

De geschiedenis van de geologie II, van 'drijvende continenten' en wegzinkende geosynclinalen

door drs. W.C.P. de Vries

C. De zoektocht naar het mechanisme van de bewegingen van de aardkorst in de eerste helft van de 20^{ste} eeuw

In het begin van de 20^{ste} eeuw werd veel onderzoek verricht naar gebergtevorming. De algemene geologische kaartering van grote delen van Europa was voltooid en de grote geologische structuren waren bekend. Een grote hoeveelheid literatuur was verschenen, zoals de uitgebreide monografieën van onder meer Albert Heim en Rudolph Staub over de Alpen. De verklaring van de vorming van de gebergten was echter nog een intrigerend probleem. Het zoeken naar het mechanisme waardoor grote structuren van de aardkorst, zoals de gebergtegordels, ontstaan zou tot het begin van de jaren '60 van de 20^{ste} eeuw duren.

De theorie van Wegener: het 'drijven der continenten'

Sinds het verschijnen van vrij nauwkeurige wereldkaarten, ook reeds in de loop van de 17^{de} eeuw, werd duidelijk dat de vormen van de Atlantische kusten van Zuid-Amerika en het zuidelijk gedeelte van Afrika opvallend overeenkomen. Het duurde nog tot het eerste decennium van de 20^{ste} eeuw voordat Alfred Wegener zich met dit onderwerp zou gaan bezighouden. Wegener was een wetenschapper die weliswaar geen geoloog was, maar wel een uitgebreide interesse en bovendien een onuitputtelijke energie had. De astronoom en meteoroloog Wegener heeft daarbij ook een verklaring gezocht voor deze overeenkomst in de kustlijnen en een mechanisme geformuleerd waarmee dit fenomeen kon worden verklaard.

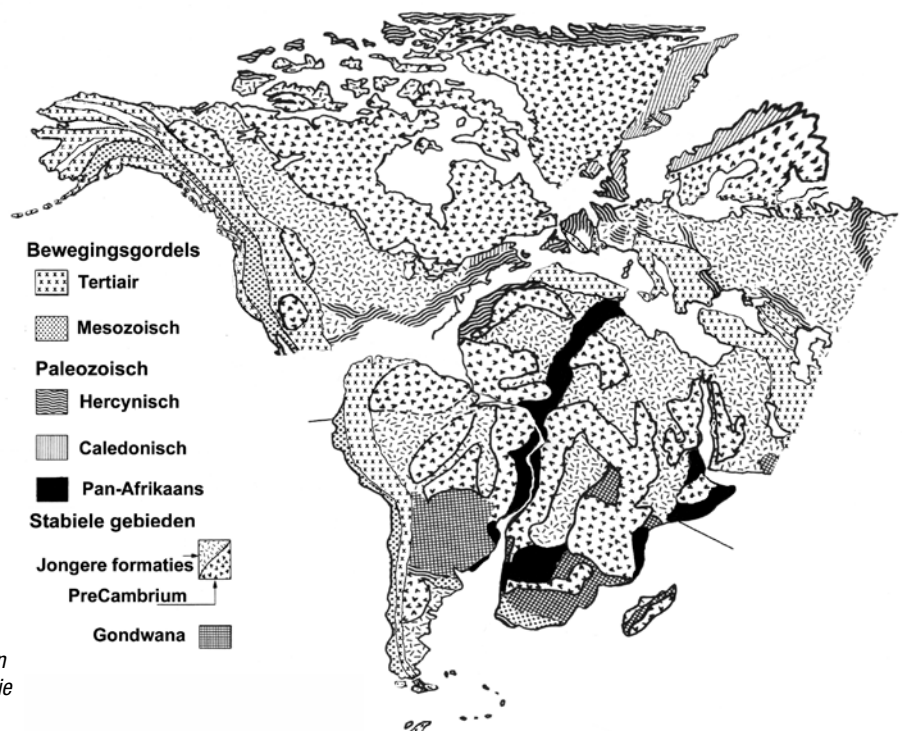
Wegener had de overeenkomst tussen de kustlijnen aan beide zijden van de Atlantische Oceaan opgemerkt en vele publicaties gelezen over de overeenkomst tussen de fossiele fauna's in de Paleozoïsche formaties van Centraal-Afrika en Brazilië. Deze overeenkomst werd verklaard door het bestaan van een landbrug tussen beide continenten die gedurende een deel van het Paleozoïcum en Mesozoïcum zou hebben bestaan. Deze landbrug zou in de loop van het Tertiair zijn verdwenen.

Wegener geloofde niet in het voorkomen van landbruggen en ontwikkelde daarop een theorie over de horizontale bewegingen van de continenten. De eerste edities van zijn boek *'Die Entstehung der Kontinente und Ozeane'* verschenen in 1915 en 1920, maar trokken weinig belangstelling. De derde editie (uit 1922 en in 1924 in diverse vertalingen uitgebracht) kreeg wel veel aandacht.

Afb. 13. Schematische reconstructie van de continenten aan het einde van het Paleozoïcum. Bij deze configuratie zijn de geologische structuren aan beide zijden van de Atlantische Oceaan goed te vervolgen.

Dit boek is zowel een van de meest indrukwekkende als controversiële boeken die er op geologisch gebied zijn verschenen. Wegener gaf in dit boek een uitgebreid overzicht van de aanwijzingen die er bestaan van horizontaal gerichte verplaatsingen van de continenten, door Wegener 'Verschiebung' genoemd. Wegener had een enorme hoeveelheid gegevens bij elkaar gebracht om aan te tonen dat de huidige continenten aan het einde van het Paleozoïcum op andere plaatsen op Aarde lagen en een uitgestrekte, aaneengesloten continentale massa vormden. In de periode daarna, tijdens het Mesozoïcum en Tertiair, is deze grote landmassa uiteen gevallen en zijn de delen uit elkaar bewogen tot de huidige verdeling van land en zee. Het vernieuwende idee dat continenten geen vaste plaats op Aarde hebben maar zich in de loop van de geologische geschiedenis verplaatsen, is een grote verdienste van Wegener geweest.

