

GEOFYSICA

OVER VANEENSCHUIVENDE OCEAANBODEMS EN DRIJVENDE KONTINENTEN

door J. Stemvers - van Bommel

Geen enkel terrein dat door de aardwetenschappen bestreken wordt, heeft op het ogenblik zo'n grote belangstelling als dat van de uiteenwijkende oceaانبodem (spreading ocean floor) en de ermee samengaande verschuiving van de vastelanden (continental drift).

Al is de even veel omvattende als veel verklarende hypothese van de vaneenschuivende oceaانبodems en drijvende continenten nog geen gekonsolideerde wetenschap, toch geven de resultaten van de onderzoeken een min of meer afgerond beeld te zien, zodat er al een voorlopig overzicht mogelijk is van wat over deze fascinerende aspecten van het aardse gebeuren bekend geworden is.

Al sinds eeuwen, al sinds de tijd, dat goede kaarten van de oostelijke en westelijke kustlijnen van de Atlantische Oceaan voorhanden waren, heeft men zich verwonderd over de overeenkomst in het profiel van de oostkust van Zuid-Amerika en de westkust van Afrika. Ook Wegener, die in 1915 zijn bekende hypothese van de drijvende vastelanden lanceerde, baseerde zich voor een deel op deze merkwaardig goede pasvorm en verder onder meer op de overeenkomst van bepaalde oude fossielen op Zuid-Amerika en Afrika, wat op een vroegere samenhang zou wijzen. De tijd van scheiding van deze twee continenten zou zijn begrensd door de jongste overeenkomende fossielen. Het Pangea, het "oerkontinent" van Wegener omspande overigens niet alleen de genoemde continenten, maar vrijwel alle vastelanden. Wegener was niet in staat, de geofysici van zijn tijd te overtuigen, in de eerste plaats omdat het mechanisme dat de kracht moet leveren voor het op gang brengen en in stand houden van de bewegingen niet afdoende verklaard kon worden.

DE HYPOTHESE EN DE TOEPASSINGEN ERVAN

In 1957-'58 werden tijdens het Internationaal Geofysisch Jaar de onderzoeken op allerlei geofysische gebieden gekoördineerd. Sinds 1962 bestaat het, eveneens internationaal opgezette, Upper Mantle Project.

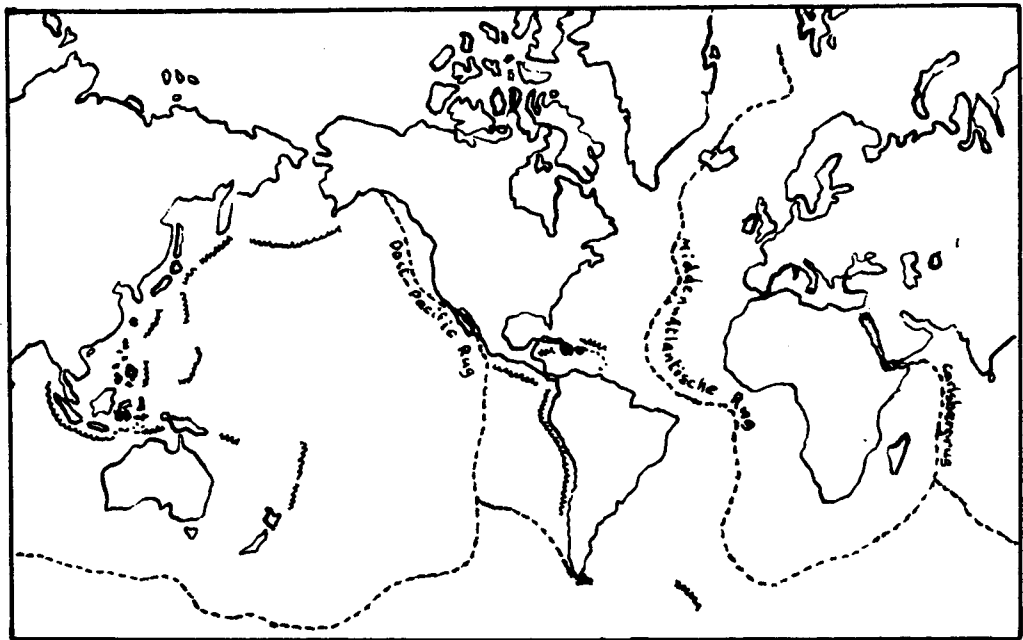
Door de uitgevoerde boringen, monsternemingen en vooral kartering van de oceaانبodem zijn een menigte gegevens bekend geworden over aardbevingen, gebergtevorming, diepzeetopografie en geochronologie. Hieruit konkludeerden Hess en Dietz al in 1960-'61, dat er nieuwe oceaانبodem gevormd wordt bij de ruggen van oceanen.

Deze ruggen zijn systematisch gevormde opwelvingen in het bodemprofiel van de oceanen en strekken zich over eindeloze afstanden over de zeebodem uit. Zij vertakken zich soms en gaan hier en daar in elkaar over, zodat door deze "midden-oceanische ruggen" een wereld-omspannend patroon gevormd wordt (zie afbeelding 1). De ruggen zijn vulkanisch van oorsprong. De topografische doorsnee van een rug lijkt op de doorsnee van een vulkaan, met min of meer symmetrische flanken en een centrale krater. De as van de rug kan gezien worden als een min of meer continue krater, waaruit mantelmateriaal als plateau-bazalt uit de aarde opwelt en uitvloeit. Het vulkanische gesteente is in veel onderzochte monsters een tholeiïet. Dit is een oververzadigde, olivijnarme, fijnkorrelige bazalt met doorgaans glasachtige componenten. Volgens de theorie van zijn ontstaan wordt oceanische tholeiïet gevormd door partiële opsmelting op betrekkelijk geringe diepte (\pm 30 km) van snel opstijgend mantelmateriaal.

