

DET KONGELIGE DANSKE VIDENSKABERNES SELSKABS PJECE SERIE
GRUNDVIDENSKABEN I DAG

5



ARNE NOE-NYGAARD
JORDENS NYE ANSIGT

UDGIVET I SAMARBEJDE MED FOLKEUNIVERSITETETS BIBLIOTEK
AF FOLKEUNIVERSITETET I KØBENHAVN

1978

Redaktion:

professor, dr. phil. MOGENS BLEGVAD
administrator, dr. phil. ERIK DAL
professor, dr. phil. C. OVERGAARD NIELSEN

Redaktionssekretær:

cand. theol. N. J. CAPPELØRN

ARNE NOE-NYGAARD, professor i geologi, er født i 1908 og blev dr. phil. i 1937 på en disputats om vulkanbjergarter fra Jordens oldtid. Han blev professor i mineralogi ved Københavns universitet i 1942 og var indtil 1977 leder af dets mineralogisk-geologiske museum, fra 1969 som professor i dynamisk geologi. Noe-Nygaard har deltaget i talrige geologiske ekspeditioner til Grønland og Island og har forestået den geologiske kortlægning af Færøerne. I 1954 blev han medlem af Videnskabernes Selskab og i 1963 af Carlsbergfondets direktion; desuden er han medlem af en række inden- og udenlandske videnskabelige selskaber og var præsident for den XXI internationale geologkongres i København 1960.

Arne Noe-Nygaard har skrevet en del afhandlinger især om geologiske emner fra Nordatlanten, dertil en *Geologi* og en *Mineralogi* samt en populær bog om *Strandsten* fra 1959.

Forlag:

Folkeuniversitetet i København
Købmagergade 52
1150 København K

Arne Noe-Nygaard

JORDENS NYE ANSIGT

(„Pladetektoniken“s mosaik)

Forord

Der er sket noget skelsættende indenfor den geologiske fagkreds i løbet af den sidste snes år. Det er yderst sjældent, at en virkelig ny syntese opstår, men her møder vi én.

En halv snes samtidige videnskabsmænd har, gående ud fra vidt forskellige startpunkter, formået at give vor klode et nyt ansigt. Det er sket gennem fremsættelsen af et helt kompleks af nye teorier, som siden i samlet flok er gået op i en højere enhed, „pladetektonik“ kaldet. Ved dens hjælp er det blevet muligt at forklare et hobetal af observationer på en enkel og sammenhængende måde og at give en afgørende ny tydning af Jordens fysiske historie. Det vil jeg kort prøve at fortælle om.

Indledning

Jorden har meget nær form som en kugle, men er en lille smule fladtrykt ved polerne. Dens gennemsnitlige massefylde er 5.52 g/cm^3 og dens rumfang 1083 milliarder km^3 .

Da jordindret unddrager sig vor umiddelbare iagttagelse, har vi måttet gå omveje for at få lidt at vide om det. Det mest afgørende hjælpemiddel i disse bestræbelser har været jordskælvsbølgerne. Nu ligger det uden for denne artikels ramme at gøre nærmere rede for jordskælv, desuden ville det føre os for vidt omkring; men jeg må lige fortælle, hvad et jordskælv er, udover at det er et naturfænomen, der, som navnet siger, får Jorden til at skælve.

Jordskælv opstår, når der sker forskydninger langs brudflader inde i Jorden. Årsagen til, at sådanne forskydninger finder sted, er, at der til stadighed er omformende kræfter i virksomhed i Jorden. Når et materiale i én eller anden situation er for stift til at give efter for et tryk med det samme, spares der langsomt spændinger op, som til sidst udløses pludseligt, når disse har vokset sig store nok; derved får Jorden et chok, der ytrer sig som et jordskælv. Ved choket udsendes der fra arnestedet (focus) i alle retninger jordskælvsbølger, som er elastiske rumbølger.

Ved hjælp af jordskælvsbølgerne har man afsløret, at der i ca. 35 km's dybde under kontinenterne og i ca. 6 km's dybde under oceanbunden ligger en sammenhængende kugleflade, som vi nu for nemheds skyld blot kalder „Moho“ efter dens opdager A. Mohorovičić; den markerer grænsen mellem Jordens skorpe og Jordens „kappe“. I 2900 km's dybde har jordskælvsbølgerne afsløret tilstedeværelsen af endnu en kugleflade, der nedadtil adskiller kappen fra Jordens „kerne“. Den anses for at være flydende i sin ydre, men fast i sin indre del.

Det falder mig vanskeligt ikke at komme til at tænke på et æg, når jeg står med de oplysninger i hånden. Yderst ligger jordskorpen (æggeskallen), indenfor følger kappen

(æggehviden), som optager det største volumen, og inderst kernen (æggeblommen).

