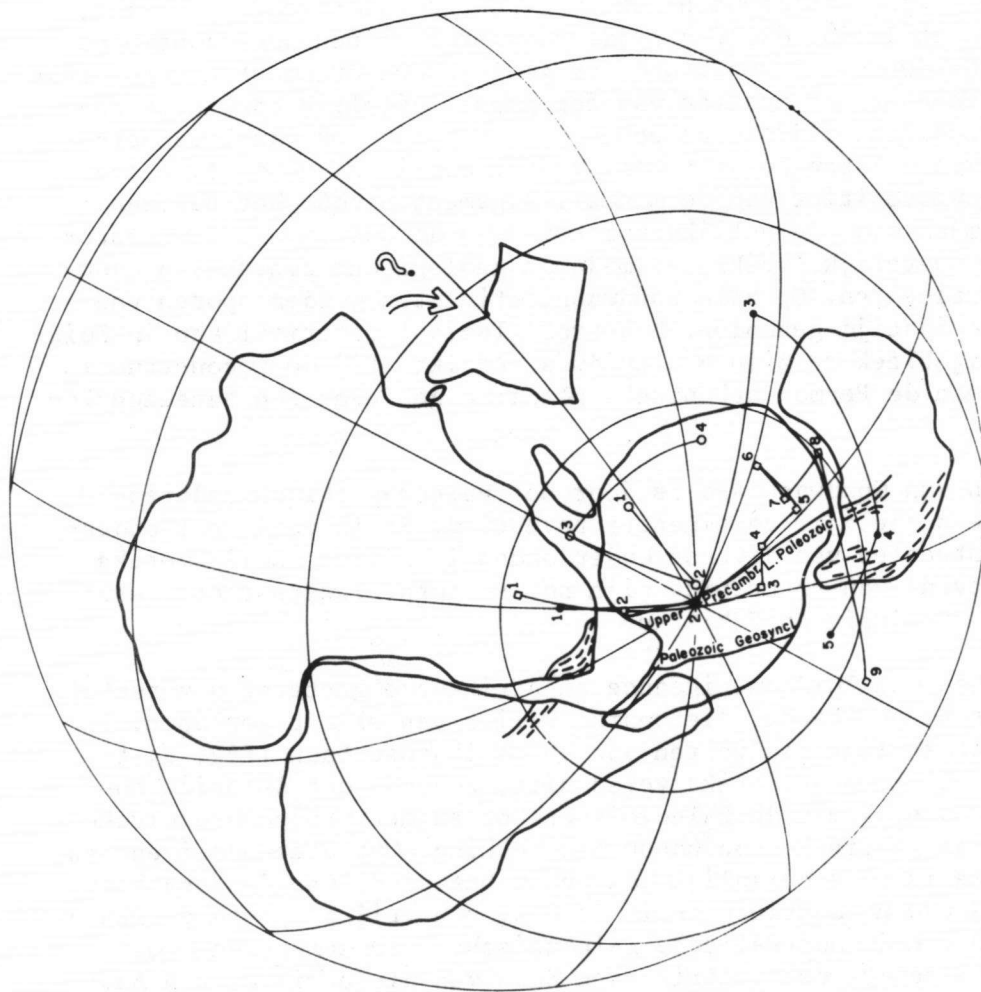
De resultaten van Zuid-Amerikaanse en Afrikaanse gesteenten verschaffen ons paleomagnetische poolbanen, die onafhankelijk van elkaar verlopen. De Zuid-Amerikaanse poolbaan ligt ten westen van de Afrikaanse baan (fig. 8; fig. 9). Indien men Zuid-Amerika naar Afrika verschuift, zodanig dat de beide continenten in elkaar passen, komen de Paleozoische tot en met vroeg Mesozoische gedeelten van de paleomagnetische poolbanen tot dekking. Het uiteendrijven van Zuid-Amerika en Afrika is waarschijnlijk pas tegen het einde van de Jura begonnen. Van de overige Gondwana continenten is er o.a. een vrij complete poolbaan van Australië. Indien men de Australische Paleozoische baan samenbrengt met de gecombineerde Zuid-Amerikaanse - Afrikaanse baan van die periode, kan Australië een plaats krijgen in het Gondwana concept. Het blijkt dan dat Antarctica, waarvan slechts weinig paleomagnetische gegevens beschikbaar zijn, tussen Afrika en Australië geschoven kan worden. De reconstructie van Gondwanaland tijdens het laat-Paleozoicum, verkregen van paleomagnetische gegevens, wordt gesteund door geologisch bewijsmateriaal (fig. 10). De Precambrische gedeelten van Australië - Antarctica - Afrika - Zuid-Amerika sluiten op elkaar aan; een laat-Precambrische plooiingsgordel zet zich voort vanaf Australië, via Antarctica naar Zuid-Afrika; meer naar buiten aansluitend ligt de Paleozoische plooiingsgordel, die vervolgd kan worden vanaf Australië, via Antarctica en Zuid-Afrika naar Zuid-Amerika.

Met behulp van paleomagnetische resultaten kan echter geen uiterst nauwkeurige ordening van de continenten verkregen worden. In de praktijk stuit het volledig doen samenvallen van poolbanen dikwijls op moeilijkheden, die deels een gevolg zijn van het feit, dat de ouderdommen van de gesteenten, waarvan de poolbaan is afgeleid, onvoldoende bekend zijn. Een bekende reconstructie van Gondwanaland is die, waarbij voor het aan elkaar passen van de afzonderlijke continenten gebruik is gemaakt van computers; de continenten worden begrensd door de 500 vadem lijn, dat is op ca. 900 m diepte (fig. 11). Deze reconstructie wordt in iets mindere mate door de paleomagnetische resultaten gesteund.

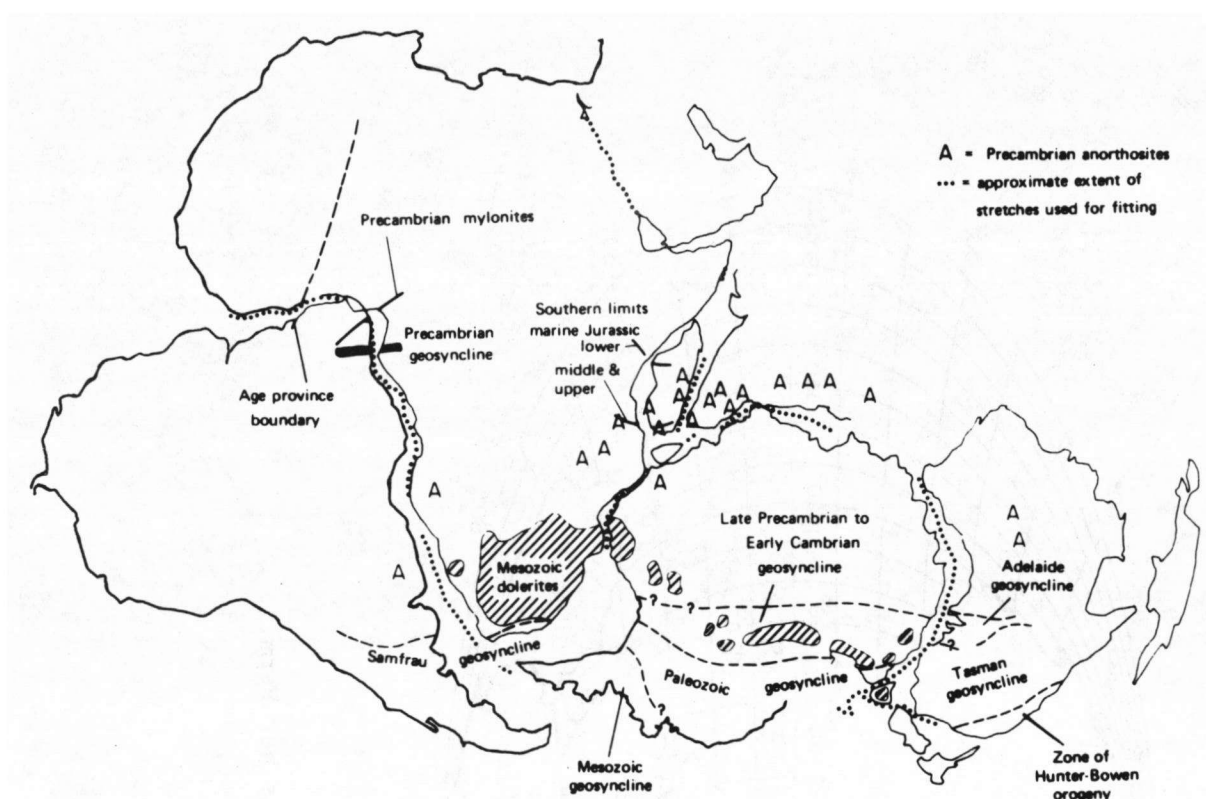
Het inpassen van India in Gondwanaland is het minst eenvoudig. De paleomagnetische gegevens bieden onvoldoende soulaas, aangezien er op dit subcontinent slechts weinig geschikte Paleozoische gesteenten zijn. Duidelijk is



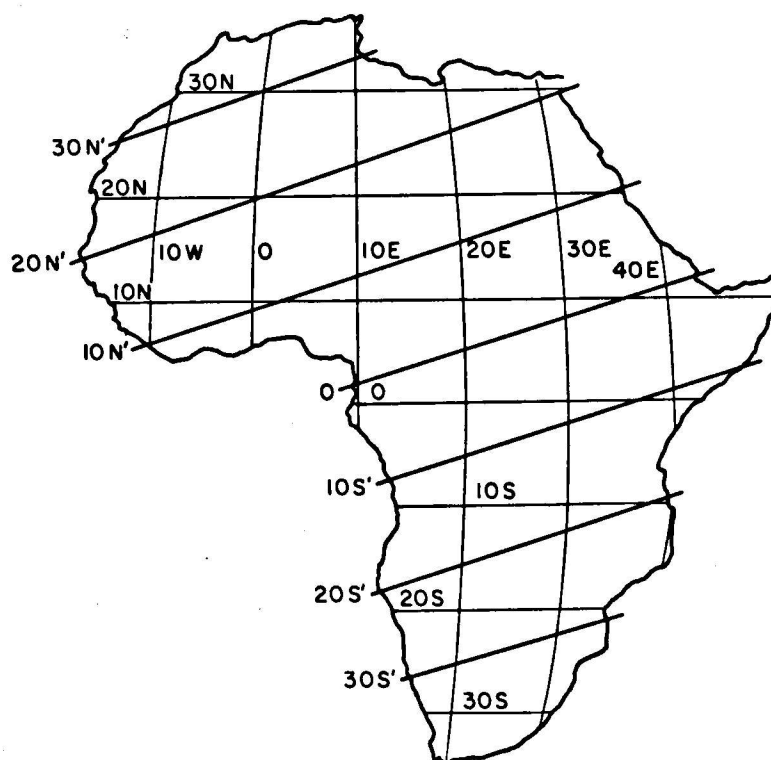
Figuur 9. Paleomagnetische poolbaan voor Afrika met posities achtereenvolgens voor Cambrium-Ordovicium, Onder Carboon, Boven Carboon, Perm, Mesozoicum en Onder en Boven Tertiair. Een afzonderlijke positie voor Permo-Carboon via streep-lijn geeft onzekerheid van Permische posities aan.