De uitstromende lava spreidt zich aan weerszijden van de rugas uit en vormt zo nieuwe aardkorst. Dit proces heeft zich al vele miljoenen jaren afgespeeld en deed dit, vermoedelijk met onderbrekingen, gedurende een groot deel van de aardgeschiedenis.

Volgens de hypothese is het opstijgen van mantelmateriaal het resultaat van langzame

Afb. 1 - De midden-oceanische ruggen omspannen de aarde (streepjeslijn). De slingerlijntjes duiden de plaats van de troggen aan.

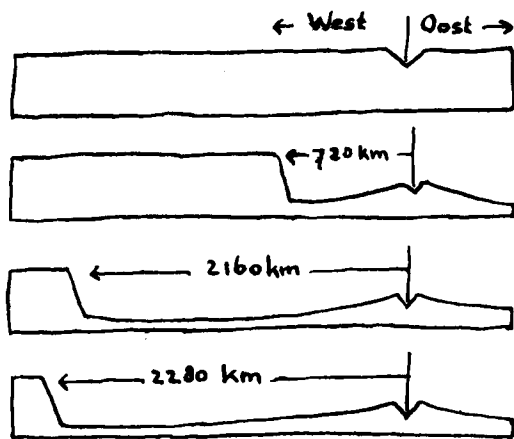


konvektiestromen in de buitenmantel. De oceanische rug bevindt zich boven een opgaande stroming van een konvectiecel en de nieuwgevormde korst schuift ter weerszijden van de rugas uit elkaar. De oceanische korst is dus een expressie aan het aardoppervlak van de buitenmantel en wordt beschouwd uit de buitenmantel te zijn ontstaan. Dit houdt in, dat in vroegere tijden uitgestroomd materiaal verder van de rug af ligt dan later gevormde korst. Inderdaad is door middel van absolute ouderdomsbepalingen bewezen, dat gesteenten ouder zijn naarmate ze verder van de rug verwijderd voorkomen. De afstand van de rug is behalve van de tijdsduur dat geschoven is ook afhankelijk van de hoeveelheid uitgestroomde lava. De bewegingen zijn aangetoond op alle onderzochte midden-oceanische rugdelen. De snelheden lopen enigszins uiteen en bedragen bijv. voor de noordelijke Atlantische Oceaan 1 cm per jaar aan weerszijden van de rugas, elders in deze oceaan geldt een snelheid van 1 - 2 cm/j, voor de Carlsberg-rug in de Indische Oceaan is deze 2cm/j, voor de Oost-Pacifische-rug 4 tot 5 cm/j. Voor een bepaald deel van de Midden-Atlantische Rug komt dit neer op 120 km in de laatste 10 miljoen jaar.

De bewegingen schijnen niet altijd even snel geweest te zijn en zelfs lange tijden gestagneerd te hebben. Volgens Vening Meinesz beweegt de konvectie zich intermitterend. In de periode van 20 - 10 miljoen jaar geleden kon voor de Midden-Atlantische Rug geen beweging worden aangetoond, daarvoor schijnen de aardkorstdelen ter weerszijden van deze rug weer grote afstanden te hebben afgelegd. Het totaal van het afgelegde traject aan beide zijden van de Midden-Atlantische Rug is: de afstand van de Amerika's enerzijds tot Europa en Afrika anderzijds.

De konsekwentie van het vaneenwijken van de oceanabodem bij de M.A.-Rug is namelijk het uiteendrijven van deze continenten naar hun huidige plaats op de aardbol en naar wie weet welke toekomstige. Hetzelfde geldt voor de overige continenten, die elk, blijkens de hen scheidende midden-oceanische ruggen, op hun wijze van elkaar zijn verwijderd. Hoe men zich dit voor N-Amerika en Europa wel voorstelt, vertoont afb. 2.

Terugrekenend en -schuivend, komt men als vanzelfsprekend tot een toestand voor de continenten, waarbij deze zoal niet met elkaar verbonden, dan toch door vrij nauwe zeeën gescheiden waren. De oplossing van de vraag hoe in dit "oercontinent" de stukken van de legpuzzel zullen hebben gelegen, is een tijdverdrijf, waarmee de wetenschap zich nog ijverig bezighoudt. Allerlei nog onbekende factoren vervagen het beeld van de oorspronkelijke landkaart. Bullard e.a. hebben met redelijk succes de Atlantische kustlijnen gekombineerd (zie afb. 3), op basis van de 900 m-contourlijnen van de omringende vastelanden. Mede op grond van de ouderdom van de jongste overeenkomstige fossielen in Z-Amerika en Afrika neemt wel aan, dat deze continenten nog in het Paleozoicum aaneensloten en



begin van drift in het vroege Perm, 250 milj. j.