Eén van de eerste punten die de aandacht van Wegener trok, was dat niet alleen het Afrikaanse en Zuid-Amerikaanse continent vrijwel naadloos aan elkaar pasten, maar dat ook vele geologische structuren en gesteentecomplexen met overeenkomstige ouderdommen in de Atlantische kustgebieden van Afrika en Zuid-Amerika fraai in elkaar doorliepen. Ook de andere continenten aan weerszijden van de Atlantische Oceaan kunnen uitstekend aan elkaar gepast worden, zoals de kusten van Groenland en Noord-Amerika enerzijds met die van Europa en West-Afrika anderzijds. Geologische structuren krijgen dan ook een vervolg aan beide kanten van de oceaan: onder meer heeft het Appalachen-gebergte van het oosten van Noord-Amerika zijn vervolg in de Scanden van Noorwegen, die tezamen met de gebergtegordel van de ostrand van Groenland één geheel vormen. Afb. 13. Daar-



naast vormen bij deze continentale reconstructie de voorkomen van de verschillende fossiele flora's uit de Carbonische steenkoolafzettingen aaneengesloten gebieden. Afb. 14. Een overeenkomstige geografische ontwikkeling wordt gevonden in het voorkomen van bepaalde groepen fossiele amfibieën en reptielen uit Carboon en Perm.



▨ Tropische flora van Laurazië ▨ Polaire fauna van Gondwana ▨ Tethys, mariene foraminiferen

Afb. 14. Verbreiding van de tropische Carbonische flora van Laurazië en de polaire flora van Gondwana.

Aaneengesloten ijskap

Van groot belang was de ontdekking van sporen van een ijstijd die rond 300 miljoen jaar geleden optrad tijdens het Perm. Glaciale afzettingen, zoals morenemateriaal (zanden en kleien met verspreid liggende, grote, vaak ronde keien), neergelegd door enorme gletsjers, en de krassen die veroorzaakt zijn door keien die met het ijs voortbewogen werden over afgeslepen rotsbodems komen voor in Zuid-Amerika, zuidelijk Afrika, India (!), Antarctica en Australië. Dit zijn dus dezelfde gebieden waarin ook de *Glossopteris*-flora voorkomt. Bij het aan elkaar passen van deze gebieden met behulp van de sporen van de ijsbewegingen ontstaat een aaneengesloten ijskap met een omvang die overeenkomt met het huidige Zuidpoolgebied; daarbij is rekening gehouden met het feit dat de huidige ijskap van het Zuidpoolgebied op veel punten in zee uitkomt en daar afkalft. Afb. 15.

Dit was ook een belangrijk aandachtspunt voor Wegener vanwege zijn speciale interesse in de glaciologie. Zijn reizen naar



Afb. 15. Reconstructie van de ligging van de zuidelijke continenten ('Gondwana') tijdens het Permo-Carboon. De uitbreiding van de Permo-Carbonische ijskap van Gondwana is gebaseerd op de verspreiding van de glaciale afzettingen en de stroomrichting van gletsjerskrassen op harde gesteenten.

Groenland en IJsland hadden mede als doel om de sporen van de gletsjers van de Permo-Carbonische IJstijd van Gondwana met die van de recente gletsjercomplexen te vergelijken. Het was Edward Suess, een kennis van Wegener, die aan het hierboven genoemde samenstel van de zuidelijke continenten de naam 'Gondwanaland' had gegeven. De naam 'Gondwana' was reeds in 1872 door Medlicott gegeven aan een steenkoolhoudende formatie in het Deccan-gebied in India en betekent: 'land van de Gonds'. (De toevoeging 'land' van 'Gondwanaland' is dus dubbelop).

Wegener trok uit deze en vele andere door hem verzamelde gegevens de conclusie dat tijdens het laatste gedeelte van het Paleozoïcum en het begin van het Mesozoïcum Gondwana verbonden was met de andere continenten, zodat er één groot aaneengesloten supercontinent aanwezig was dat hij het 'Urkontinent' noemde. Tijdens een symposium in 1927 over de bevindingen van Wegener werd de term 'Pangea' ('gehele Aarde') voorgesteld voor dit 'Urkontinent'.

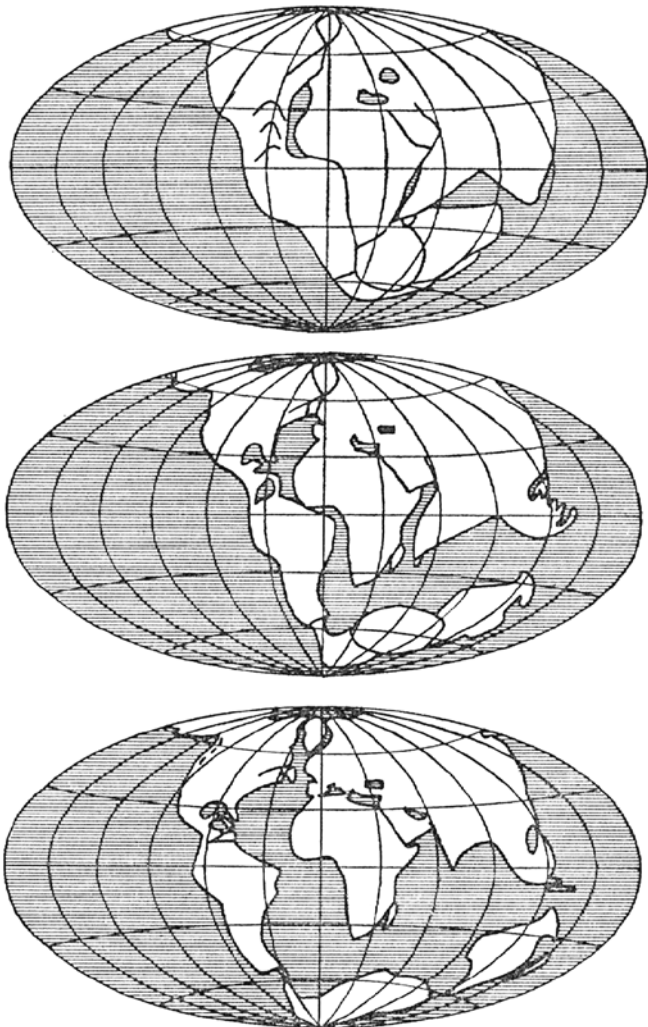
Bij nadere beschouwing is de algemeen gebruikte verdeling van Pangea niet zo vanzelfsprekend. Laurazië bestaat uit Noord-Amerika en Eurazië, maar opvallend is dat de oostkust van het Noord-Amerikaanse continent vrijwel volledig grenst aan westelijk Afrika. De verbinding tussen de gedeelten van Laurazië wordt slechts gevormd door Newfoundland (dat zijn geologische voortzetting vindt in Noordwest-Spanje en Normandië) en Groenland (dat de westelijke helft is van een bergteggordel waarvan Noorwegen de oostelijke helft vertegenwoordigt). Ten oosten van Spanje zijn Laurazië en Gondwana gescheiden door een oceaan die snel breder wordt naar het oosten: de Tethys.