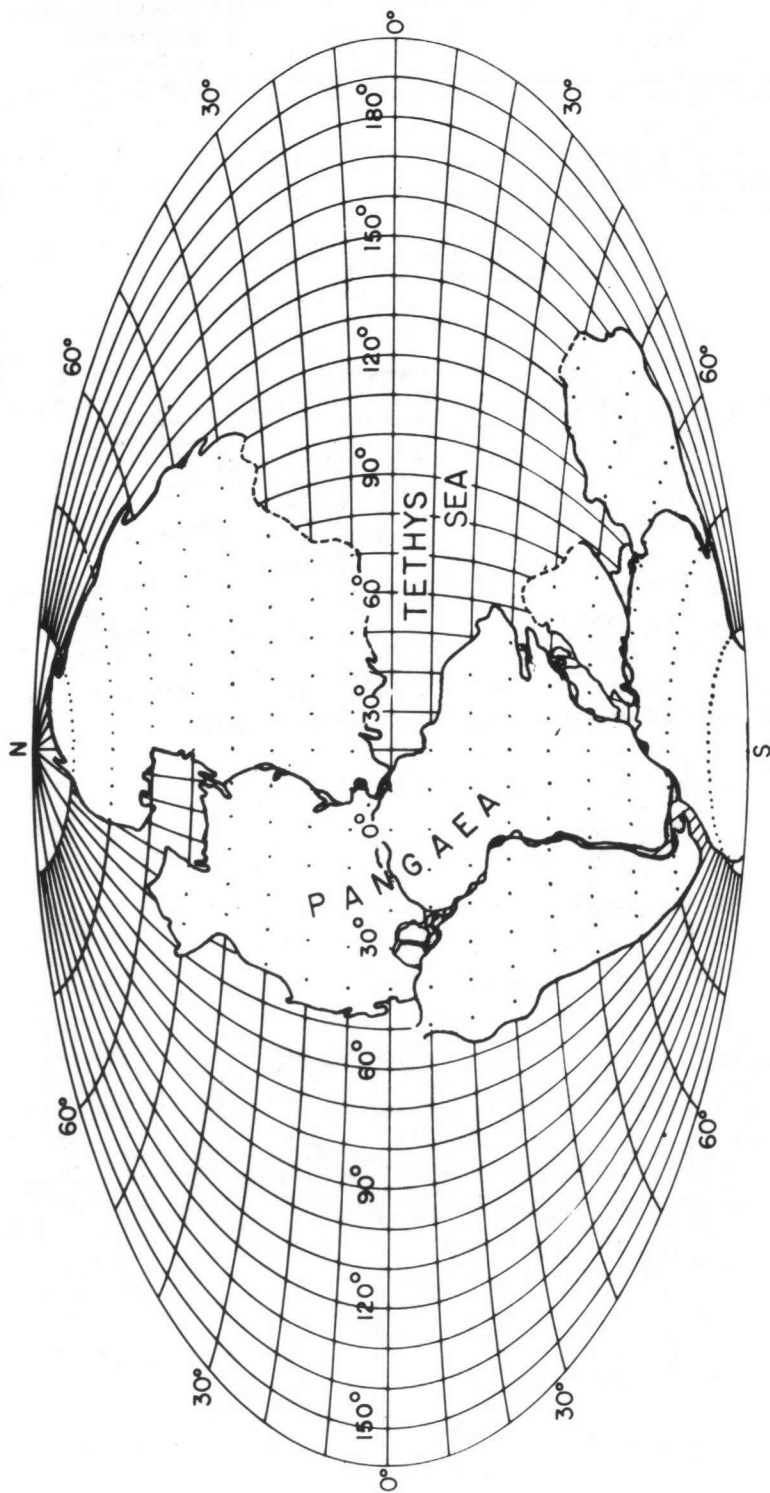
Figuur 10. Reconstructie van Gondwanaland op grond van paleomagnetische gegevens van het Boven Carboon. Enige structurele zones zijn aangegeven. Tevens zijn de paleomagnetische poolbanen tijdens Carboon en Perm getekend voor Afrika (zwarte cirkels), Australië (vierkantjes) en Zuid-Amerika (open cirkels). Oudste polen met nos. 1 aangegeven etc. Let op de snelle "poolwandeling" tijdens Perm en Carboon !



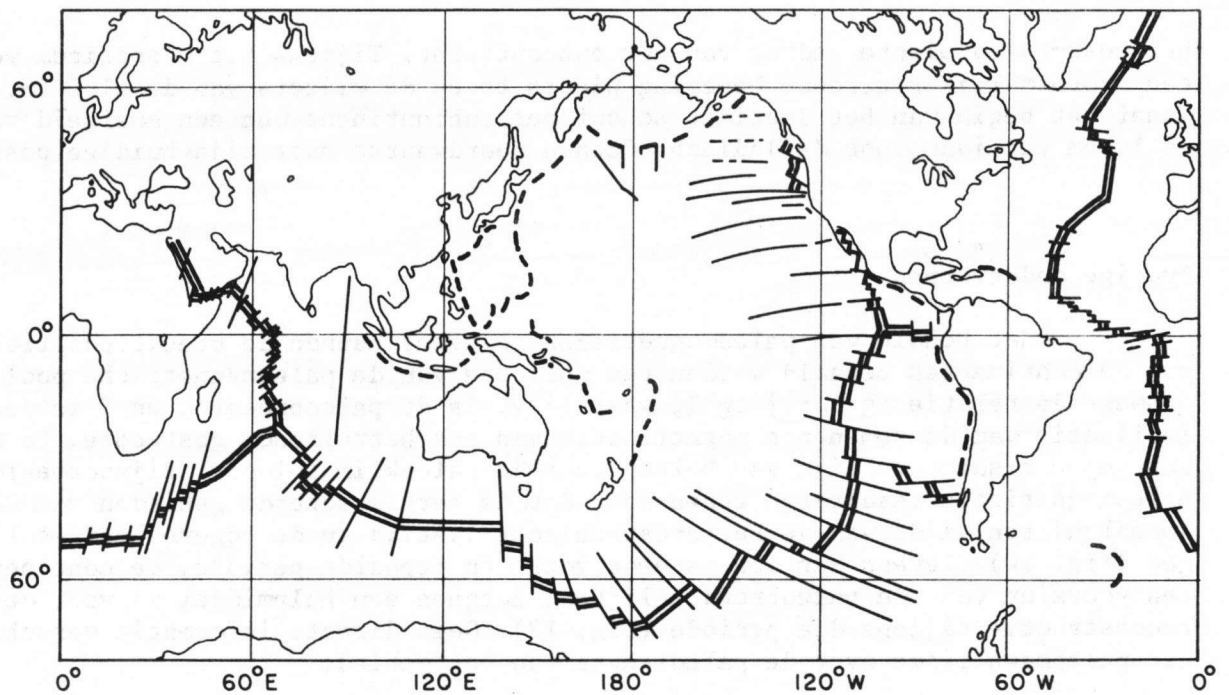
Figuur 11. Reconstructie van Gondwanaland met de hulp van de computer. De grenzen der continenten zijn gelegd volgens de 500 vadem lijnen.



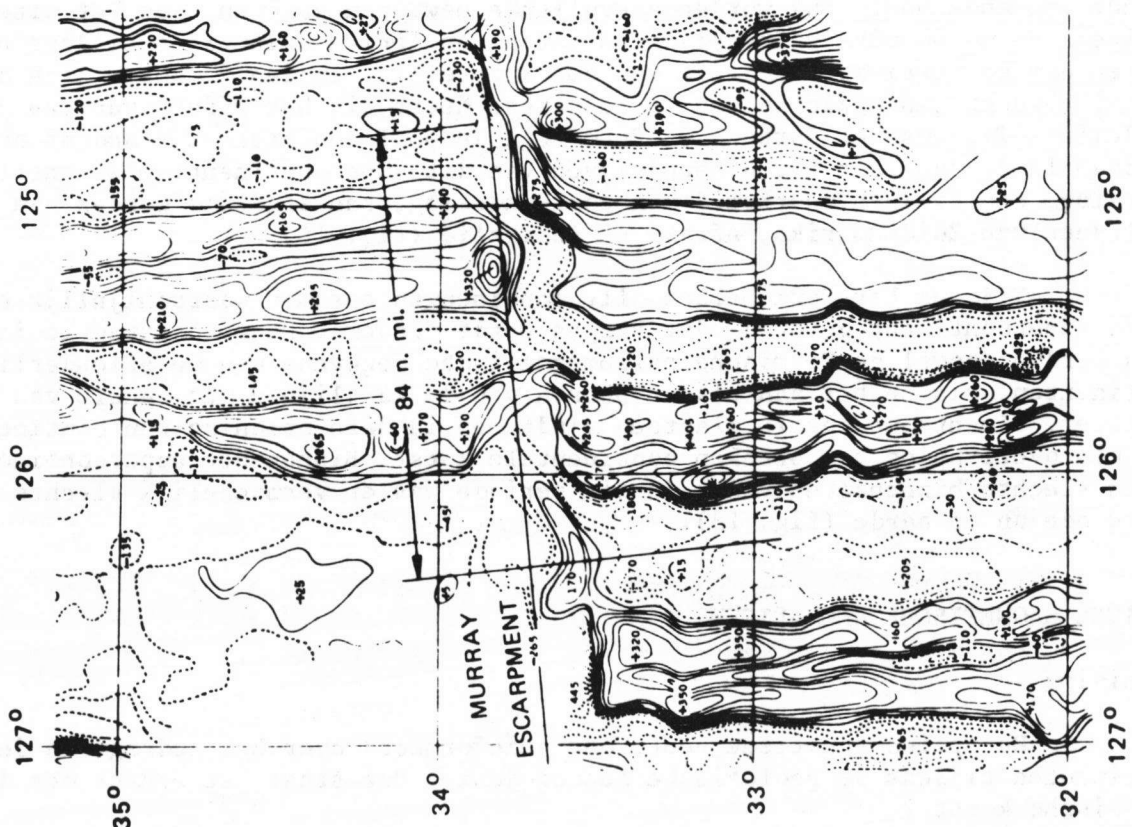
Figuur 12. Afrika voorzien van het huidige gridnet, alsmede van paleo-breedte cirkels voor de periode Boven Trias tot Onder Jura.