vroege Jura, 190 miljoen jaar

toestand bij begin van hiaat, Laat Krijt (70 milj. jaar) tot Boven Mioceen (10 miljoen jaar)

tegenwoordige positie

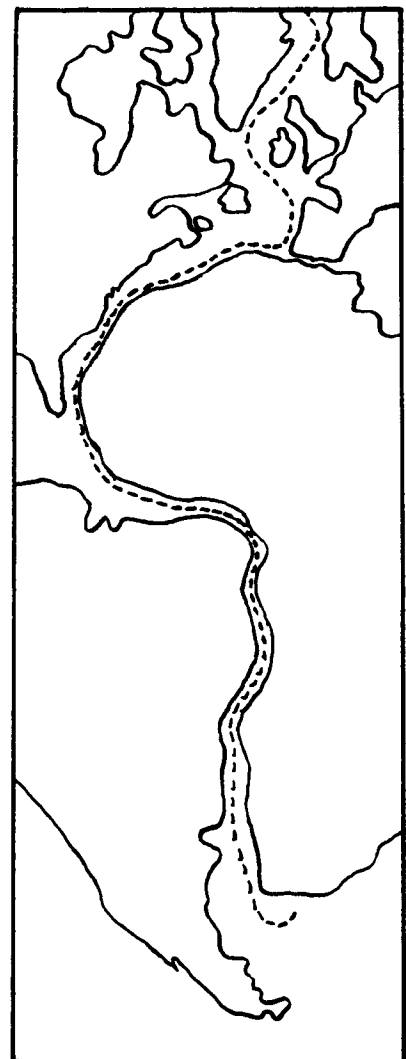
Afb. 2 Veronderstelde chronologie van de westwaartse drift van het N-Amerikaanse kontinent. Gemiddelde snelheid 1,2 cm/j. (naar H. Palmer).

in het Mesozoïcum (sinds zo'n 150 miljoen jaar) vaneen zijn gaan drijven. Voor andere continenten gelden mogelijk andere tijden van afsplitsing. Zo zou het Arabisch schiereiland ongeveer 25 miljoen jaar geleden zich van Afrika hebben afgescheiden, de Rode Zee is een "jonge oceaan", wat uit zijn bodemgesteente is gebleken. Over de vraag, of de continenten vóór hun Mesozoïsche en Cenozoïsche drift continu één geheel hebben gevormd, kan men zich, door gebrek aan gegevens met voldoende exactheid, nog niet erg het hoofd breken. Hebben er zich meer perioden van ontbinding en aaneensluiting voorgedaan? Paleomagnetische metingen zouden in die richting kunnen wijzen. Maar het paleomagnetisme is zelf een wetenschap, waarin de ongewisse factoren misschien nog niet alle bekend, laat staan ingekalkuleerd zijn.

Dat er op de plaatsen van de midden-oceanische ruggen nieuwe korst gevormd wordt, werd een allengs duidelijker zaak. Maar dan moet er ook ergens aardoppervlak verdwijnen, want vergroting van oppervlak op de schaal van de uiteenwijkende oceanobodems is er niet.

Gebergtevorming, die beschouwd wordt als een verkorting van het continentoppervlak, is niet voldoende om de toename van oceanische korst te elimineren.

Verondersteld wordt, dat er aardoppervlak "verdwijnt" in o.m. de troggen van de oceanen. Volgens deze gedachtegang wordt een blok oppervlaktematerie, misschien 50-100 km dik, in en onder een trog geschoven tot een diepte van 600-700 km. Op deze diepte komen de diepste aardbevingen voor, bijv. bij de Tonga-Fiji Trog, t.N van Nieuw-Zeeland in de Pacific, (zie afb. 1 en 4). Het is dan ook langs seismische weg, dat men dit deel van de hypothese wil bewijzen. Als voor de andere troggen van de wereld deze interpretatie eveneens toepasselijk is, zou het aannemelijk zijn, dat de opgewelde, nieuwe korst zijn afzinkende tegenhanger heeft in de troggen rondom de Pacific. Rondom de Atlantische Oceaan worden geen troggen gevonden en afzinking komt daar niet voor. Het is voor het behoud van oppervlak blijkbaar niet noodzakelijk, dat opwellingen en afzinkingen elkaar beurtelings afwisselen. De ruggen kunnen dus ten opzichte van elkaar



Afb. 3 Geometrische aaneensluiting rond de Atlantische Oceaan (n. Bullard e.a.)

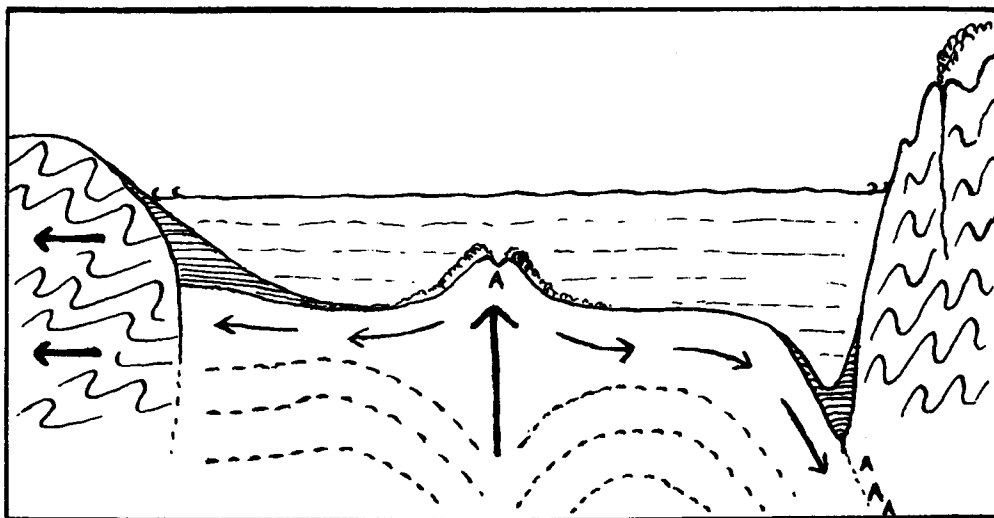
bewegen. Wordt er korst gevormd in de oceanische ruggen en verdwijnt deze in de troggen, dan kan men het tussenliggende gebied opvatten als een reusachtige aardchol, die ook zijdelings beweegt t.o.v. ernaast liggende schollen.