Wegener poneerde de stelling dat het Pangea-continent, dat in het Carboon en Perm bestond, in de loop van het Mesozoïcum in stukken begon te breken, waarbij het noordelijke gedeelte (het deel ten noorden van Newfoundland en Spanje) tot aan het einde van het Tertiair één geheel bleef vormen. Hierdoor konden de morenes van de Pleistocene ijskap zonder onderbreking van Zuidwest-Engeland naar Newfoundland doorlopen. De noordelijke delen van Laurazië zijn sindsdien van elkaar afgebroken en naar hun huidige posities 'gedreven'. Aanvankelijk sprak Wegener van de 'verplaatsing der continenten'; maar al heel snel werd de term 'continental drift' algemeen gebruikt.

De hypothese van Wegener samengevat

Samengevat zijn de voornaamste punten van Wegeners hypothese:

- De continenten en de oceaانبodem zijn van fundamenteel verschillende samenstelling. De continenten bestaan uit een 100 km dikke laag granitische gesteenten (aangeduid als 'SiAl' – genoemd naar de twee belangrijkste elementen in de gesteenten: silicium en aluminium) van relatief laag soortelijk gewicht die op isostatische wijze drijven in de zwaardere bazaltische gesteenten ('SiMa' – silicium en magnesium), waar zij slechts 5 km bovenuit steken;
- De laag SiAl heeft vroeger een groot gedeelte of mogelijk zelfs de gehele aarde bedekt, maar is in de loop van de tijd steeds kleiner geworden door de verplooiingen. Daarnaast is de laag continentale gesteenten in stukken gebroken;
- De continentale gedeelten hebben hun uitbreiding, die het gevolg was van het opbreken tijdens het Mesozoïcum, in grote trekken behouden. Als de geplooid gebergteggordels weer vlak gestreken worden, kunnen de delen weer aaneengevoegd worden langs de continentale shelfranden tot één groot continent dat grotendeels bedekt zou zijn door een ondiepe zee;
- De Tertiaire gebergteggordels zijn ontstaan door de verfrommeling van de continentranden toen zij tegen de SiMa of



Afb. 16. Reconstructie van de wereldkaart volgens Wegeners theorie van de continentverschuiving (schematisch weergegeven). De continenten sloten zich aaneen in het Laat-Carboon.
Boven: Laat-Carboon; midden: Eoceen; onder: Vroeg-Kwartair.

tegen elkaar werden gedrukt (zoals India en Azië). De oceanische troggen zijn ontstaan door het wegzinken van de oceanbodem tegen het naderende continent;

- Naast de bewegingen van de continenten zijn ook verplaatsingen van de polen van de aarde opgetreden; fossiele voorkomens wijzen erop dat er sinds het Perm een verplaatsing van ca. 4000 km is opgetreden.

In de illustraties die Wegener geeft van de verplaatsingen van de continenten tekent hij aan het einde van het Paleozoïcum één groot aaneengesloten continent. Afb. 16. Het Gondwanagedeelte breekt in de loop van het Mesozoïcum in stukken, waarbij Afrika uiteindelijk heel weinig heeft bewogen; Zuid-Amerika beweegt naar het westen, weg van Afrika. Vooral de beweging van India is opvallend. India was de zuidpunt van een langgerekt stuk continent, dat zich voortzette in Azië; deze strook werd zeer sterk verkort. Het noordelijke deel van de grote continentmassa breekt pas in de loop van het jongere deel van het Tertiair uiteen, waarbij Wegener zelfs meende dat dit na de Pleistocene IJstijd gebeurde, zodat de rand van de ijskap rechtstreeks te vervolgen was van Midden-Europa naar het centrale deel van Noord-Amerika. De bewegingen zijn voornamelijk zuidwaarts gericht; vooral Europa werd daardoor belangrijk verkort in noord-zuid richting; door deze bewegingen ontstonden de Alpengordels.

Een aanwijzing van de verplaatsingsmogelijkheid van de continenten vond Wegener in de metingen die op meerdere momenten tijdens de 19^{de} eeuw gemaakt zijn van de positie op

de lengtegraad van de zuidpunt van Groenland. De driehoeksmetingen voor deze bepaling werden uitgevoerd met referentie naar de positie van de Maan, een notoir onbetrouwbare methode waarvan de fouten echter volgens Wegener kleiner zouden zijn dan de waarden van de metingen. Groenland zou volgens deze berekeningen tussen 1823 en 1870 9 meter per jaar naar het westen zijn opgeschoven en tussen 1823 en 1870 zelfs 32 meter per jaar. Dit is een van de factoren die de belangstelling van Wegener voor Groenland verklaren.

De drijvende krachten achter de continentverplaatsing

Volgens Wegener zijn twee krachten verantwoordelijk voor de continentverplaatsing:

- de poolvliedende - centrifugale - kracht (de zogenoemde 'Pohlflucht') - die continenten in de richting van de evenaar wegduwt, en
- de getijdenaantrekking van Zon en Maan die de continenten in westelijke richting verplaatst ten opzichte van de diepere delen van de Aarde.

Hoewel deze krachten zeer gering zijn, kunnen zij er volgens Wegener over een langere periode voor zorgen dat continenten toch gaan bewegen door het substratum van de oceanbodem dat zich opent aan de voorzijde en sluit aan de achterkant, zoals een ijsschots beweegt in water.