Figuur 13. Pangea tijdens het Perm.



Figuur 14. De topografische en structurele elementen in de grote oceanen. Dubbele lijnen zijn oceanische ruggen; enkele lijnen zijn transform faults, en de gestreepte lijnen geven de oceanische troggen aan.



Figuur 15. Patroon van noord-zuid verlopende magnetische anomalieën in de Pacifiche Oceaan ten W. van Californië. Een oost-west "storing" verzet de anomalieën.

het post-Paleozoische gedrag van het subcontinent. Tijdens het Mesozoïcum vond een voornamelijk roterende beweging plaats tegen de wijzers van de klok in. Vanaf het begin van het Tertiair schoof het subcontinent met een snelheid van ca 10 cm per jaar door de Indische Oceaan noordwaarts naar zijn huidige positie.

Overige onderwerpen

Met behulp van paleomagnetische gegevens kunnen de breedteposities van de continenten bepaald worden ten opzichte van de paleomagnetische pool, vanwege de relatie $\tan \lambda = \frac{1}{2} \tan I$, waarbij λ is de paleobreedte, en I is de inclinatie van de remanente magnetisatie van het betreffende gesteente. De aldus verkregen resultaten zijn van belang voor de paleoklimatologie. Bijvoorbeeld, paleomagnetische resultaten tonen aan, dat de vergletscherde gebieden van Gondwanaland ten tijde van de Permo-Carbonische ijstijd in de hogere breedtes lagen (fig. 10). Tevens kan men, steeds voor een bepaalde periode, de continenten voorzien van de paleobreedte lijnen, hetgeen een hulpmiddel is voor de reconstructie tijdens die periode (fig. 12). Geen directe informatie verschaft het paleomagnetisme over de paleolengte van een gebied.

Bij het onderzoek naar poolposities en beweging van continenten dient, zo mogelijk, een onderscheid gemaakt te worden tussen de bewegende pool (polar wandering) en het verschuiven van het continent (continental drift). Wanneer beweegt de pool, dus wanneer wordt de rotatieas van de aarde verplaatst ten opzichte van de korst, en wanneer bewegen uitsluitend één of meer continenten? In het volgende hoofdstuk worden aanvullende bewijzen gegeven, dat het uiteendrijven van de Amerika's enerzijds en Europa en Afrika anderzijds tijdens het Mesozoïcum en Tertiair een drift van continenten is. Indien de korst zich als geheel beweegt ten opzichte van de rotatieas heeft dit het effect van een poolwandeling. Tijdens het Carboon en Perm legt de pool een grote afstand af over Gondwanaland, dus vóór het uiteendrijven van dit supercontinent. Deze snelle beweging, een typisch voorbeeld van poolwandeling, kan afgeleid worden van de poolbanen van Zuid-Amerika, Afrika en Australië (fig. 10).

Tijdens het Perm hebben alle continenten tesamen waarschijnlijk één groot supercontinent gevormd, dat Pangea wordt genoemd. De reconstructie is gebaseerd op zowel de Permische paleomagnetische gegevens van de afzonderlijke continenten, als op het aan elkaar passen van de kustlijnen met behulp van de computer. Slechts op enkele plaatsen vindt men in deze ordening van continenten een overlapping van stroken continentale korst. Binnen het supercontinent komen slechts binnenzeeën voor; in die periode was er vermoedelijk slechts één grote oceaan op aarde (fig. 13).

MARIENE MAGNETISCHE ANOMALIEËN

Inleiding

Het paleomagnetisme heeft ons geïnformeerd over het gedrag van de continenten tijdens de geologische geschiedenis. Hoe staat het echter met de oceanische korst?

In de vijftiger jaren toonde bathymetrisch onderzoek in de oceanen de aanwezigheid van langgerekte onderzeese ruggen aan, die een breedte van enige

duizenden en een lengte van enkele tienduizenden kilometers kunnen hebben. In het mediane gedeelte van de Atlantische Oceaan bevindt zich de Mid-Atlantische Rug, die een globaal noord-zuid verloop heeft door de gehele oceaan. In het zuiden buigt de rug af naar het oosten en bereikt dan de Indische Oceaan, waar hij de Carlsberg Rug wordt genoemd. Van hier is er een aftakking, die tussen Australië en Antarctica vervolgd kan worden naar de zuidelijke Pacifische Oceaan. Deze tak buigt ter hoogte van Zuid-Amerika noordwaarts naar het Noord-Amerikaanse continent; dit gedeelte noemt men de Oost Pacifische Rug (East Pacific Rise). De oceanische ruggen, die slechts sporadisch boven de zeespiegel uitkomen, verheffen zich tot enige duizenden meters boven de diepzeevlakte. De ruggen zijn niet continu, doch worden op talloze plaatsen verzet door breuken, die men "transform faults" noemt (fig. 14).

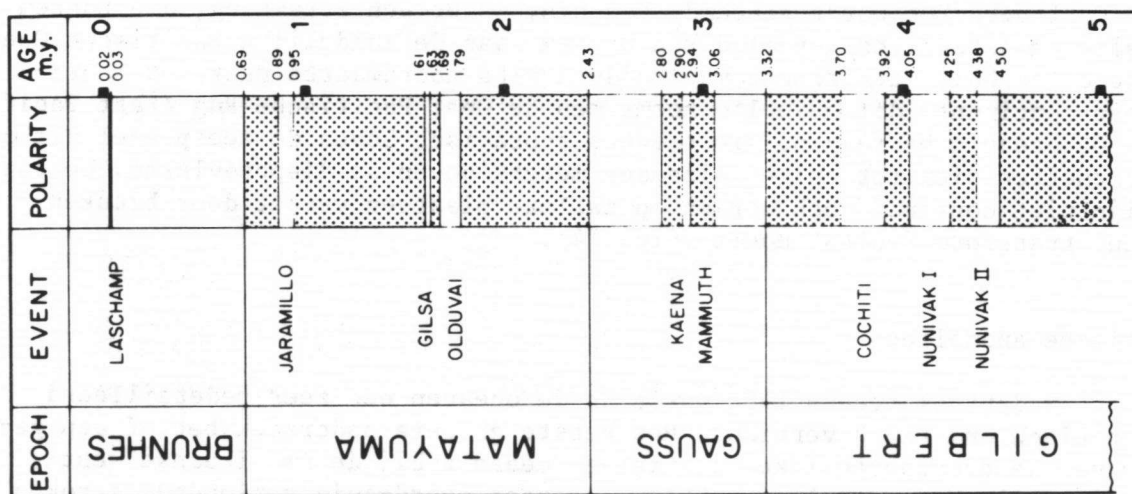
Magnetische anomalieën

Sedert omstreeks 1960 wordt in de oceanen een zeer gedetailleerd geomagnetisch onderzoek verricht. Het eerste grotere onderzoek betrof een gedeelte van de noordoostelijke Pacifische Oceaan nabij de Amerikaanse westkust (fig. 15). Men vond langgerekte, ongeveer noord-zuid verlopende stroken van positieve en negatieve magnetische anomalieën, afwijkingen derhalve van de regionale totale intensiteit van het magnetisch veld, die tot ca 2% kunnen bedragen. Al eerder was gevonden, dat een sterke positieve magnetische anomalie parallel verliep aan de centrale slenk van de Mid-Atlantische Rug. Nader onderzoek in de overige oceanen bracht aan het licht, dat er steeds positieve magnetische anomalieën lopen over de centrale gedeelten der oceanische ruggen. Ter weerszijden van de positieve anomalieën op de ruggen, ziet men negatieve, vervolgens weer positieve magnetische anomaliestroken, enzovoorts. Vrijwel steeds blijken de anomalieën symmetrisch te zijn ten opzichte van de centrale positieve magnetische anomalie. De breedte van een anomalie varieert van 10 tot 50 km. Indien de rug verspringt langs een transform fault, verspringen de magnetische anomalieën eveneens.

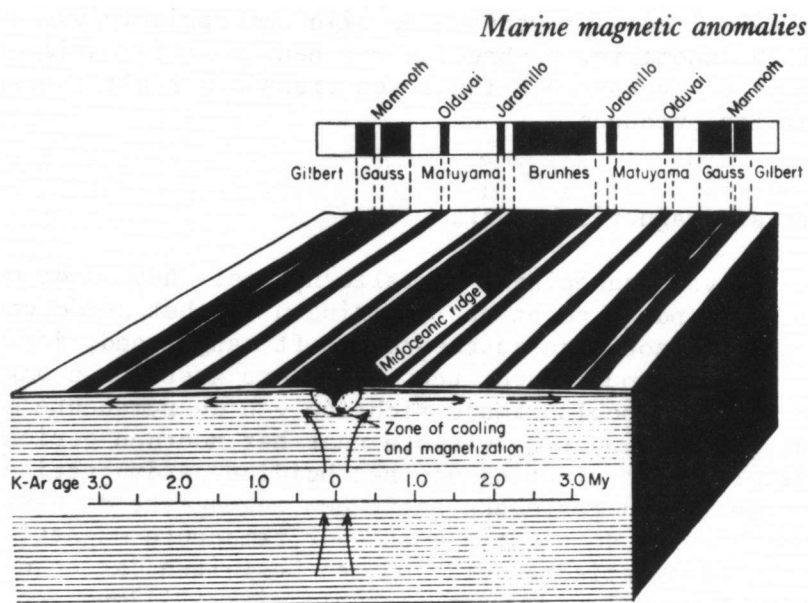
Omkeringen van het aardmagnetische veld

Het patroon van magnetische anomalieën, zoals het in de oceanen wordt gevonden, wordt in verband gebracht met omkeringen van het aardmagnetische veld. Het paleomagnetisch onderzoek aan gesteenten heeft aangetoond, dat sommige gesteenten normaal zijn gemagnetiseerd, terwijl andere gesteenten omgekeerd gemagnetiseerd zijn. De noordpoolzoekende richting van de remanente magnetisatie is bij een normaal gemagnetiseerd gesteente naar het noorden gericht, en loopt dus ongeveer parallel aan de richting van het huidige aardmagnetische veld. Een omgekeerd gemagnetiseerd gesteente heeft een tegengesteld gerichte remanente magnetisatie. Vanwege de relatie tussen de remanente magnetisaties van gesteenten aan het aardmagnetische veld kan men besluiten dat er normale en omgekeerde magnetische perioden van het aardveld zijn. Tijdens een omgekeerde magnetische periode, is de magnetische dipoolas van de aarde van teken verwisseld, zodat de krachtlijnen een tegengesteld verloop hebben ten opzichte van het huidige patroon (fig. 1).