Het schijnt, dat de aarde bedekt is met een betrekkelijk klein aantal schollen, die alle tegen elkaar aanduwen op een gekompliceerde manier. De kanten van de schollen worden geschetst door het voorkomen van aardbevingen. Een kaart van epicentra zou als een kaart voor de beweging van schollen kunnen dienen.

Bij de verplaatsing van de schollen zijn er drie soorten beweging te onderscheiden, die elk samengaan met bepaalde aardbevingsverschijnselen:

1. daar, waar de schol begrensd wordt door de oceanische rug waaruit hij is ontstaan, komen aardbevingen voort door de rekbreuk van de korst op de ruggen;
2. waar de oppervlakteschollen in de mantel geschoven worden, dus bij de troggen, komen aardbevingen met een diepe haard voor, in de orde van 700 km. Behalve in zeldzame uitzonderingen zijn aardbevingen met zulk een diepe haard inderdaad steeds geassocieerd met troggen;
3. een schol wordt zijwaarts door andere schollen begrensd. Ten opzichte van deze buurschollen bestaat veelal een horizontale, schuivende beweging langs uitgebreide breukzones. Ook bij deze breukzones treden aardbevingen op.

Het is duidelijk, waarom er sterke aardbevingsactiviteit voorkomt aan de randen van de Pacific en niet rond de Atlantische Oceaan. De Atlantische kusten zijn geen kanten van een schol. De schol, die bij de Midden-Atlantische Rug oprijst en westwaarts gaat, omvat geheel Noord-Amerika en strekt zich uit tot de Pacifische oostkust. De troggen rond de Pacific zijn voorbeelden van de contactplaatsen van continentale en oceanische schollen. Bij de Tonga-trog schijnen twee oceanische schollen te botsen. Noord-India kan onder het Aziatische continent geschoven zijn, wat de aanzienlijke hoogte van Tibet zou verklaren, waar de aardkorst tweemaal zo dik is als het continentale gemiddelde. De diepe Ganges-trog kan de zone zijn, waar de onderschuiving plaats vond.



Afb. 4.

Schematische voorstelling van het wegrijven van een vasteland door uitschuivende oceaniebodem (links). Rechts: een oppervlakteschol wordt onder een trog geschoven. Diepe aardbevingen komen voor onder de troggen. Met deze diepe epicentra gaat vaak vulkanisme gepaard. Bij de oceanerug: ondiepe aardbevingen.

De hypothese van vaneenschuivende oceaniebodems en drijvende vastelands kan inderdaad veel verklaren. Eerlijkheidshalve moet gezegd worden, dat de feiten niet zo eenvoudig liggen als ze hier gesteld zijn. De loop van de Midden-Atlantische Rug over de oceaniebodem is wel in zijn geheel genomen een continue vulkanische keten, maar in detail bezien blijkt hij op vele punten onderbroken te zijn en zijdelings over aanzienlijke afstand verschoven. Bij andere oceanische ruggen is hetzelfde opgemerkt. De schollen blij-

ken ook niet geheel evenwijdig uit elkaar te schuiven, maar zich in verscheidene gevallen om een bepaald rotatiecentrum te bewegen. Voor Noord-Amerika geldt een rotatie van 28° met als spil de omgeving van de Nieuw-Siberische eilanden bij Alaska in de Noordzee. Ook Zuid-Amerika zal wel via een rotatiebeweging van het oerkontinent weggedreven zijn. Mogelijk hangt de rotatiebeweging samen met een ongelijke snelheid vanaf de rug in verschillende zones van de meridiaan. In de Atlantische Oceaan kunnen als gevolg van de rotatiebeweging vier segmentparen onderscheiden worden: tussen Groenland en Noorwegen, tussen Canada en West-Europa, tussen de Verenigde Staten en Noord-Afrika en tussen Zuid-Amerika en Midden- en Zuid-Afrika. Deze vier segmenten worden gescheiden door overdwarse, wigvormige zones, over de hele Atlantische breedte. In deze transversale zones is geen samenhang gevonden met de Midden-Atlantische Rug.