De krachten die Wegener aanvoerde, werden door zijn tijdgenoten als volledig ontoereikend beoordeeld om continenten te laten bewegen. Bij het bewegen van de Amerikaanse continenten in de SiMa-laag zou deze volgens Wegener enerzijds uitwijken voor het front van de continenten, maar daarnaast zoveel tegenstand geven dat de frontale randen van de landmassa's in elkaar gedrukt konden worden waardoor de enorme rij van de Amerikaanse Cordilleren kon ontstaan. Nog merkwaardiger was dat de oceanbodem, die dus minder sterk is dan het continent, niet in stapels grote plooiën zou zijn opgestapeld voor het front van het oprukkende continent. Het werd al snel duidelijk dat de krachten die Wegener opvoerde voor de beweging van de continenten te enen male onvoldoende zijn, zelfs met een factor van meer dan een miljoen. Een verdere klap voor de acceptatie van de ideeën van Wegener was het feit dat hij voorbijging aan oudere processen in de aardkorst waardoor onder meer de oud-Paleozoïsche en Precambriësche plooingsgebergten zijn ontstaan. Daarvan moet toch worden aangenomen dat hier eenzelfde proces heeft plaatsgevonden als tijdens het Mesozoïcum en Tertiair.

Als Wegener zich beperkt had tot het presenteren van zijn grote hoeveelheid feitenmateriaal en van de conclusie die daar vanzelfsprekend uit volgde - namelijk dat continenten vroeger andere posities innamen dan tegenwoordig - dan was zijn naam, nog meer dan vandaag, verbonden gebleven aan dit belangrijke mechanisme van de horizontale bewegingen in de aardkorst. Wegener heeft echter het mechanisme zelf ook willen verklaren. Hij meende dat een continent 'dreef' in de zwaardere oceanbodem en hierin ook bewoog, zoals een ijsschots in water. De grote gebergtegordels op Aarde, zoals de Alpen en de Himalaya, verklaarde Wegener door het verfrommelen van de gesteentelagen - als een soort boeggolven - voor het front van de continenten. Wegener verklaarde het begin van het opbreken van Pangea door de (eerdergenoemde) centrifugale kracht, die door de rotatie van de aardbol de aardkorstdelen in de richting van de polen stuwde.

Wegeners handicap

Bij het zoeken naar een verklaring voor de horizontale bewegingen in de aardkorst had Wegener de handicap dat hij meteoroloog, en geen geoloog was. Zijn gegevens waren vooral afkomstig uit de literatuur; geologisch veldwerk heeft hij nooit verricht. Kenmerkend is dat hij bij het doorkruisen van IJs-

land, met een doorsteek over de grote gletsjer Vatnajökull, de imposante breukstructuur van IJsland niet heeft opgemerkt, of er althans geen melding van heeft gemaakt. Wegener bleek ook niet bekend te zijn met de publicatie uit 1910 van de Amerikaan Frank Taylor (zie verder), die had gewezen op het belang van de breukzone in het midden van de Atlantische Oceaan, waar Afrika en Zuid-Amerika zijn gebroken en uit elkaar zijn gedreven (de Mid-Atlantische Rug).

Het waren vooral de technici onder de geologen die weinig heel lieten van zijn theorie, vooral door de onmogelijkheid van het bewegingsmechanisme: de bazalten van de oceaanbodem zijn net zo hard en stijf als de granieten van het continent en het is daarom onmogelijk dat een continent in die starre oceaanbodem kan bewegen. Hierdoor werd de theorie van de 'verplaatsende continenten' van Wegener dan ook nooit volledig aanvaard.

In 1926 vond in New York het 'First International Symposium on Continental Drift' plaats. De bijdragen en discussies luiden in feite de min of meer definitieve ondergang in van de ideeën van Wegener. Een gevolg was dat het tot de jaren '60 van de vorige eeuw zou duren voordat dit onderwerp weer aan de orde kwam.

Frank Taylor, pionier van de continentverschuiving

Hoewel Wegener grote bekendheid verwierf met zijn theorie over de 'verplaatsing van de continenten', was hij niet de eerste die een redelijk uitgebreide en goed onderbouwde theorie over dit onderwerp heeft geformuleerd, waarbij horizontale bewegingen de basis zijn voor de vorming van de structuren van het aardoppervlak. Eén van zijn voorgangers was Frank Taylor. Deze Amerikaanse geoloog publiceerde enkele jaren voor Wegener zijn ideeën over horizontale bewegingen in de aardkorst en was daarmee de eerste die radicaal afstand nam van de gangbare wetenschappelijke opvatting in die tijd. Daarin domineerde het idee dat de bewegingen in de aardkorst overwegend in verticale richting plaatsvinden, waarbij ook landbruggen ontstaan. Deze ideeën maakten deel uit van het zogenoemde 'Tijdperk van Suess'.

Taylor was van mening dat de continenten zich voornamelijk naar lagere breedtegraden bewogen, dus weg van de polen. Deze door centrifugale krachten veroorzaakte beweging

wordt, zoals eerder vermeld, wel aangeduid met de 'Pohlfucht'. De noordelijke continenten laten daarbij de grootste bewegingen zien. Daardoor ontstonden langs alle randen gebergten, zoals de grote plooiingsgebergtegordels van de Pacifische kusten en de gebergten van Europa en Azië, alsmede die in Midden-Amerika. Taylor beschouwde Groenland als een massief blok dat weinig is bewogen; hij meende dat Noord-Amerika van Groenland afgebroken is en naar het westen is bewogen. Afb. 17.

Daarnaast nam Taylor aan dat er een groot continent aanwezig was in het Zuidpoolgebied. Dit brak in stukken, waarbij de delen zich zowel naar het noorden bewogen als zich van elkaar verwijderden. Aan de achterzijde van deze bewegende delen ontstonden grote scheuren waardoor de zuidelijke Atlantische Oceaan en de Indische Oceaan zijn ontstaan. De beweging van de zuidelijke continenten was minder groot dan die van de noordelijke continenten. Hierdoor waren volgens Taylor Afrika, Arabië en India tijdens het Tertiair min of meer stabiele gebieden waar de noordelijke continenten tegenaan liepen.