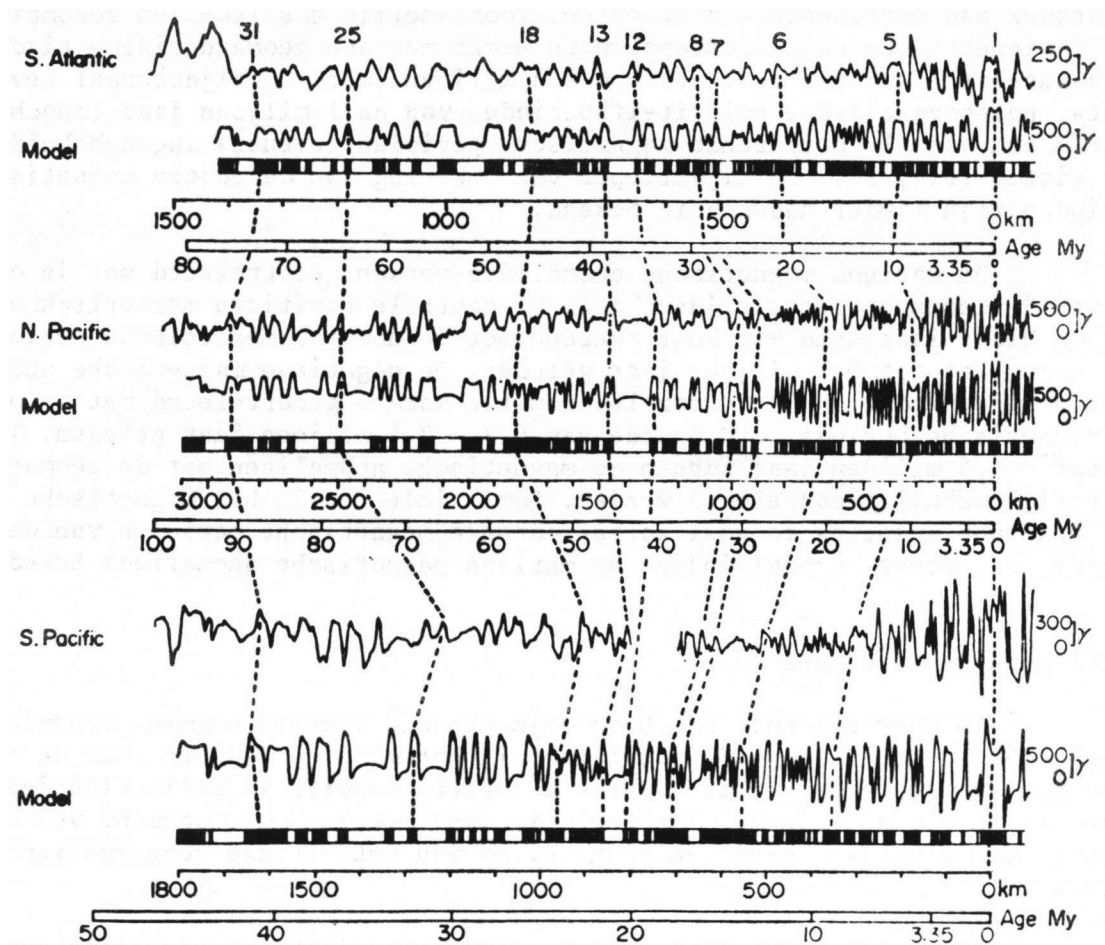
De omkeringen van het aardmagnetische veld vertonen een zekere regulariteit. Gesteenten jonger dan 0,7 miljoen jaar zijn altijd normaal gemagnetiseerd. In deze gesteenten vindt men steeds een remanente magnetisatierichting, globaal parallel aan de huidige veldrichting. Gesteenten met een ouderdom tussen 0,7 en



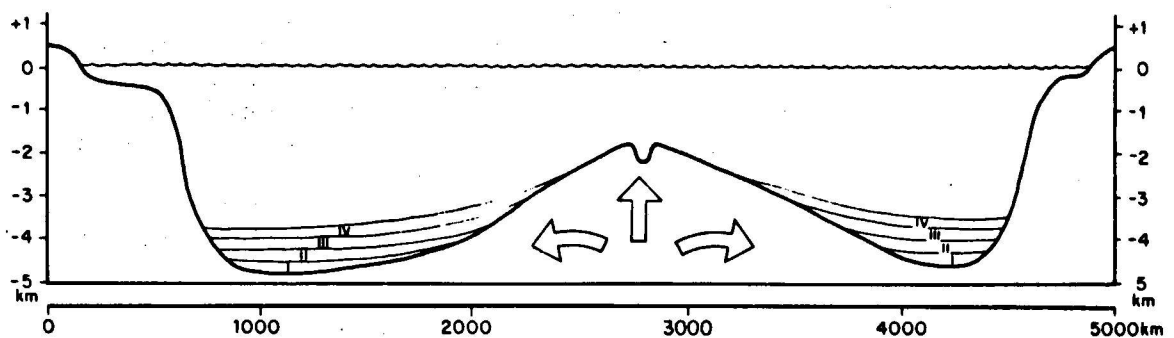
Figuur 16. Geomagnetische tijdsschaal van de laatste 5 miljoen jaar met epochs en events. Namen der epochs zijn die van bekende geophysici; de events zijn voorzien van geografische namen (eerste vindplaats).



Figuur 17. Schematische voorstelling van het principe van het ontstaan van oceanische korst aan de ruggen, alsmede het zijwaarts schuiven van de nieuw gevormde korst. De normaal (zwart) en omgekeerd (wit) gemagnetiseerde stroken komen respectievelijk overeen met positieve en negatieve magnetische anomalieën, die tevens zijn te correleren met de geomagnetische tijdsschaal.



Figuur 18. Mariene magnetische anomalieën en hun correlatie: van boven naar beneden patronen van de Zuid Atlantische Oceaan, Noord Pacifiche Oceaan en Zuid Pacifiche Oceaan, voorzien van afstands- en tijdsschalen. Spreidingsrug bij 0 km.



Figuur 19. Schematisch profiel door de Atlantische Oceaan met de Mid-Atlantische Rug, alsmede de sedimentbedekking. Vanaf de rug neemt zowel de dikte van de sedimenten toe, als de ouderdom van de basisafzettingen.

2,4 miljoen jaar (met uitzondering van enkele kortdurende ingeschakelde perioden) zijn tegengesteld gericht gemagnetiseerd. Aan de hand van paleomagnetisch onderzoek aan continentale gesteenten, voornamelijk basalten, en gecombineerd met radiometrische ouderdomsbepalingen heeft men een geomagnetische tijdsschaal op kunnen stellen voor de laatste 4 à 5 miljoen jaar. De tijdsschaal bevat een aantal paleomagnetische polariteitsperioden van ca 1 miljoen jaar (epochs), waarin een aantal kortdurende magnetische perioden (events) ingeschakeld kunnen zitten (fig. 16). De tijdstippen van omkering van de oudere magnetische perioden zijn minder nauwkeurig bekend.

De mariene magnetische anomalieën worden gecorreleerd met de omkeringen van de geomagnetische tijdsschaal. De centrale positieve magnetische anomalie van de Mid-Atlantische Rug komt overeen met de normaal magnetische periode, die teruggaat tot 0,7 miljoen jaar geleden. De negatieve magnetische anomalieën aan weerszijden van de centrale anomalie worden gecorreleerd met de omgekeerde magnetische periode, die duurde van 0,7 - 2,4 miljoen jaar geleden. Tot ongeveer - 4,5 miljoen jaar kunnen de magnetische anomalieën met de geomagnetische tijdsschaal gecorreleerd worden. Soms vindt men in het magnetische anomalieënpatroon eveneens de veel korter durende magnetische perioden van de tijdsschaal, de events, vooral indien de mariene magnetische anomalieën breed zijn.

Spreiding van de zeebodem

In 1960 presenteerde Hess zijn theorie over de vorming van nieuwe oceanische korst. Volgens Hess ontstaat in het mediane gedeelte van de oceanische ruggen nieuwe korst, die daarna zijwaarts schuift in beide richtingen loodrecht op de ruggen. Vine en Matthews, in 1963, werkten dit concept verder uit, als eersten gebruik makend van de gegevens van het mariene geomagnetische onderzoek.

Onder het centrale gedeelte van de oceanische ruggen vindt een gedeeltelijke opsmelting van materiaal van de mantel plaats, waarbij basalt wordt gevormd als de fractie met een relatief laag smeltpunt. Tijdens de afkoeling worden de basalten, die deels intrusief zijn in het hogere deel van de oceanische korst en deels extrusief zijn als submariene lava's, remanent gemagnetiseerd door het aardmagnetische veld. In een periode van normale magnetisatie, zoals sedert 0,7 miljoen jaar geleden, worden de basalten normaal gemagnetiseerd, hetgeen een positieve magnetische anomalie zal veroorzaken. Tijdens een periode van een tegengesteld gericht aardmagnetisch veld, wordt de korst, die dan ontstaat, omgekeerd gemagnetiseerd. De vrij brede negatieve mariene magnetische anomalieën aan weerszijden van de centrale positieve anomalie op de oceanische ruggen vertegenwoordigen derhalve oceanische korst, die gevormd werd tussen 0,7 en 2,4 miljoen jaar geleden in het mediane deel van de rug en vandaar zijwaarts schoof naar beide zijden. Met behulp van de geomagnetische tijdsschaal kan men de mariene magnetische anomalieën der laatste 5 miljoen jaar dateren (fig. 17). Hierdoor is het tevens mogelijk om de snelheid van spreiding te bepalen. Het symmetrische beeld van de magnetische anomalieën ten opzichte van de centrale positieve anomalie duidt erop, dat de snelheid van spreiding van de oceanische korst naar beide zijden vanaf de rug even groot is. De snelheid van uiteen drijven van de nieuwe korst is niet overal gelijk. In de noordelijke Atlantische Oceaan liggen de magnetische anomalieën dicht bij elkaar, waaruit een spreidingssnelheid van ca 1 cm per jaar per flank werd bepaald. Aan de Oost Pacifische Rug, waar de magnetische anomalie stroken zeer breed zijn, wordt

nieuwe korst gevormd met een snelheid van ca 8 cm per jaar per flank, dus in totaal 16 cm korst per jaar !