De onderzoekingen van de "spreading ocean floor"-hypothese worden voor het grootste deel uitgevoerd door geleerden, verbonden aan Noordamerikaanse instituten. Behalve naar (het Amerikaanse deel van) de Atlantische Oceaan gaat een groot deel van hun aandacht uit naar de veelbewogen Pacifische zijde van hun kontinent. Daarstrekt zich, ruwweg van Alaska naar Antarctica, de East Pacific Rise over de oceaانبodem uit. Bij Noord-Amerika loopt deze vrij dicht langs de kust, bij Californië (San Fransisco - Los Angeles naar de Baai van Californië) gaat hij zelfs onder het vasteland door en is daar als de San Andreas-Breuk verantwoordelijk voor verschuivingen van ongeveer 5 cm per jaar. Deze verschuivingen veroorzaken spanningen in de bodem die, als het maximale punt van gesteente-elasticiteit is bereikt, resulteren in aardbevingen, zoals in 1906 op catastrofale wijze gebeurd is.

BEWIJSVOERING EN ONDERSTEUNENDE ARGUMENTEN

Het is moeilijk een direkt bewijs voor de vaneenwijkende oceaانبodems te geven, waar de ruggen op een gemiddelde diepte van 2000 - 3000 m onder de zeespiegel liggen. Maar er zijn resultaten van verscheidene onderzoekingen die de hypothese zomet bewijzen, dan toch steun en houvast geven. Enkele van deze richtingen van onderzoek zijn:

1. Absolute datering van oceaانبodem-gesteenten, afkomstig van verschillende afstanden t.o.v. de rug, om de hypothese rechtstreeks te testen.
2. Zeebodemprofilering door middel van ondergrondse reflectiepeiling, waardoor de horizonten van sedimentlagen kunnen worden opgespoord.
3. De bepaling van de magnetische polariteit. Magnetische anomalieën verschaffen de meest waardevolle gegevens ter ondersteuning van de hypothese.
4. Paleomagnetisme.
5. Biologische waarnemingen.

1. Datering van gesteenten

Voor het bewijs van het vaneenwijken van de oceaانبodem dient men te beschikken over de absolute ouderdomsbepalingen van bodemgesteenten, genomen op verschillende afstanden van de oeaanrug. Voor de datering gebruikt men o.a. de kalium/argon-methode. Bevat een gesteente na zijn kristallisatie radio-actief Kalium (K^{40}), dan zal een deel ervan vervallen tot radio-actief argon (A^{40}). Men gaat ervan uit, dat ten tijde van de consolidatie van het gesteente al het radio-actieve argon, dat gasvormig is, ontsnapt is. De halveringstijd (de tijd waarna 11% van de K^{40} -atomen tot A^{40} -atomen zijn vervallen) bedraagt 11.850.000 jaar - de overige 89% vervalt tot calcium⁴⁰, maar deze isotoop heeft door zijn algemeen voorkomen geen waarde voor de ouderdomsbepaling. Uit de verhouding A^{40} - nog aanwezig K^{40} is wel de tijd van kristallisatie te berekenen.

Een andere dateringsmethode is die door middel van "fission track", die veel bij glasachtige gesteenten wordt toegepast. Bij deze datering door "spleet-sporen" maakt men gebruik van de spontane splijting van uranium²³⁸-atomen, die na de afkoeling in glas, bijv. obsidiaan, of in de glasachtige componenten van lava zijn ingesloten. Deze splijting vindt plaats met een konstante, bekende snelheid. De nucleaire fragmenten laten sporen van hun splijting na die, mits het gesteente niet boven een kritische temperatuur wordt verhit, altijd aanwezig blijven en kunnen worden geteld. De verhouding tot het aantal nog

aanwezige U^{238} -atomen en daarmee de verlopen tijdsduur, kan dan worden berekend. Een combinatie van kalium/argon- en splijtspoor-dateringen heeft bij de Midden-Atlantische Rug op 45° N, (dat wel het grondigst onderzochte gedeelte van deze rug is) het gezochte resultaat opgeleverd: hoe verder de monsters van de rug verwijderd lagen, hoe ouder zij bleken te zijn.

In dit verband moeten nog de boringen vermeld worden, die op grote schaal worden uitgevoerd volgens de JOIDES-programma's. Deze "Joint Oceanographic Institution's Deep Earth Sampling" is de meer bezonken opvolger van het vrij onstuimige Mohole-project, dat ondanks groot enthousiasme uiteindelijk een fiasko werd. Het door JOIDES uitgeruste schip kan monsters van 750 m boren en naar boven brengen van gesteenten, die $6\frac{1}{2}$ km onder de zeespiegel liggen. Het werkterrein is de Golf van Mexico, de Atlantische Oceaan en de Pacific.

2. Profilering van de zeebodem

Afgezien van de omgeving van vulkanische oceaandruggen en andere onderzeese vulkanen bestaat de oceaانبodem voornamelijk uit afzettingsgesteenten. De ouderdom van deze sedimenten en de dikte van het pakket geven indicaties over de geschiedenis van de oceaانبodem. Het is duidelijk, dat in de omgeving van de ruggen geen of weinig sediment zal worden gevonden. Hoe verder ervan verwijderd, hoe dikker, want hoe ouder het pakket afzettingsprodukten zal zijn. Door middel van ondergrondse reflectie-peiling kan de dikte van de sedimentlagen worden bepaald. Deze blijken inderdaad dikker te worden naarmate ze verder van de rug af liggen. Maar in bepaalde onderzochte gebieden is op ca. 140 km afstand van de Midden-Atlantische Rug een abrupte toename van de sedimentdikte gevonden. De absolute ouderdom op deze afstand bleek 10 miljoen jaar te zijn, wat overeenkomt met een schuifsnelheid van $1,4$ cm/j. Hetzelfde verschijnsel van sedimentverdikking werd aangetroffen op andere trajecten langs de rug, waaruit men afleidt dat er vóór de laatste 10 miljoen jaar een rustperiode in het vaneenschuiven is geweest.