Veel aandacht wijdde Taylor aan de Mid-Atlantische Rug, de berg in het midden van de Atlantische Oceaan die de vorm van de kusten van Afrika en Zuid-Amerika volgde en als een soort horst kan worden beschouwd die de lijn van uiteenscheuren vertegenwoordigt. Het in gang zetten van de verplaatsingen werd volgens Taylor veroorzaakt door de getijdenbewegingen van de aardbol, die weer werd veroorzaakt door een plotselinge verandering in de draaisnelheid tijdens het Krijt, mogelijk door het invangen van de Maan.

De ideeën van Taylor bevatten een aantal bijzonder scherpzinnige aspecten die hun tijd ver vooruit waren. Daarvan weten we nu dat zij inderdaad verband houden met de bewegingen van de aardkorst, zoals die worden verklaard met de theorie van de plaattektoniek. Net als Wegener vond Taylor evenmin acceptatie bij zijn collega's. Toch is het opvallend dat zijn ideeën op het moment van publicatie nauwelijks aandacht kregen en vooral dat hij een kleine zestig jaar later evenmin enige erkenning kreeg van de pleitbezorgers van de theorie van de 'spreiding van de zeebodem'. Deze theorie kan beschouwd worden als een aanloop tot de huidige ideeën van de plaattektoniek. Voor zover bekend schijnt Wegener zijn ideeën over het drijven van de continenten onafhankelijk van Taylor te hebben ontwikkeld.

Wegener-getrouwen

Naast de vele tegenstanders van de ideeën van Wegener waren er onder eminente geologen ook voorstanders, zoals de Zuid-Afrikaan Alexander du Toit. Zijn mening over het bestaan en de ontwikkeling van Gondwana baseerde hij op duidelijke aanwijzingen die hij verkreeg door zijn uitgebreide studies in onder meer zuidelijk Afrika en Zuid-Amerika. In zijn boek 'Our Wandering Continents' (1937) stelde Du Toit dat Pangea was samengesteld uit twee delen: het zuidelijke polaire Gondwana en het noordelijke continent dat bestond uit de aaneengesloten landmassa's van Noord-Amerika (Laurentia) en Eurazië ('Laurasia'). De twee delen waren in het westen met elkaar verbonden; het oostelijke deel was gescheiden door de Tethys Oceaan, een naam die eveneens was voorgesteld door Suess.

De beroemdste 'advocaat' van Wegener - tevens de grootste geoloog van de 20^{ste} eeuw - was Arthur Holmes, die vooral bekend was van zijn uitstekende, encyclopedische handboek 'Principles of Physical Geology' uit 1965 (dat een ieder die geïnteresseerd is in de geologie m.i. moet hebben gelezen). Naar aanleiding van het symposium van 1926 merkte hij op dat de kritiek op Wegener niet zozeer tegen zijn ideeën was gericht, maar tegen de persoon Wegener zelf. Holmes zag zelf ook wel in dat het door Wegener voorgestelde mechanisme "hopelessly inadequate" was.



Afb. 17. De 'Pohlfucht'-beweging van de noordelijke continenten. De dikke lijnen vertegenwoordigen de Tertiaire gebergtegordels. De gebieden met horizontale arcering zijn tijdens het Tertiair stabiel gebleven (naar Taylor, 1928).

Zowel Du Toit als Holmes verklaarden de continentbewegingen door convectiestromen in de aardmantel, die de aardkorst 'op hun rug' zouden meevoeren. Op plaatsen van de uiteengaande 'takken' van twee convectiecellen wordt de aardkorst opengescheurd; in de scheur wordt nieuwe, basaltische aardkorst gevormd. Op de plaats waar twee cellen elkaar ontmoeten, wordt de oceaانبodem naar beneden meegenomen en botsen de meegevoerde continenten tegen elkaar. De totale krachten die op beide plaatsen langs de convectiecellen optreden zouden voldoende zijn voor de verplooiing van de randen van de continenten met als resultaat de vorming van een plooiingsgebergtegordel.

Het tijdperk van de geosynclinale

Mogelijk als reactie op Wegeners theorie van de horizontale bewegingen kreeg het mechanisme dat *verticale* bewegingen centraal stelt als verklaring voor de grote structuren van de aardkorst hierna veel aandacht. Dat een verklaring gebaseerd op verticale bewegingen zonder moeite werd aangenomen, is eenvoudig te verklaren omdat verticale bewegingen in de geologie op vele plaatsen en uit vele tijdvakken bekend zijn. Ook op de dag van vandaag zijn deze verticale bewegingen aan de gang en soms zelfs aantoonbaar, zoals bijvoorbeeld de huidige snelle stijging van Scandinavië van rond 1 cm per jaar! Hierdoor is de haven van Stockholm in de loop van de eeuwen onbereikbaar geworden. In de geologische geschiedenis vinden we vele andere bewijzen, zoals het voorkomen van kilometers dikke series sedimenten in dalende stroken van de aardkorst en het voorkomen van sedimenten, zoals zanden en kalken met fossielen van organismen die in de toenmalige oceanen leefden, op de hoogste toppen van gebergten, zoals in de Himalaya.

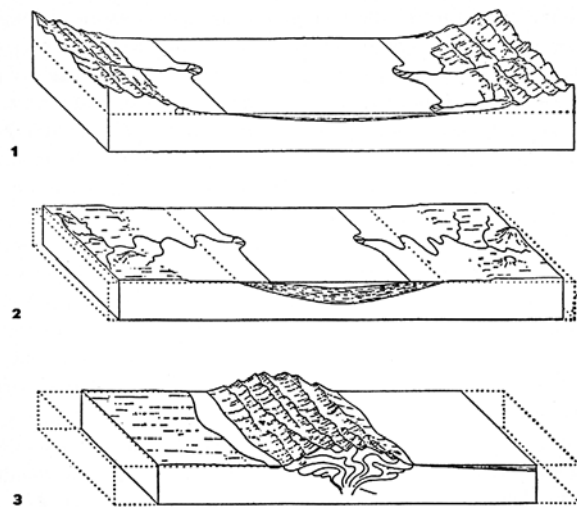
Ook de verklaring voor de vorming van een gebergte werd gezocht in de verticale bewegingen van de aardkorst. Daarbij werd een rechtstreeks verband aangenomen tussen langgestrekte, dalende stroken van de aardkorst en de gordels van hooggebergten. Dit verband vormt de basis voor de theorie van de zogenoemde 'geosynclinalen', waarvan het concept reeds dateerde uit het midden van de 19^{de} eeuw. Het was in 1859 opgesteld door James Hall en vooral gebaseerd op de structuur van de Appalachen-ketens, in het oosten van Noord-Amerika.