Hoewel men slechts de beschikking heeft over een betrouwbare geomagnetische tijdsschaal der laatste 5 miljoen jaar voor de tijdsbepaling der magnetische anomalieën, is het toch mogelijk de oudere anomalieën te dateren. Ook de oudere anomalieën blijken een symmetrisch beeld te vertonen. Men kan de anomaliepatronen, verkregen van de verschillende oceanen, met elkaar vergelijken. Het blijkt dan, dat correlatie mogelijk is, ondanks het vaak in mindere of meerdere mate uitgerekte beeld van de anomalieën als gevolg van de verschillen in spreidingssnelheid.

Uit de onderlinge vergelijking van de magnetische anomalieën van de verschillende oceanen bleek het patroon van de zuidelijke Atlantische Oceaan de minste afwijkingen te vertonen met betrekking tot elk der andere anomaliepatronen. Dit wordt dan ook gekozen als ideaal patroon (fig. 18). Aangenomen werd, dat in de zuid Atlantische Oceaan een continue spreiding heeft plaats gevonden met een snelheid van 1,9 cm per jaar per flank; de spreidingssnelheid werd afgeleid uit de jongere, gedateerde magnetische anomalieën. De oudste te correleren anomalieën in het zuidelijk deel van de Atlantische Oceaan krijgen dan een ouderdom van 76 miljoen jaar. Zou deze datering juist zijn, dan zou men door correlatie van de magnetische anomalieën grote delen van de oceanische korst nauwkeurig kunnen dateren.

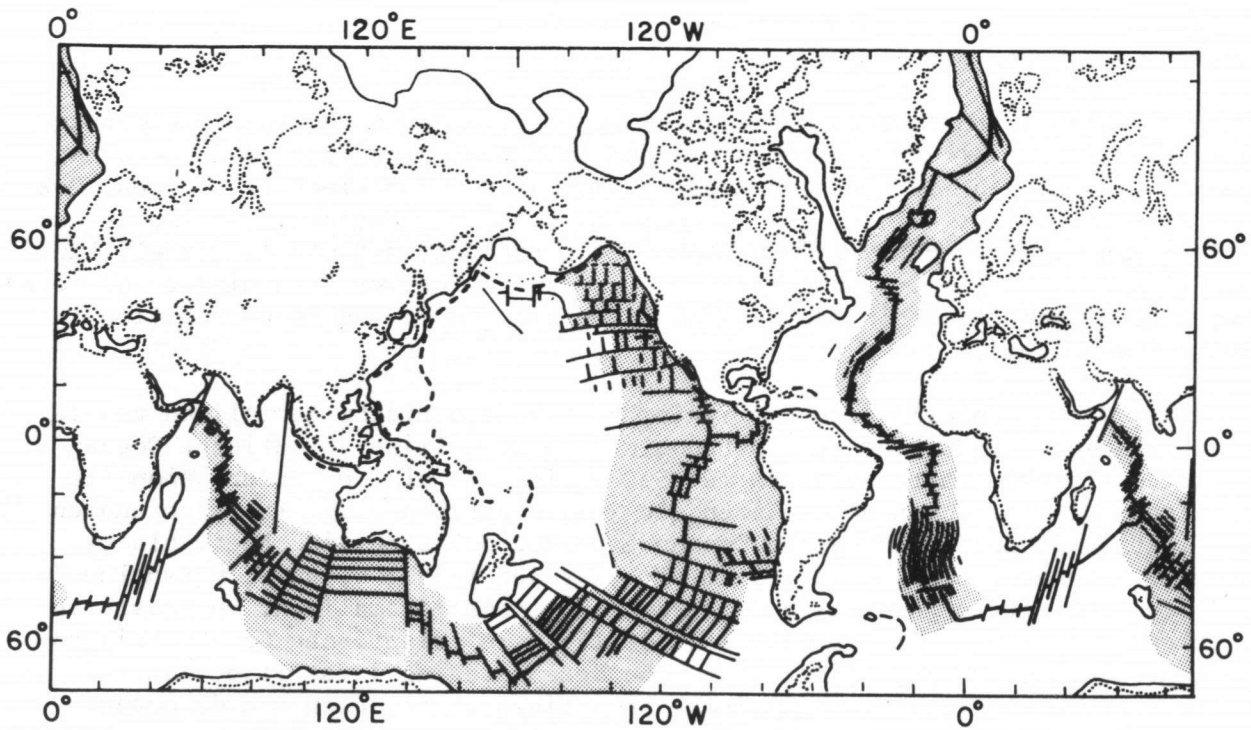
De resultaten van een uitgebreid boorprogramma in de Atlantische Oceaan uitgevoerd door de gezamenlijke oceanografische instituten (JOIDES) ter controle van de ouderdommen van de magnetische anomalieën, hebben de gepostuleerde dateringen bevestigd. De boringen werden uitgevoerd in de sedimenten, die de oceanische basaltkorst bedekken. Op en nabij de Mid-Atlantische Rug is het sedimentpakket afwezig tot zeer dun. Aan weerszijden van de rug neemt de dikte echter toe. Tevens worden de afzettingen, die direct op de basaltkorst liggen ouder, naarmate men verder van de Rug verwijderd is (fig. 19). Men kan nu de ouderdom van de basissedimenten uitzetten tegen de afstand van de waarnemingspunten tot de Rug. Hierin vindt men de bevestiging van de veronderstelde continuïteit en grootte der spreiding in de zuidelijke Atlantische Oceaan.

Ouderdom van de oceanen

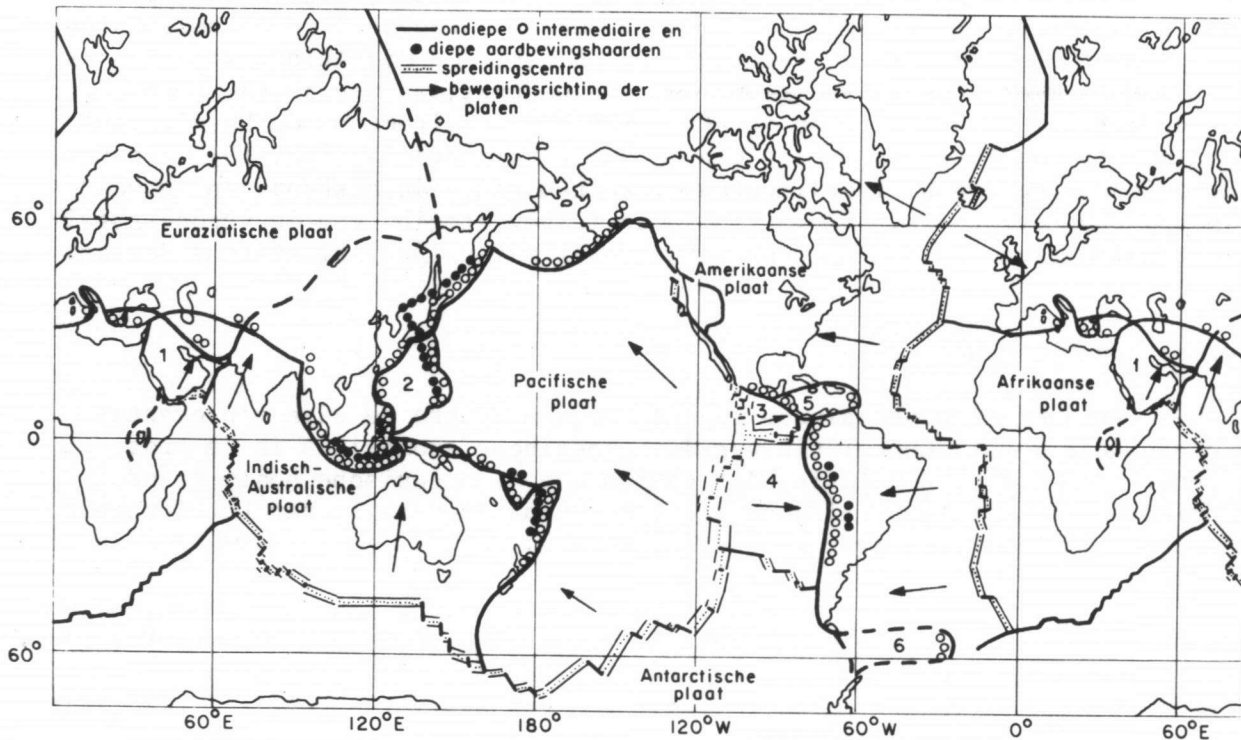
Vrijwel alle oceanische ruggen blijken centra te zijn van creatie van oceanische korst. Correlatie van de magnetische anomalieën in de grote oceanen leidde tot de conclusie, dat ca 50% van de oceanische bodem gevormd werd tijdens de laatste 65 miljoen jaar, dus vanaf het begin van het Tertiair. De oceanen zijn derhalve zeer jong (fig. 20).

De magnetische anomalieën in de oceanen, ouder dan ca 70 miljoen jaar, blijken veel moeilijker te correleren. Er zijn er trouwens ook minder. Het paleomagnetisch onderzoek van continentale gesteenten heeft aangetoond, dat er tijdens het Mesozoïcum veel minder omkeringen van het aardmagnetisch veld zijn geweest dan gedurende het Tertiair.

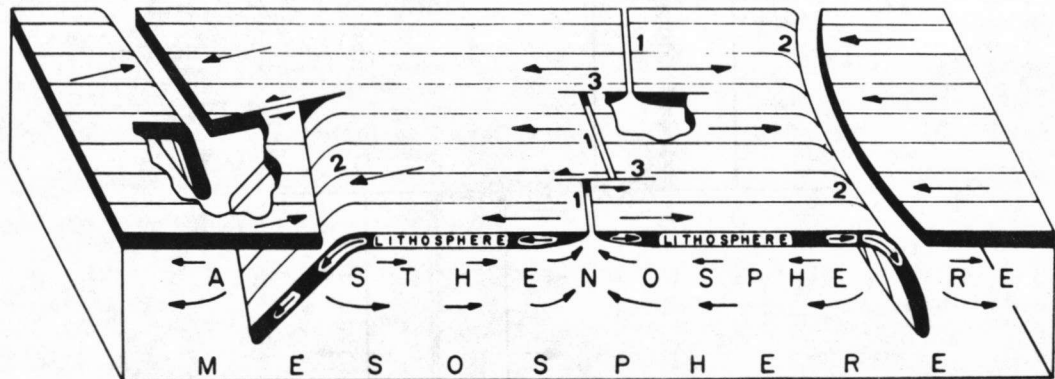
Het is onwaarschijnlijk dat er pre-mesozoïsche oceanische korstgedeelten zullen zijn. Op de tegenwoordige oceanische korst zijn geen sedimenten ouder dan Mesozoïsch gevonden.