Niet alleen worden de sedimentlagen verder van de rug af steeds dikker, maar de onderste lagen - die het eerst werden afgezet - moeten ook een steeds hogere ouderdom hebben, naarmate zij verder van de rug af voorkomen. De bepaling van de ouderdom kan hier met behulp van gidsfossielen gebeuren. (Door de beperkte tijd van voorkomen van bepaalde diersoorten en de kennis van de tijdsduur waarin ze geleefd hebben, ligt de tijd waarin het omringende gesteente werd afgezet, vast).

Het sediment uit een bepaalde periode kan zich onderscheiden van een vroeger en later afgezet pakket, dat er respectievelijk onder en boven zal liggen: sediment dat bijv. in een ondiepe zee werd neergelegd is anders van aard dan dat uit een diepe zee. De seismische reflecties die deze sedimentpakketten opleveren zijn dan ook van elkaar verschillend en daardoor is het mogelijk, reflectie-horizonts en daarmee ouderdomswaarden te bepalen. Een bekende horizon in het Noord-atlantische Bekken is de horizon α , die ondiepwater-sediment uit het Aptien-Albien (Midden-Krijt) vertegenwoordigt. Voor monsters van een andere horizon, horizon β , vond men een ouderdom van Onder-Krijt. Elders is nog Boven-Jura aangetroffen, maar ouder komt men niet. Deze oudste lagen liggen ook vrij dicht bij de kust, n.l. voor Senegal en op één van de Kaapverdische Eilanden. Dit is een reden om aan te nemen, dat het uiteendrijven van de continenten niet te lang voor die tijd moet zijn ingezet. Het JOIDES-project kan bij het onderzoek naar de horizonten weer goede diensten bewijzen en heeft dat ook al gedaan.

3. Magnetische anomalieën

Wanneer magma omhoog stijgt en uitstroomt, dalen temperatuur en druk. Op een gegeven moment worden daartoe geschikte mineralen magnetisch: zij passeren het zgn. Curie-punt. Dit Curie-punt is de temperatuur, waarboven een mineraal niet magnetisch is, en waaronder het dat wel is, bij een bepaalde druk. Deze temperatuur kan voor mineralen sterk uiteenlopen. Voor ijzer is deze 770°C bij 1 atm., voor nikkel 330° . Het Curie-punt wordt lager, naarmate de druk hoger is.

De magnetische deeltjes van het gesteente, i.c. het op de rug gevormde nieuwe korstmateriaal, nemen dezelfde deklinatie en inklinatie aan als het plaatselijke geomagnetische

veld tijdens de konsolidatie heeft. Men noemt dit remanent magnetisme. In dit natuurlijke magnetisme van gesteenten is een herinnering bewaard gebleven aan het aardse magnetische veld in het verleden. Dit heet paleomagnetisme.

Het paleomagnetische onderzoek heeft aangetoond dat er, behalve afwijkingen in de richting - waarover later - ook fluktuaties in magnetische intensiteit en zelfs omkeringen in de polariteit zijn geweest. Door welke oorzaak de polariteit "omklapt" is nog niet bekend, maar zeker is intussen, dat het verschijnsel al vele malen is voorgekomen.

In de laatste 4.500.000 jaar was de polariteit beurtelings 13 x normaal, d.w.z. als tegenwoordig, en 13 x omgekeerd. De laatste omkering vond 20.000 jaar geleden plaats, de omgekeerde polariteit daarvoor had 10.000 jaar geduurd. Deze twee perioden duurden zeer kort t.o.v. de eraan voorafgaande, want de normale periode die aan de omgekeerde voorafging duurde 660.000 jaar. Deze was gevolgd op een omgekeerde periode van 200.000 jaar, enz. De fluktuaties in intensiteit van het aardse magnetische veld duren in de orde van 10.000 jaar.

Het tegenwoordig uit de midden-oceanische ruggen omhoogkomende magma zal de normale, nu heersende polariteit bezitten. Verder van de rug verwijderd zal er echter gesteente voorkomen, dat vroeger, in een tijd van omgekeerde polariteit, gevormd werd en dat dus een tegengestelde magnetische richting heeft. En zo vervolgens. Ook fluktuaties in de intensiteit moeten op deze wijze uit het gesteente af te lezen zijn. Daar waar jonger materiaal over ouder gesteente met tegengestelde polariteit heenstroomt wordt het werkzame deel van de magnetisatie verminderd tot de resultante van beide.

Het waren Vine en Matthews, die in 1963 deze opzienbarende, logische konklusie trokken uit waarnemingen tijdens opmetingsonderzoek naar magnetisme op de zeebodem. Zij veronderstelden, dat variaties in de intensiteit en polariteit van het aardse magnetische veld gefossiliseerd zouden kunnen zijn in de oceanische korst. Dit zou moeten blijken uit verstoringen in kortegolf-signalen of "anomalieën" in het magnetische veld van de aarde. Deze signalen kan men opvangen en in kaart brengen als een magnetisch patroon.

Zulk een patroon verkrijgt men, door in een bepaald gebied per boot of in laagvliegende vliegtuigen de signalen op te nemen tijdens trajekten tussen bepaalde lengtegraden, heen en weer gaand op dicht bijeen liggende breedtes. Op deze wijze wordt de oceaانبodem op zijn positieve of negatieve signalen afgetast.