In de theorie van de geosynclinalen wordt aangenomen dat er een lange, tenminste vele tientallen miljoenen jaren durende fase aan de vorming van een gebergte voorafgaat. Tijdens deze voorbereidende fase ontstaat een tot duizenden kilometers lange en honderden kilometers brede, dalende strook. Zo ontstaat er een lange depressie in het aardoppervlak. Een dergelijk dalend gebied, waarvan het oppervlak wegzakt tot onder zeeniveau (soms zelfs tot de diepte van de diepzee), is een natuurlijk opvanggebied voor afbraakmateriaal van het omringende land. De zeearm wordt daardoor gevuld met een dik pakket van slib, van sedimenten, zoals zand en klei. Door het toenemende gewicht van de groeiende stapel afgezet materiaal zal de depressie nog sneller gaan inzakken. Zo kan er in de loop van de tijd een kilometers dikke serie sedimenten worden neergelegd. Een groot gedeelte van het materiaal dat vanaf het land de dalende strook ingespoeld wordt, zal zich ophopen in de ondiepe randzeeën. Hier vinden we veel zanden en ook kalklagen; de kleine en platte kleideeltjes bereiken het centrale deel van de zeearm. Als de aardkorst onder het gewicht omlaag buigt, rekt hij uit en ontstaan er scheuren waarlangs magma kan opstijgen. Vaak is dit magma van basaltische samenstelling. Aldus wordt het diepste gedeelte van de dalende zone gekarakteriseerd door een pakket diepzeeklei met inschakelingen van basaltische lava.

De zeer grote dalende structuur van de aardkorst wordt een

geosynclinale genoemd. Het ondiepe gedeelte is de mio-geosynclinale; het diepe deel, waar oceanische diepten kunnen voorkomen, is de eu-geosynclinale. De term geosynclinale houdt verband met de namen van plooivormen in gesteenten: als een pakket gesteenten op een golvende wijze is geplooid dan wordt de naar boven gerichte opwelling een anticlinale plooi genoemd (ofwel een anticline); de naar beneden gerichte verbuiging van in een komvorm geplooide lagen is een synclinale plooi (ofwel een syncline). Zo is de grote komvormige inzakking die een lengte kan bereiken van duizenden kilometers een geosynclinale, en een synclinale op wereldschaal.

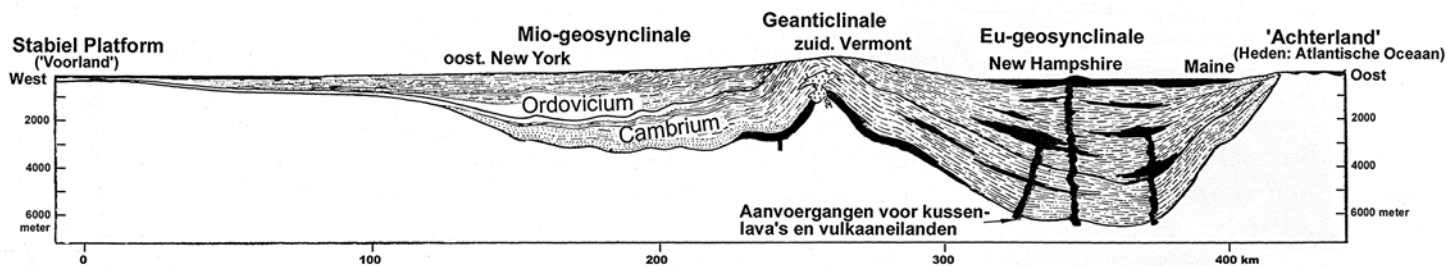
Het doorbuigen van het dalende geosynclinale bekken gaat door tot op het moment dat de kuil zo diep is dat hij instabiel wordt en dan als het ware wordt dichtgevouwen. De randen bewegen naar elkaar toe en de gesteenten in het bekken worden in elkaar gedrukt; zij worden geplooid en schuiven over elkaar heen, waardoor de stapel steeds dikker wordt. Afb. 18.



Afb. 18. Ontstaan van een gebergte uit een geosynclinaal dalingsbekken (naar Vening Meinesz en Umbgrove).

Door de samendrukking van het dalingsgebied ontstaat een grote, langgestrekte 'zak' van verplooid sedimenten die diep in de aardkorst gezakt is. Deze 'zak' bestaat uit materialen van een relatief lage soortelijke massa, zoals zand, kalk en klei. Daarbij gaat het om een veel dikker pakket dan normaal is voor de opbouw van de aardkorst. Een dergelijke anomalie in de opbouw van de aardkorst zal tot uiting komen in verschillen in de waarde van de zwaartekracht: boven een dikke serie afzettingen van geringe dichtheid - met een relatief gering soortelijk gewicht - is de zwaartekracht lager dan gemiddeld op het continent. Om het evenwicht in de zwaartekrachtverschillen - het isostatisch evenwicht - te herstellen moet de 'stapel' in het gedaalde gebied - vaak over vele kilometers - worden opgeheven. Op deze wijze ontstaat dan uit een dalend gebied een gebergte van verfrommelde, ofwel verplooid gesteenten. Ook voor deze fase van de geosynclinalen-theorie werd een bewijs gevonden in de opheffende bewegingen die op veel plaatsen op Aarde in het hooggebergte aan de gang is. Het verschijnsel van het geosynclinaal dalingsbekken was, zoals hierboven beschreven, uitdrukkelijk gekoppeld aan de latere vorming van een gebergte. Anders gezegd: een plooiingsgebergte ontstaat uit een geosynclinaal stadium.