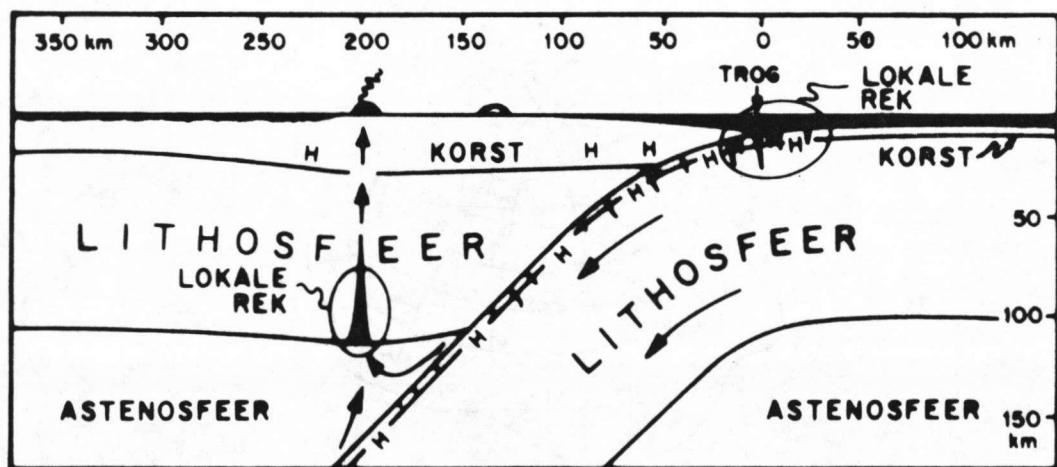
Figuur 20. Verdeling van de continentale en de oceanische korst. In schaduw is aangegeven het deel van de oceanische korst, dat sedert het begin van het Tertiair is gevormd.



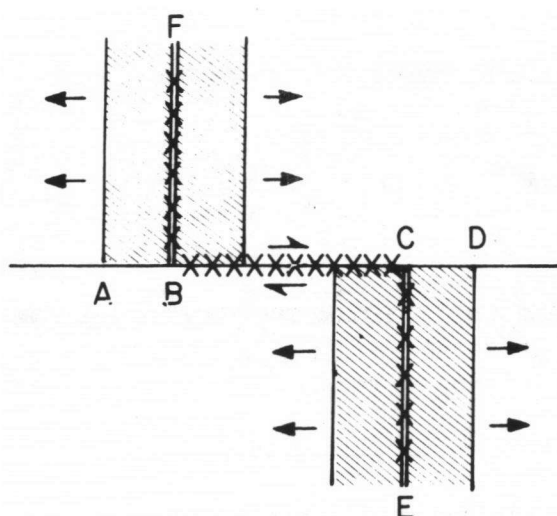
Figuur 21. Overzicht van de belangrijkste aardbevingscentra op aarde. Tevens zijn de zes grote platen aangegeven, alsmede zes kleinere, genummerd 1 t/m 6: Arabië (1); Filippijnen (2); Cocos (3); Nasca (4); Caraïbe (5), Scotia (6). Verder zijn de spreidingscentra en de belangrijkste transform faults te zien. Met pijlen wordt de richting van de beweging der platen aangeduid.



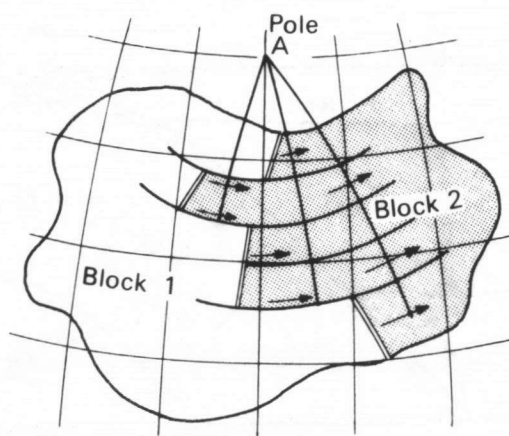
Figuur 22. Schematische blokdiagram, waarop aangegeven het ontstaan en het onderschuiven van de ca 100 km dikke oceanische plaat (lithosfeer) met Mid-Oceanische Rug (1), die verspringt volgens Transform Faults (3), alsmede Subductie Zones (2).



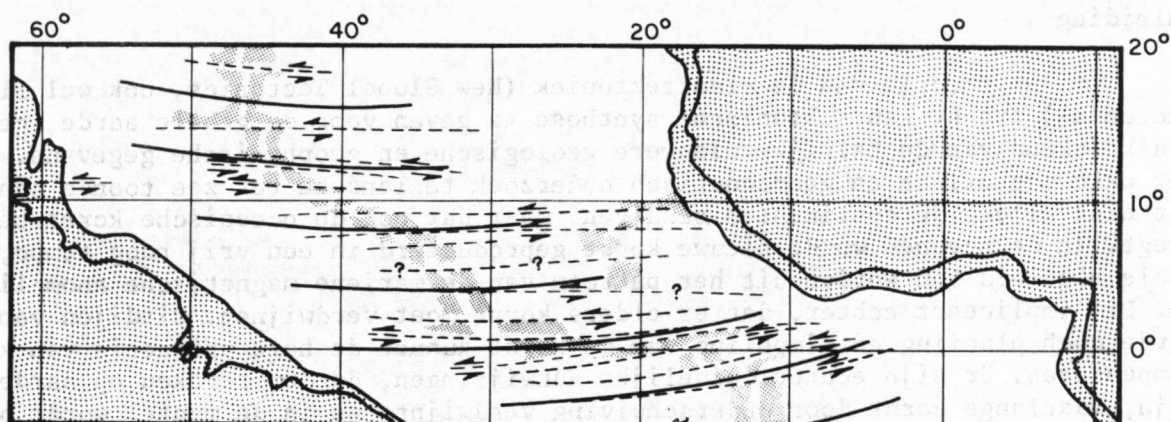
Figuur 23. Profiel van de onderschuivende oceanische plaat, met de oceanische slenk en de vulkanische boog. Aardbevingshaarden met (H) aangegeven.



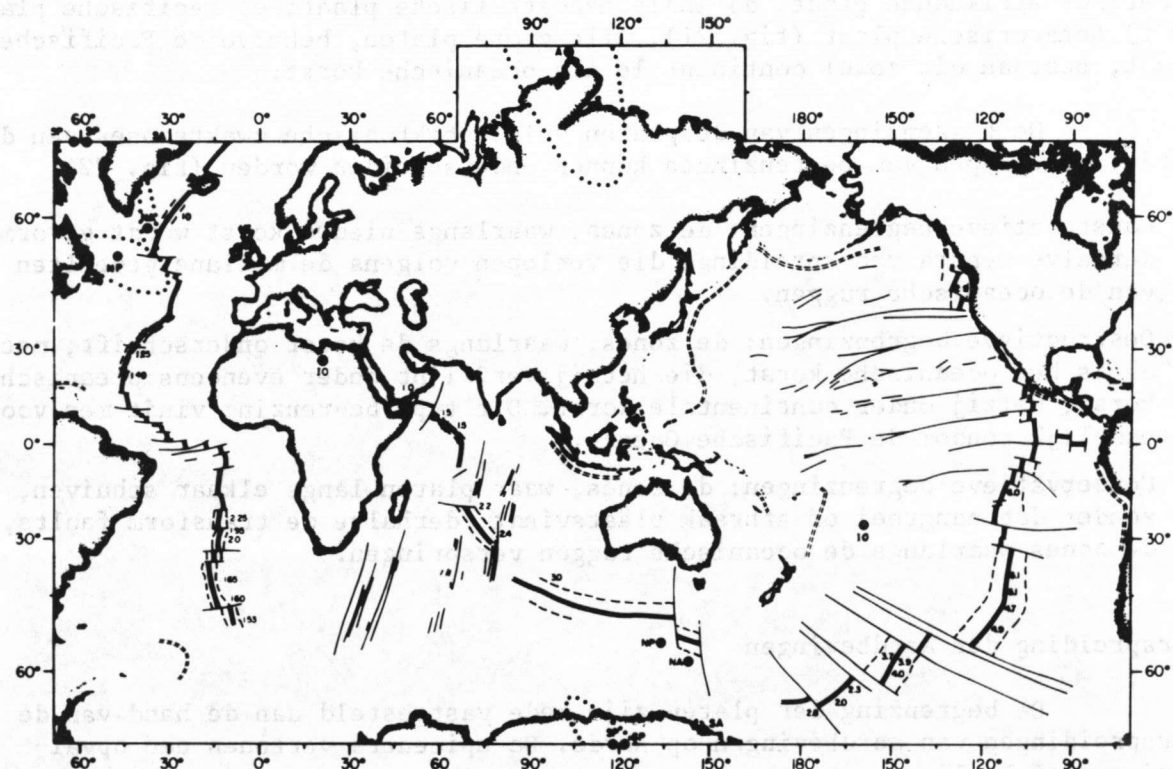
Figuur 24. De oceanische rug wordt verzet volgens een transform fault. Seismische activiteit vindt men op de rug (FB en CE) en, indien spreiding vanaf FB en CE even groot is, slechts langs een deel van de transform fault (BC).



Figuur 25. De beweging op een bol van blok 2 relatief tot blok 1 is een rotatie om pool A. "Transform faults" aan de begrenzing van beide blokken beschrijven kleincirkels om pool A.



Figuur 26. De strekking van de transform faults (gestreepte lijnen) in de equatoriale Atlantische Oceaan vergeleken met kleincirkels (volle lijnen) om de rotatiepool op 58° N.B. en 36° W.L.



Figuur 27. Kaart van de oceanische ruggen, met de snelheid van spreiding per flank in cm per jaar. Enige rotatiepolen zijn aangegeven: NA voor Noord Atlantische, SA voor Zuid Atlantische, NP voor Noord Pacifische, SP voor Zuid Pacifische gebied. IO voor de Indische Oceaan, en A voor het Arctische gebied.