Het verkregen magnetische patroon vertoont opmerkelijke karakteristieken over duizenden kilometers langs de as van de ruggen. Allereerst een centrale anomalie, samenvallend met de rugas, waar de magnetisatie uniform is en "normaal" gericht. Symmetrisch ter weerszijden daarvan ziet men een merkwaardig continu en uniform lijnenspel, evenwijdig aan de rugrichting. Het wordt alleen verstoord door anomalieën die samenhangen met zeebergen of andere vulkanische ruggen dan de centrale en door breukzones, die de zaak verschuiven. Een minimum aan schuifsnelheid van meer dan 1 cm per jaar en een redelijk lange duur van een periode met bepaalde polariteit zijn wel vereist om tot meetbare resultaten te kunnen komen.

De breedten van de stroken met gelijke anomalie verschillen bij de diverse ruggen door de ongelijke schuifsnelheden.

Het Mohole- en het JOIDES-projekt hebben bijgedragen tot ondersteuning van de Vine - Matthews-theorie. De Mohole-boring bij de Midden-Atlantische Rug ging 12 m diep in een bazaltische lavastroom. Het gesteente op de bodem van het boorgat bleek omgekeerd gemagnetiseerd te zijn. Blokken van verschillende polariteit schijnen op de boorplaats boven elkaar te liggen, het materiaal van de een is boven dat van de ander uitgestroomd. De JOIDES-boring, in diepzeesediment van de Pacific bij de ekwator, ging 28 m diep en vond 22 omkeringen in magnetische polariteit, die in circa 12 miljoen jaar moeten hebben plaatsgevonden.

Zo kunnen magnetische anomalieën de geschiedenis van de oceanische bekkens helpen verklaren. Ze zijn volkomen in overeenstemming met en eigenlijk een gevolgtrekking van de bestaande ideeën over het uitschuiven van de oceaانبodems.

4. Paleomagnetisme

Bij het passeren van het Curie-punt namen de mineralen met magnetische eigenschappen een remanent magnetisme aan, dat sindsdien in het gesteente "bevroren" bleef. Behalve de magnetische polariteit blijkt ook de gerichtheid van het magnetisme in de loop der tijden

aan verandering onderhevig. De oorspronkelijk naar de magnetische pool gerichte magnetische deeltjes wijzen nu in een andere richting. Twee mogelijkheden geven hier een verklaring voor: 1. de magnetische pool heeft zich in de loop van de aardgeschiedenis verplaatst, 2. de continenten zijn t.o.v. de (stabiele) magnetische pool verschoven.

Er zijn inderdaad poolverplaatsingen aangetoond, zelfs in de luttel honderden jaren waarin dit verschijnsel is geobserveerd. Maar de waargenomen verplaatsingen kunnen niet de zeer grote afwijkingen in de magnetische poolrichting verklaren - men beschikt nu eenmaal niet over voldoende lange waarnemingen om zulke extrapolaties te rechtvaardigen (Holmes). Zoals op andere gronden al werd vermoed, blijkt ook wat het paleomagnetisme betreft, de hypothese van drijvende continenten grond onder de voeten te geven. Niet alleen verklaart dit fenomeen de afwijking van de magnetische richting, maar met de paleomagnetische waarnemingen blijken ook die van de klimaatveranderingen samen te vallen. Men heeft gegevens over het voorkomen van ijstijden en tropische plantengroei in gebieden, die nu een heel ander klimaat bezitten. Verschuift men de continenten met ijstijdverschijnselen in een bepaalde periode zodanig, dat deze koudezones in elkaars nabijheid liggen, dan blijkt de paleomagnetische richting van hun gesteenten dezelfde te zijn, n.l. ongeveer de huidige magnetische pool. Al wil men de mogelijkheid van poolomzwinging niet helemaal uitsluiten, toch helt men ertoe over om paleomagnetisme te verklaren uit de continentale drift.

5. Biologische waarnemingen

Ook biologen zijn ingeschakeld om een aandeel te leveren in het bewijzen van de hypothese van continentverschuiving.

Hiervoor moet men beschikken over biologische continue testorganismen. Bijzonder geschikt zijn ostracoden, dit zijn zeer kleine, tweekleppige kreeftachtigen, waarover veel literatuur bestaat. Ze komen voor vanaf het Carboon en zijn gebonden aan een continentale omgeving.

Doel van het onderzoek was het voorkomen van bepaalde zoetwater-ostracoden in zowel Argentinië, Zuid-Afrika, Zuid-Australië als Nieuw-Zeeland te verklaren. Omdat testdieren in zout water dood gaan, kunnen ze niet door oceaanstromingen zijn overgebracht. Transport door vochtige winden zou mogelijk zijn, maar lijkt weinig effectief. Ook zou het kunnen zijn, dat vogels hen hadden meegenomen in vochtige modder aan hun poten of veren. Maar in Jura en Krijt waren er nog bijna geen vogels die hen zouden hebben kunnen verplaatsen, zeker op het Zuidelijk Halfrond niet, daarentegen waren er wel veel gemeenschappelijke ostracoden in het Weald (Onder-Krijt) van Brazilië en West-Afrika.