Jordskorpens materiale består dels af bjergarter, som vi møder overalt i kontinenterne – granit og gnejs samt vandaflejrede bjergarter, som sand-, ler- og kalksten – dels af dem, som oceanbunden består af, hvor den er blottet ρ : basalt, som vi kan fiske prøver op af. Kappen er sammensat af tunge silikatminerale, som vi nu og da ved de vulkanudbrud, som udgår fra særligt stort dyb, kan få klumper bragt med op af til jordoverfladen. Jordens gennemsnitlige massefylde forlanger, at der må være et endnu tungere materiale tilstede i kernen, som næppe nogensinde vil blive direkte tilgængeligt for studium. Materialet må være metallisk, og man går sikkert ikke meget galt i byen ved at antage, at det består af jern og nikkel, som jernmeteoriterne gør det.

Kun så meget om Jordens indre; vi vil give os i lag med det, der ligger os nærmest, jordskorpen.

Pladetektonikens forløber – Wegeners teori

Betragter man kysterne på de to sider af Atlanterhavet, bliver man slået af, hvor godt de ville passe ind i hinanden, dersom Sydatlanten blev lukket sammen. Ikke alene svarer det store, retvinklede knæk på den brasilianske kyst ved Kap San Roque ind i bugten ved Kamerun på Afrika-siden, men også syd for disse to korresponderende punkter svarer ethvert fremspring på den brasilianske side til en modsvarende bugt på den afrikanske, omvendt passer hver eneste bugt på den brasilianske side ind i et fremspring på den afrikanske, og tegner man de to kyster ind på en globus, bliver man slået af, hvor ganske nøje disse størrelser stemmer overens.

Det er i virkeligheden denne enkle iagttagelse, der er udgangspunktet for den nye betragtning af Jorden, som de efterfølgende sider handler om, idet iagttagelsen leder direkte frem til den forestilling, at der på én eller anden måde må have fundet store horizontale bevægelser sted i jordskorpen, d.v.s. bevægelser, som er tangentielle i forhold til Jorden.

Selvom adskillige forskere igennem tiderne havde fæstet sig ved det overensstemmende kystforløb i det sydlige Atlanterhav, var de tanker, de havde gjort sig i den anledning dog meget vage.

Mest med sagen at gøre har amerikaneren F. B. Taylor, der først i dette århundrede i et lille skrift, hvis udgivelse han selv bekostede, fremsatte den idé, at hovedparten af Jordens landområder i sen geologisk tid havde bevæget sig i retning mod Ækvator og derved havde presset Tertiærtidens foldebjerge, som f. eks. Alperne og Himalaya op foran sig. I hans hypotese indgik endvidere, at Atlanterhavet måtte have åbnet sig på langs efter en linje, der udsprang ved Kap Farvel i Grønland og sydpå kunne spores i den midtatlantiske højderyg. Selvom en udvidet artikel i 1910 fandt vej til *Bull. of the Geol. Soc. of America* om emnet, vandt ideen dog ikke meget gehør. I Europa var den ukendt, også for Wegener, som nu skal omtales.

Den tyskfødte videnskabsmand, professor Alfred Wegener blev den første, der formulerede en samlet teori, der er forløberen for nutidens begreb, „pladetektonik“. Jeg

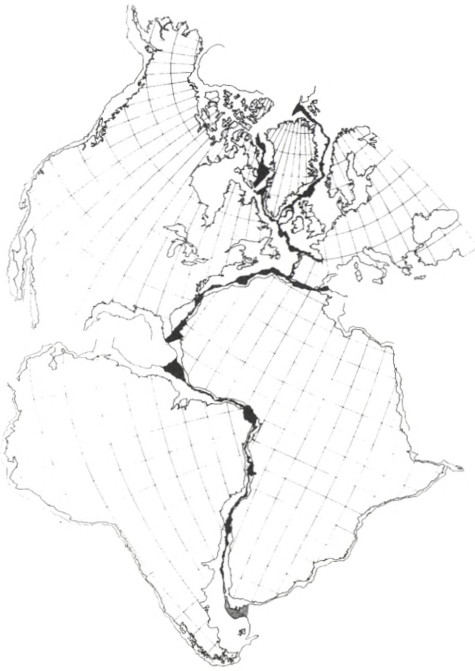


Fig. 1. „Det sammenpressede Atlanterhav“. Figuren viser, hvorledes dets to sider passer sammen langs med 500-favnens kurven. Den til grund liggende beregning er foretaget af computercentralen ved Cambridge University. De skraverede områder på figuren angiver overgribende, de sorte manglende strimler land. Bredde- og længdegrader henviser til kontinenternes nuværende orientering.