Aan de ontwikkeling van de theorie van de geosynclinale oorsprong van gebergteketens op Aarde heeft - zoals hierboven aangegeven - vooral de kennis van de Appalachen-gor-



Afb. 19. Profiel door de geosynclinale van de Appalachen voor de samendrukking en de plooiing (naar Kay, 1951).

del langs de oostkust van Noord-Amerika veel bijgedragen. Het bekende profiel van de reconstructie van de dikteverdelingen van de sedimenten van de Appalachen-geosynclinale is in afb. 19 afgebeeld.

De geosynclinalen-theorie is tot in de jaren '60 van de vorige eeuw de vrijwel algemeen aanvaarde theorie geweest voor het ontstaan van gebergten. Er kleefden echter een aantal problemen aan deze verklaring, die uiteindelijk hebben geleid tot het verlaten van deze theorie. In de eerste plaats betrof dit de verdeling van de sedimenten; in het afgebeelde profiel naar Kay (zie afb. 19) is de serie sediment van de eugeosynclinale vele kilometers dik. In werkelijkheid is de hoeveelheid kleilig slib dat over de drempel in de geosynclinale in het diepere gedeelte terecht komt gering; de dikte van de sedimentserie in de eugeosynclinale zal eerder enkele honderden meters dan kilometers bedragen. De bepaling van de oorspronkelijke dikte wordt echter zeer bemoeilijkt door de sterke samendrukkende plooibewegingen in het eugeosynclinale gebied.

Een ander belangrijk probleem waaraan - ook in deze theorie - weinig aandacht werd besteed, had betrekking op de krachten die noodzakelijk zijn voor het ontstaan van de typerende evenwijdige oriëntatie van de mineralen. Deze oriëntatie is een zeer karakteristieke eigenschap van gesteenten die onderworpen zijn geweest aan de samendrukkende bewegingen in een plooiingsgebergte. Deze evenwijdige oriëntatie van bepaalde mineralen (de 'evenwijdige textuur') is karakteristiek voor bijvoorbeeld leisteen - met zijn fraaie vlakke, evenwijdige slijtvlakken - en voor (glimmer-)schist en gneis, gesteenten die alle worden gekenmerkt door de evenwijdige oriëntatie van de plaatvormige kristallen van de kleimineralen en de verwante mica's, ofwel de glimmermineralen, zoals muskoviet (de doorzichtige 'kachelmica') en de zwarte biotiet.

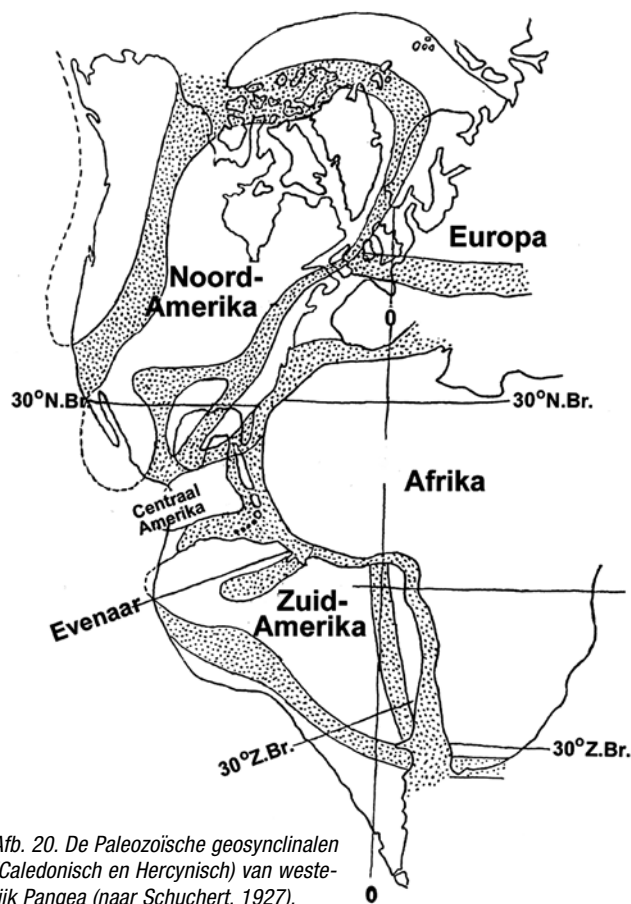
Door het wegzinken naar de diepte neemt de druk in de gesteenten toe. Deze druk is de 'gesteentedruk', ofwel de 'alzijdige druk', die in alle richtingen even sterk is. Deze druk kan nooit de gerichte, evenwijdige texturen in gesteenten veroorzaken. Daarvoor is een gerichte spanning noodzakelijk, dus een druk die in een bepaalde richting wordt uitgeoefend. Er werd aangenomen dat de krachten die bij het ineenklappen van de geosynclinale vrijkwamen voldoende waren om de gerichte - evenwijdige - texturen in de gesteenten te vormen, hoewel vele geologen er nooit helemaal gelukkig mee zijn geweest. Het bleek al snel dat voor de vorming van de gerichte texturen, zoals de slijting van de lei, de schistositeit van glimmerschist en de foliatie van gneis, een andersoortig en veel intensiever krachtenspel noodzakelijk is. Karakteristiek voor de theorie van de geosynclinale is dat de oceanbodem als onveranderlijk werd aangenomen terwijl het continent voortdurend veranderde doordat er in de loop van de geologische geschiedenis telkens op andere plaatsen weer geosynclinalen ontstonden. Afb. 20.