PLAATTEKTONIEK

Inleiding

De theorie van de plaattektoniek (New Global Tectonics, ook wel Plate Tectonics) tracht een tektonische synthese te geven voor de gehele aarde, gebruik makend van de talrijke nieuwere geologische en geofysische gegevens. Het paleomagnetisch en geomagnetisch onderzoek te land en ter zee toonde aan, dat niet alleen de continenten schuiven, maar dat ook de oceanische korst beweegt. In de oceanen wordt nieuwe korst geproduceerd in een vrij hoog tempo, zoals afgeleid kon worden uit het patroon van de mariene magnetische anomalieën. Dit impliceert echter, dat er elders korst moet verdwijnen. Uitdijen van de aarde noch plooiing en rimpeling van de korst kunnen de hoge productie van korst compenseren. Er zijn echter duidelijke aanwijzingen, dat er stroken op aarde zijn, waarlangs korst door onderschuiving verdwijnt, en in de mantel wordt opgenomen. Deze stroken worden subductie zones of zones van Benioff genoemd.

Platen en hun begrenzingen

Volgens de plaattectonici bestaat de buitenkant van de aarde uit een zestal grote schollen of platen, alsmede een aantal van veel geringere afmetingen. De zes grote platen zijn: a) Amerikaanse plaat; b) Euraziatische plaat; c) Afrikaanse plaat; d) Indisch-Australische plaat; e) Pacifische plaat; en f) Antarctische plaat (fig. 21). Alle grote platen, behalve de Pacifische plaat, bestaan uit zowel continentale als oceanische korst.

De begrenzingen van de platen volgen tektonische zwaktezones van de aarde. Drie typen van begrenzingen kunnen onderscheiden worden (fig. 22).

- 1) Constructieve begrenzingen: de zones, waarlangs nieuwe korst wordt gevormd; derhalve centra van spreiding, die verlopen volgens de mediane gedeelten van de oceanische ruggen.
- 2) Destructieve begrenzingen: de zones, waarlangs de korst onderschuift; meestal is het oceanische korst, die hetzij verdwijnt onder eveneens oceanische korst, hetzij onder continentale korst. Dit type begrenzing vindt men voornamelijk rondom de Pacifische Oceaan.
- 3) Conservatieve begrenzingen: de zones, waar platen langs elkaar schuiven, zonder dat aangroei of afbraak plaatsvindt; derhalve de transform faults, de zones waarlangs de oceanische ruggen verspringen.

Verspreiding der aardbevingen

De begrenzing der platen zijn mede vastgesteld aan de hand van de verspreidingen van aardbevingen op aarde. De epicentra vertonen een opvallend zonaal beeld.

In de aardbevingsgordels rondom de Pacifische Oceaan komen zeer diepe haarden voor, die tot 700 km onder het maaiveld kunnen reiken. In deze gordels vindt men de ondiepere haarden steeds aan de oceaanzijde, terwijl de diepere hypocentra aan de zijde van het continent liggen. De hypocentra liggen volgens vlakken, die gemiddeld onder een hoek van 45° naar beneden en landinwaarts hel-

len. Dit zijn nu de destructieve begrenzingen van de aardplaten, de subductie zones, de zones waarlangs de oceanische korst onderschuift (fig. 23). Analyse van de eerste beweging van aardbevingen bevestigt, dat een massa onder een hoek van 45° naar beneden schuift. De onderschuivingszone wordt topografisch gekenmerkt door zeer diepe submariene troggen. Aan de landzijde van deze troggen vindt men de vulkanische bogen. De vulkanische producten hiervan zijn waarschijnlijk afkomstig van de naar beneden schuivende oceanische basaltkorst, die zich inmiddels heeft vermengd met de mariene sedimenten. Deze sedimenten lagen eerst op de oceanische korst en zijn grotendeels meegesleurd naar de diepte. De mate waarin dit gebeurt, alsmede het mechanisme ervan, zijn echter nog onvoldoende bekend.

De aardbevingen langs de beide andere typen van plaatbegrenzingen hebben haarden op maximaal enige tientallen km diepte. Analyses van de bevingen bevestigen het patroon van de bewegingen, dat op theoretische gronden werd voorspeld. Langs de constructieve begrenzingen kan men twee afzonderlijke bewegingsmechanismen onderscheiden. Het ene type geeft een horizontale rekbeweging aan loodrecht op de rug en hangt dus samen met de spreiding van de korst; het andere type duidt op steile naar beneden gerichte bewegingen, hetgeen samenhangt met de steile breuken, die de slenkvorming op de rug begeleiden. De analyse van de hypocentra langs de conservatieve begrenzingen (transform faults, waarlangs de oceanische ruggen verplaatst zijn) duidt op een horizontale translatie in richtingen, die overeenkomen met de richtingen van spreiding vanaf de oceanische rug in de afzonderlijke segmenten. Aardbevingen komen in het algemeen slechts voor langs het gedeelte van de transform fault, dat het verzet van de spreidingscentra aangeeft (fig. 24). Indien twee opeenvolgende spreidingscentra een verschil in snelheid van spreiding hebben, zullen wel aardbevingen elders langs de transform faults kunnen voorkomen; de segmenten schuiven dan met ongelijke snelheden zijwaarts.

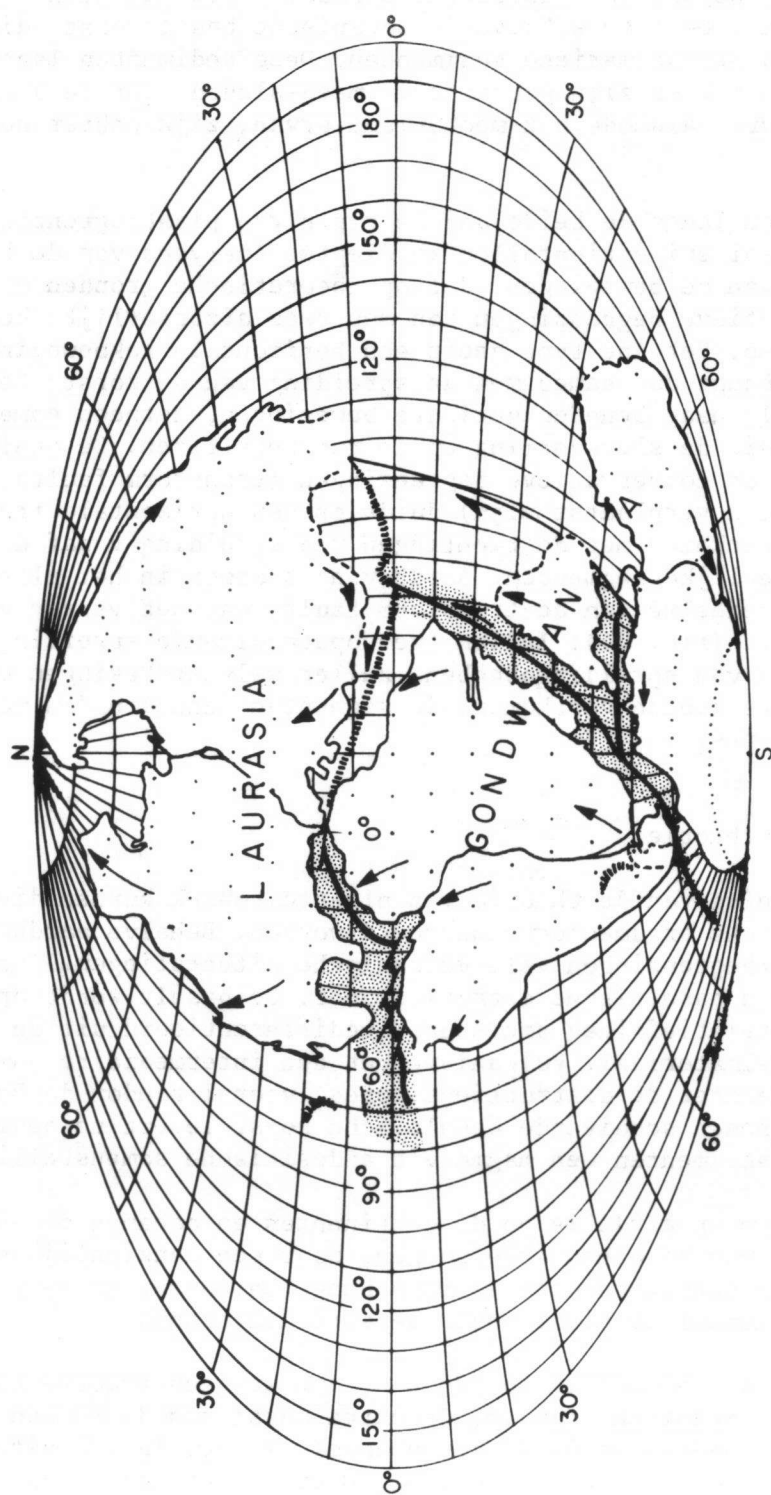
Argumenten voor de plaattheorie

Ter ondersteuning van de theorie van plaattektoniek kunnen diverse geologische en geofysische argumenten aangevoerd worden. Behalve aardbevingen vindt men langs de plaatbegrenzingen vele vulkanische uitbarstingen. Aan de constructieve zones komen basaltische extrusies voor. De basalt wordt opgevat als de fractie met een relatief laag smeltpunt, gedifferentieerd uit de pyroliet, het primaire mantelmateriaal. Vulkanisme met een intermediaire samenstelling wordt aangetroffen achter de destructieve zones, vooral rondom de Pacificse Oceaan. De naar beneden schuivende basaltische korst levert na opsmelting en vermenging met o.a. sedimenten een magma van andesitische samenstelling.