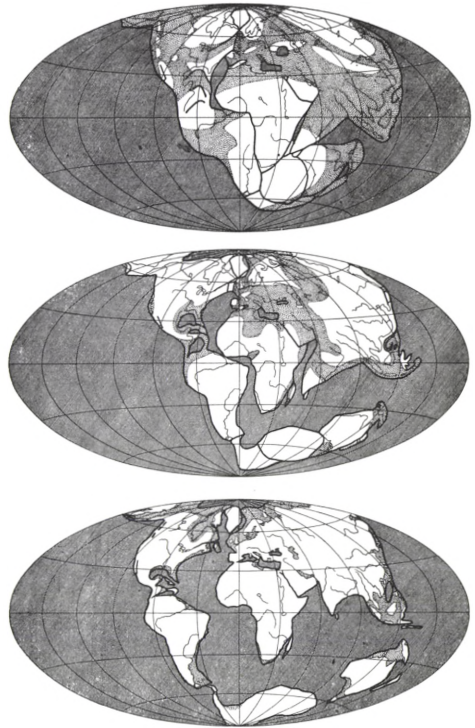


Fig. 2. Rekonstruktion af jordkortet for tre jordperioder efter Wegeners teori. Øverst = yngre kultid (Carbon), midterst = ældre Tertiær (Eocæn) og nederst = gammel Kvartær. Gradnettet svarer til det nuværende Afrika og er således vilkårligt valgt. Det mørkt skraverede viser dybsø, den lysere priksignatur fladsø.

vil opholde mig lidt ved manden og hans tumlen med problemet omkring muligheden for en horizontal bevægelse af store landmasser i jordskorpen.

Wegener var født i Berlin i 1880 som yngste søn af en protestantisk præst. Fra 1906 til 08 deltog han i „Danmarksekspeditionen“ til Nordøstgrønland som meteorolog; i 1912–13 foretog han sammen med oberst I. P. Koch rejsen tværs over Grønlands indlandsis.

Så tidligt som i 1910 var Wegener blevet betaget af kongruensen af det atlantiske kystlinjeforløb, men slog hurtigt tanken om en tidligere direkte sammenhæng af hovedet som værende for usandsynlig. Året efter fik han imidlertid ved et tilfælde et samlereferat i hænde, som omhandlede de paleontologiske resultater af nogle under-

søgelse, der vedrørte en formodet tidligere landforbindelse mellem Brasilien og Afrika. Dette referat gav stødet til, at han igen tog tanken op og selv begyndte at sætte sig nærmere ind i den geologiske litteratur; han var, som nævnt, geofysiker af uddannelse. Arbejdet med litteraturen ledte ham gradvis frem til den overbevisning, at man ikke kunne komme uden om, at grundideen om en tidligere, nær sammenhæng mellem de to nu adskilte kontinenter, Afrika og Syd-Amerika, måtte være rigtig. Den 6. januar 1912 forelagde han første gang dette synspunkt i et foredrag i den geologiske forening i Frankfurt a.M. Samme år offentliggjorde han i Petermanns Mitteilungen en lille afhandling på 10 sider om emnet.

Hans efterfølgende deltagelse i Grønlands-ekspeditionen med I. P. Koch samt hans indkaldelse til soldatertjeneste i den første verdenskrig satte et foreløbigt punktum for hans videre beskæftigelse med tanken.

En langvarig sygeorlov under krigen 1914–18, i hvilken han blev såret to gange, gav ham imidlertid mulighed for atter at tage den op, og i 1915 udsendte han første udgave af en lille bog med titlen *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (Vieweg no. 23).

Det blev i første række det kontinentale Europas videnskabsmænd, der tog del i debatten, for eller imod „Wegeners teori“. Den engelsktalende del af verden kom først senere med; der måtte en engelsk oversættelse af bogen til i tyverne for at engagere den i problemet. Noget større indpas vandt teorien dog aldrig dér, bl. a. udgjorde autoriteten Jeffreys *The Earth* et solidt bolværk mod vranglære.

Når Wegeners teori led skibbrud til trods for, at den fik udbredt tilslutning blandt geologer i mange lande, og ikke mindst blandt zoologer og botanikere, der arbejdede med den nulevende dyre- og planteverden, skyldtes det en hård, enig afvisning fra geofysisk side.

Wegener antog nemlig, at fastlandenes horizontale bevægelse havde sin rod i to kræfter, som han benævnte „polflugten“ og „vestdriften“, og som han mente var forårsaget af Jordens rotation. Tillige mente han, at kontinentmasserne omtrent som isbjerger i vand var forsænket i oceanbundens tungere materiale, i hvilket de kunne bevæge sig frit horizontalt.