Men komt tot de konklusie, dat deze dieren geleefd moeten hebben in een bekken met vrije uitwisselingsmogelijkheden. De verbinding van Zuid-Amerika en Zuid-Afrika tijdens het vroege Krijt verklaart dit het best. Ook voor het voorkomen van dezelfde soorten ostracoden in ver vaneen liggende gebieden is continent-verschuiving de meest plausibele verklaring.

Konvektie in de mantel

Welke krachten zijn in staat schollen van de aardkorst in beweging te brengen en te houden, continenten te doen drijven, aardbevingen te veroorzaken en bergen en troggen te vormen? En die tevens nog de inhomogeniteit in het binnenste der aarde kunnen verklaren - want door de ongelijkheid van mantelmateriaal in de aarde en de tendens tot homogenisering schijnen al deze fenomenen tot stand te komen. Men heeft het gezocht in samentrekking van de aarde ten gevolge van afkoeling, in expansie van de aarde door verhitting ten gevolge van radio-actieve afbraak, in een afnemende zwaartekrachtconstante, maar deze mogelijkheden zijn weer verworpen. Wel plausibel lijkt de thermaal aangedreven konvektie in de mantel te zijn, al is deze geenszins zeker.

Konvektie wordt gezien als een opwaartse stroming van mantelmateriaal, dat mogelijk warmer, dus lichter is dan de rest van de mantel ter plaatse. Nabij de oppervlakte koelt dit magma af en vervolgens daalt dit relatief zwaardere materiaal weer in diepere delen van de mantel af. Bij een rugstructuur in de oceanen komt het opgaande deel van een konvektiestroom nabij het aardoppervlak, bij een trog verdwijnt de neergaande stroom weer in de mantel. Bij het bestuderen van de omlopen van kunstmanen heeft men systema-

tische afwijkingen in het zwaartekrachtveld van de aarde gevonden. Deze pleiten voor het voorkomen van konvektie ergens in de mantel, al kan de plaats van de konvektie stromen niet zomaar uit het graviteitsveld worden afgeleid. Ook is het niet juist bij voorbaat aan te nemen, dat de konvektie een temperatuuregalisatie is, al zou dat best zo kunnen zijn. Evenmin is het vanzelfsprekend, dat er door de konvektiestromen vloeibaar materiaal omhoog wordt gestuwd: ook vaste gesteenten kunnen "vloeien". De gebrekkige kennis van de buitenmantel laat zulke konklusies nog niet toe, laat staan dat men iets met enige precisie zou kunnen stellen omtrent de binnenmantel, die ongetwijfeld met de buitenmantel reacties aangaat. Over de interacties tussen kern en mantel zullen we maar helemaal zwijgen. Het zou heel goed mogelijk zijn, dat konvektie een egalisatietendens weerspiegelt van haarden met een van de omgeving verschillende dichtheid, die weer kan samenhangen met de chemische samenstelling van het mantelmateriaal. Men veronderstelt, dat de mantelsubstantie is opgebouwd uit voornamelijk magnesium- en ijzersilikaten uit de olivijn - groep, die een mengreeks vormen.

Deze silikaten gaan bij hoge druk over in een ruimtesparende kristalstructuur, de ijzersilikaten bij een hogere druk dan de magnesiumsilikaten. Er zou een verandering in dichtheidsfase zijn op 400 km en een op 600 km diepte, wat blijkt uit veranderingen in de snelheden van seismische golven op deze diepten.

Al met al is het mechanisme van de konvektiestromen nog lang niet duidelijk, ook verder zijn er nog wel de nodige problemen.

Niet met elke oprijzende stroom gaat een neerdalende beweging samen - niet iedere schol daalt weer in de diepte af. Niet alleen de betrekkelijk starre schollen bewegen zich ten opzichte van elkaar langs zich verplaatsende grenzen, maar ook de plaatsen waar de konvektiestromen naar boven komen en wellicht ook waar zij weer neerdalen, veranderen ten opzichte van elkaar. Niet duidelijk is nog de aard van de terugkerende konvektiestroom.

Hoe de hypothese van uiteenschuivende zeebodems en drijvende vastelanden in verband en overeenstemming gebracht kan worden met de bestaande ideeën over gebergtevorming en de enorme daaraan voorafgaande sedimentatie, is weer een ander punt van discussie.

Een duidelijk omlijnd wereldbeeld is ons nog niet gegeven. Maar steeds meer tipjes van de sluier worden opgelicht. De succesrijke resultaten van de jongste onderzoekingen geven het gevoel, dat nu aan veel geheimzinnigs met rukken een eind wordt gemaakt.

*

Literatuur :

- L. Knopoff : The upper mantle of the Earth, *Science* 163, 1277, 1969;
F.J. Vine en D.H. Matthews : Magnetic anomalies over oceanic ridges, *Nature* 199, 947, 1963 ;
F.J. Vine : Spreading Ocean Floor: new evidence, *Science* 154, 1405, 1966 ;
B.M. Funnell : Opening of the Atlantic Ocean, *Nature* 219, 1328, 1968;
en A.G. Smith
H. Palmer : East Pacific Rise and westward drifting of North America,
Nature 220, 341, 1968;
verder : *Science* 161, 886, 1968; idem 161, 1338, 1968; idem 161, 1339, '68;
idem 162, 1473, 1968; idem 169, 237, 1969;
Nature 219, 6 juli 1968; idem 220, 535, 1968; idem 220, 806, 1968;
A. Holmes - Principles of physical geology, 1964.