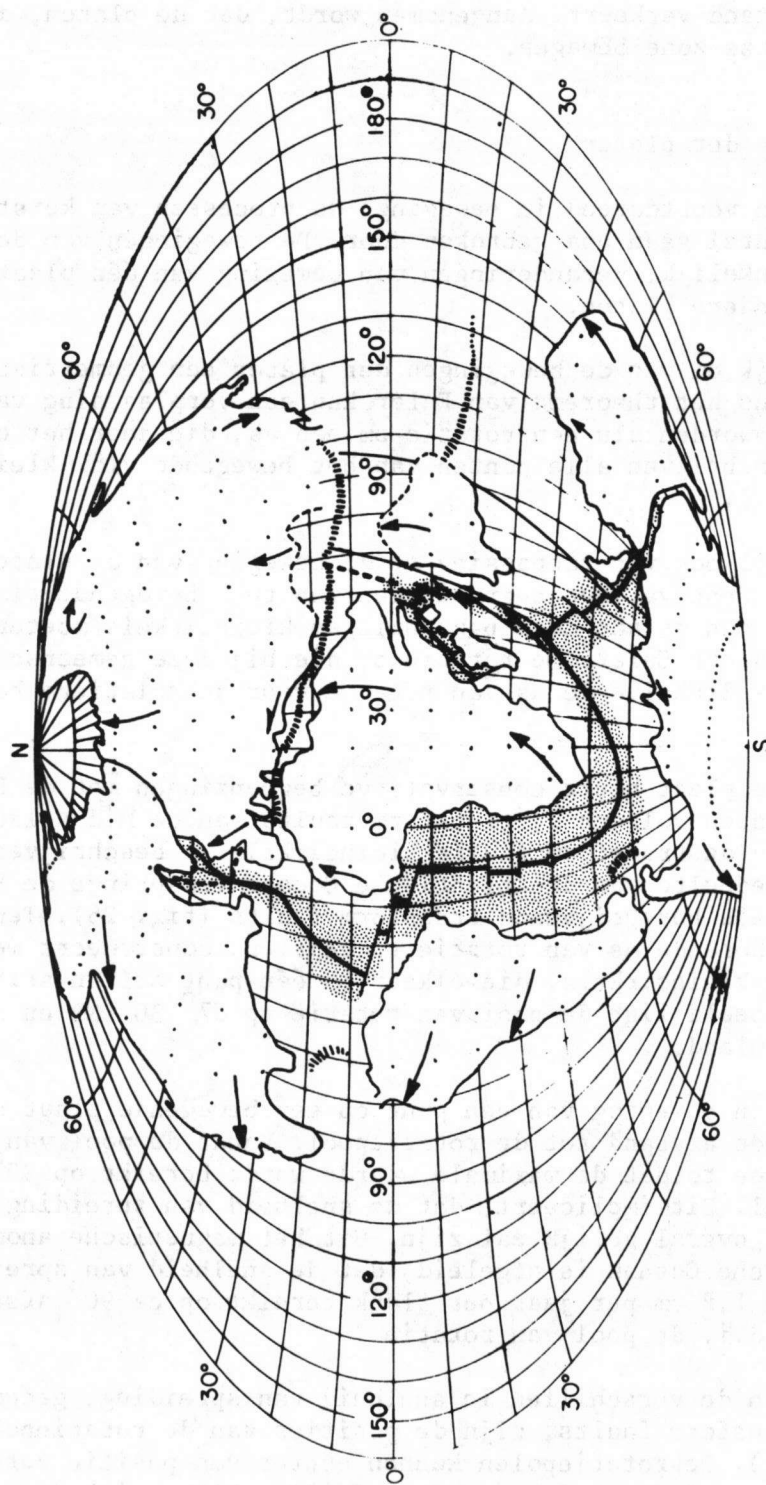
De warmtestroom op aarde is op de continenten en oceanen ongeveer gelijk met uitzondering van de oceanische ruggen, waar een aanzienlijk hogere warmteproductie is. Deze verhoogde warmtestroom hangt samen met de verticaal opwaartse beweging van mantelmateriaal onder de spreidingszones.

Het gravimetrisch onderzoek toonde aan, dat er geen zwaartekrachtsafwijkingen zijn bij de oceanische ruggen; de extra massa van de ruggen wordt gecompenseerd door het massatekort in de bovenmantel als gevolg van uitzetting en differentiatie van het opstijgende materiaal. Over de troggen, waar de korst onderschuift, is een aanzienlijk zwaartekrachtstekort.

Seismiek onderzoek heeft een antwoord kunnen geven op de vraag omtrent



Figuur 28. De positie van de continenten aan het einde van de Trias, 180 miljoen jaar geleden. Gestippelde gedeelten in de oceanen geven aan de korst, die gevormd werd tussen 225 miljoen jaar (einde Perm) en 180 miljoen jaar geleden.



Figuur 29. De positie van de continenten aan het einde van het Krijt, ca 65 miljoen jaar geleden. Gestippelde gedeelten in de oceanen geeft aan de korst die gevormd werd tussen 135 miljoen jaar (einde Jura) en 65 miljoen jaar geleden.

de dikte van de bewegende platen. De oceanische korst is merendeels niet dikker dan 5 à 6 km. In de bovenmantel is een zone aangetoond met lagere seismische snelheden dan men zou verwachten op grond van de aldaar heersende druk. Deze zone, de "Seismic Low Velocity Zone", ligt op een diepte tussen 80 en 150 km en wordt onder alle oceanen aangetroffen. Het is een mechanisch zwakke, waarschijnlijk zeer hete zone, waar het mantelmateriaal nabij het smeltpunt is of reeds in gesmolten toestand verkeert. Aangenomen wordt, dat de platen, die ca 100 km dik zijn, over deze zone bewegen.

Geometrie en de beweging der platen

De platen zijn voortdurend in beweging; de processen van korstvorming en korstopname in de mantel gaan onafgebroken door. De bewegingen van de platen zijn onderling afhankelijk; veranderingen van beweging van één plaat heeft consequenties voor de andere platen.

Het is mogelijk om van de bewegingen der platen een geometrische analyse te maken. Volgens het theorema van Euler kan een verplaatsing van een vlak op een bol opgevat worden als een rotatie om een as, die door het centrum van de bol gaat; dus beschrijven alle punten van het bewegende vlak kleincirkels om de rotatieas (fig. 25).

Dit beginsel is ook van toepassing op de beweging van de platen van de aarde. Neemt men de conservatieve begrenzingen van twee bewegende platen in beschouwing, dan zullen punten aan deze begrenzingen kleincirkels moeten beschrijven volgens het theorema van Euler. De rotatieas, die bij deze gemeenschappelijke kleincirkels behoort, is derhalve de as van rotatie voor de relatieve bewegingen van beide platen.

De Amerikaanse plaat heeft conservatieve begrenzingen met de Euraziatische en Afrikaanse platen volgens de transform faults aan de Mid-Atlantische Rug. Bij analyse blijken de transform faults kleincirkels te beschrijven. Vooral in het equatoriale gedeelte van de Atlantische Oceaan verspringt de Rug vele malen volgens kleincirkels beschrijvende transform faults (fig. 26). Teneinde de positie van de bijbehorende as van rotatie te bepalen, construeert men grootcirkels loodrecht op de kleincirkels, die elkaar in één punt zullen snijden. In het onderhavige voorbeeld ligt de pool van rotatie op $57^{\circ} 30'$ NB en $36^{\circ} 30'$ WL, derhalve nabij Groenland.

De snelheid van beweging van een punt op een bewegende plaat op een bol is afhankelijk van de afstand tot de rotatiepool. Vanaf de pool van rotatie neemt de snelheid toe totdat de maximale waarde wordt bereikt op 90° afstand van de rotatiepool. Dit impliceert, dat de snelheid van spreiding langs een oceanische rug niet overal gelijk zal zijn. Uit het magnetische anomalieënpatroon van de Atlantische Oceaan is afgeleid, dat de snelheid van spreiding een maximale waarde van 1,8 cm per jaar per flank bereikt op ca 90° afstand van de spreidingspool, d.i. de pool van rotatie.

Met behulp van de verschillen in snelheid van spreiding, gecombineerd met het verloop van transform faults, zijn de posities van de rotatiepolen der platen bepaald (fig. 27). De rotatiepolen kunnen echter van positie veranderen. De richting van spreiding, dus ook de transform faults zullen zich dan aanpassen aan de nieuwe situatie. Het voorkomen van een draaiing in het mariene magnetische anomalieënpatroon duidt erop, dat een positieverandering van de rotatiepool heeft plaatsgevonden.

SLOTBESCHOUWING

De moderne geotektoniek geeft een inzicht in de onderlinge relaties van de grote structurele elementen van onze aarde. De geologische, geomorfologische en geofysische gegevens blijken te passen in het concept van de plaattektoniek. Tevens blijkt het mogelijk de structurele ontwikkeling van de aarde tamelijk nauwkeurig te volgen vanaf het einde van het Paleozoicum.

Ten tijde van het Perm wordt vrij algemeen het bestaan van één supercontinent, Pangea, aangenomen (fig. 13), in plaats van een afzonderlijk noordelijk en zuidelijk continent, die dan respectievelijk Laurasia en Gondwanaland worden genoemd. De scheiding tussen de beide supereenheden is evenwel reeds tot stand gekomen tijdens de Trias. In deze periode raakt Laurasia los van Afrika en Zuid-Amerika, terwijl Gondwanaland zich afsplitst in een westelijk deel met Afrika en Zuid-Amerika en een oostelijk deel met de overige continenten. Vermoedelijk heeft India zich reeds los gemaakt van Antarctica (fig. 28). In de Jura gaat het zuidelijke deel van de Atlantische Oceaan open; een schuifzone in het toekomstige noordelijk deel markeert de begrenzing van Eurazië en Noord-Amerika. Tegen het einde van de Jura beginnen Afrika en Zuid-Amerika los te raken, hetgeen gepaard gaat met reusachtige basaltuitvloeiingen. De zuidelijke Atlantische Oceaan heeft tegen het einde van het Krijt reeds een breedte van ca 3000 km; de spreiding in het noordelijker deel begint nu ook. Afrika schuift wat naar het noorden, evenals India. Australië raakt los van Antarctica (fig. 29). Aan het begin van het Tertiair is het oorspronkelijke Pangea geheel uiteengevallen in afzonderlijke continenten. De continenten schuiven verder, nieuwe oceanische korst wordt gevormd (fig. 20), hetgeen leidt tot de huidige configuratie van continenten en oceanen.

ENIGE LITERATUUR

- Dietz, R. S. & J. C. Holden, 1970. Reconstructions of Pangea. - Journ. of Geophys. Research, 75: 4839-4856.
- Gass, I. G., P. J. Smith & R. C. L. Wilson, 1971. Understanding the Earth: A reader in the Earth Sciences. Sussex (The Artemis Press).
- Hallam, A., 1973. A revolution in Earth Sciences: from continental drift to plate tectonics. London (Oxford University Press).
- Isacks, B., J. Oliver & L. R. Sykes, 1968. Seismology and New Global Tectonics. - Journ. of Geophys. Research, 73: 5855-5899.
- Le Pichon, X., 1968. Sea-Floor Spreading and Continental Drift. - Journ. of Geophys. Research, 73: 3661-3697.
- McElhinny, M. W., 1973. Paleomagnetism and Plate Tectonics. Cambridge (University Press).
- Scientific American, september issue, 1969. Several papers.
- Wegener, A., 1929. The Origin of Continents and Oceans. 4th ed. Methuen.
- Wilson, J. Tuzo, 1972. Continents Adrift: Readings from Scientific American. San Francisco (Freeman).