'Diving Dutchman'

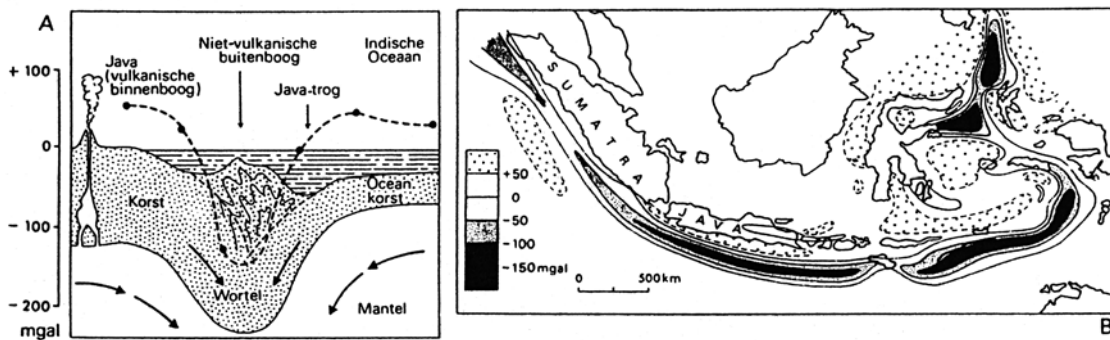
Nederlandse geologen behoorden lange tijd, tot aan het ein-

de van de jaren '60 van de afgelopen eeuw, tot de ferventste aanhangers van de geosynclinalen-theorie. De reden is dat een belangrijk deel van de argumentatie voor dit mechanisme werd ondersteund door het beroemde onderzoek dat tussen 1923 en 1930 werd uitgevoerd door de 'Diving Dutchman' Vening Meinesz, die in een onderzeeboot zwaartekrachtmetingen uitvoerde in Nederlands-Indië. Hij ontdekte een smalle strook met een duidelijk zwaartekrachttekort langs de eilandbogen van Sumatra, Java en de Kleine Soenda Eilanden. Dit zwaartekrachttekort zou zijn ontstaan door het naar beneden buigen van een dikke serie continentale aardkorstgesteenten, veelal dus sedimenten, te midden van de zwaardere gesteenten van de oceanbodem. Afb. 21.

Ook komen langs deze gehele boog van de Soenda Eilanden op vele plaatsen snelle opheffende bewegingen voor; op verschillende eilanden zijn verscheidene niveaus van opgeheven koraalriffen te zien. Dit gebied is dus in het licht van de geosynclinalen-theorie een gebergte in aanleg: de geosynclinale was dichtgevouwen en net begonnen aan de opheffing. De gehele eilandboog van Indonesië zou volgens deze visie het oostelijk vervolg van de geosynclinale van de Himalaya zijn, die reeds in een eerder stadium samengeknepen en opgeheven was.



Afb. 20. De Paleozoïsche geosynclinalen (Caledonisch en Hercynisch) van westelijk Pangea (naar Schuchert, 1927).



Afb. 21. A. Profiel door de diepe oceanische trog ten zuiden van Java waarin de relatie blijkt tussen topografie, de naar beneden geplooid aardkorst en de zwaartekrachtenanomalieën. B. De strook van negatieve zwaartekrachtenanomalieën in Indonesië. Naar Vening Meinesz, 1934.

Vergelijkbare metingen werden ook gedaan in het Caribische gebied langs de Antillen Eilanden met een vergelijkbaar resultaat.

Het mechanisme van de geosynclinale bergtevorming: convectiestromingen

In 1929 paste Arthur Holmes zijn ideeën over het bestaan van convectiestromingen in de aardmantel ook toe op de verklaring van de bewegingen van de aardkorst volgens de theorie van de geosynclinale. De convectiebeweging in de mantel ontstaat volgens Holmes door een onregelmatige verdeling van warmte. Op plaatsen waar zich heter mantelmateriaal bevindt, zal dit materiaal opstijgen. Op zijn weg naar boven zal het afkoelen, om vervolgens weer weg te zakken in de diepte. Deze naar boven en omlaag gerichte stroming van mantelmateriaal vormt een soort cirkelbeweging: een zogenaamde 'convectiecel'.

Op plaatsen waar twee convectiecellen elkaar raken en de stromingen naar elkaar toe bewegen (convergeren) nemen de naar beneden gerichte stromen van de convectiebeweging het mantelmateriaal naar de diepte mee. In deze convergentiezone zou de aardkorst dan als het ware worden meegetrokken, waardoor de langgerekte depressie van de geosynclinale ontstaat.

Het principe van de convectiestromen bleek uiteindelijk een onbevredigende verklaring te zijn. Een probleem was dat er bij de vorming van de geosynclinale rekkrachten in de aardkorst optreden, waardoor het onderzeese bazaltische magmatisme mogelijk is. Dit is wel voor te stellen boven een gebied van divergerende - uiteen bewegende - takken van twee convectiecellen. Op de plaats van de convergerende takken

van de conventiecellen daarentegen, zullen compressiekrachten optreden. Deze krachten zullen eventueel aanwezige scheuren die als toevoer van magma kunnen dienen, onmiddellijk dichtdrukken.

De geosynclinale zou aldus ontstaan boven twee uiteengaande takken van de convectiebewegingen. Dit gaf een ander probleem: de uiteengaande beweging van de twee takken van de convectiestroming zou dan 'toevallig' op het moment dat de geosynclinale instabiel wordt moeten stoppen of zelfs omkeren, om het 'dichtklappen' van de geosynclinale en daarmee de vorming van een plooiingsgordel mogelijk te maken.

Inmiddels is de theorie van het ontstaan van een plooiingsgebergte uit een geosynclinaal dalingsgebied volledig verlaten; het mechanisme is op Aarde nooit opgetreden. In veel moderne tekstboeken komt de term geosynclinale niet meer voor. De theorie van de geosynclinale wordt nu beschouwd als een historisch, gepasseerd stadium.

Slotwoord

In de jaren '60 van de afgelopen eeuw waren het de geofysici (de technisch geologen) - dus diegenen die een halve eeuw eerder Wegener kraakten - die teruggrepen naar de horizontale bewegingen als belangrijkste krachten voor bergtevorming. Hun bevindingen van de laatste halve eeuw maakten een stormachtige ontwikkeling door en hebben een revolutie in de geologische wetenschap teweeggebracht: de theorie die op het ogenblik de algemeen aanvaarde verklaring is voor alle grote structuren van de aardkorst en het aardoppervlak is de 'plaattektoniek'.

Deel I van dit artikel verscheen in *Gea* 2011, nr. 4.