Geofysikernes indvendinger var, at de bevægende kræfter, der blev forudsat, var flere størrelsesordener for svage, samt at jordskorpens fysiske egenskaber, først og fremmest dens stivhed, som var kendt gennem jordskælvsmålinger, ikke tillod de antagne vandringer af kontinentmasserne.

Selvom Wegener uden ringeste indskrænkning har indlagt sig den største fortjeneste ved som pioneren at begynde at gå den vej, der tilsidst skulle føre til målet – i hvert fald det foreløbige mål – blev han ikke skånet for modgang. Dels var skeptikere og modstandere undertiden groft usaglige og desuden indbyrdes helt uenige i deres kritik af hans teori, dels fik han – måske på grund af den – vanskeligheder med at sikre sig en akademisk status overhovedet. I sit hjemland opnåede han således trods flere forsøg ikke at få et professorat, heller ikke Københavns universitet (ved hvilket han søgte et ledigt professorat i geografi) fandt ham værdig til ét, til

trods for, at han foruden sin uomtvistelige og alsidige videnskabelige formåen mestrede det danske sprog fortræffeligt (jeg har personligt oplevet at tale med ham på Dansk sidst i tyverne). Til sidst blev han professor i Graz i Østrig. Hans „fejl“ var utvivlsomt, at han arbejdede inspireret kvalitativt, i modsætning til de udpræget kvantitativt tænkende geofysikere, og at hans interesser spændte over for stort et antal naturvidenskabelige discipliner på én gang.

Som man måske husker, satte han livet til som leder af den sidste forsyningsekspedition til kammeraterne på station „Eismitte“ på Grønlands indlandsis i 1930.

Vi vil forlade Wegener her med at lade figur 2 anskueliggøre den mosaik af fastlande, der efter hans opfattelse i løbet af geologisk set sen tid havde bevæget sig bort fra hinanden for i dag at indtage den beliggenhed, som vi alle er fortrolige med.

Wegener-teoriens tro tilhængere

Geofysikernes indvendinger mod „mekanikken“ i kontinentvandringshypotesen var ikke til at komme udenom.

Der var imidlertid sat så mange tanker igang takket være Wegeners teori, at geologerne ustandseligt under deres arbejde fandt ting, der talte for rigtigheden af den grundlæggende idé i den om en tangential bevægelse i Jorden. Stærkest kom disse tanker til at præge studiet af en gruppe aflejringer, der var blevet påvirket af en gammel istid fra Jordens oldtid, og som kun fandtes på den sydlige halvkugle.

Aflejringerne fra denne gamle istid omfattede såvel egentlige moræne- og smeltevandsprodukter, som sedimenter med et indhold af plante- og dyreformer, der måtte have levet under tempererede klimaforhold. De findes i dag så spredt fordelt på Jorden som i Sydamerika, Sydafrika, Indien og Australien, og hvad mere er, de bevarede gamle plante- og dyrerester viser et udpræget indbyrdes slægtskab over hele dette område.

Bedst ville man kunne forklare de spredte forekomster, der viser så stor indbyrdes overensstemmelse, ved at antage, at de var dele af et éngang sammenhængende stort kontinent, „Gondwana“, der foruden de nævnte landområder også omfattede Antarktis.

En af de stærkeste forkæmpere for et sådant samlet sydkontinents eksistens blev den sydafrikanske geolog A. L. Du Toit. De gjorde geologiske observationer talte alle for, at en éngang sammenhængende landmasse var blevet splittet op og siden spredt; men den geofysiske mur af modstand var uigennemtrængelig. Det var derfor ikke noget under, at en gruppe geologer af alle kræfter begyndte at løbe storm imod den. Ingen havde dog held med sig. Jeg skal fra denne periode blot fremdrage ét enkelt, nu historisk eksempel.

Karakteristisk nok blev det igen en geolog fra den sydlige halvkugle, S. W. Carey fra Hobart på Tasmanien, selv beboer af et stykke af det formodede Gondwanaland, der lagde sig i selen for en ny teori, „ballonhypotesen“. Den antog, at Jorden til stidighed udvidede sig, omtrent som når en gasballon pustes op. Den formodede udvi-

delse af Jorden ville, tænkte man sig, trække kontinenterne ud fra hinanden, så at der kunne dannes oceaner imellem dem. På denne måde undgik man at skulle have et kontinent til at „sejle“ i et materiale, der var stivere end det selv, således som Wegener-teorien havde måttet forudsætte.

Carey gik så langt som til at antage, at den unge Jord havde haft en diameter, der var mindre end det halve af den nuværende og en kugleoverflade, der var under en fjerdedel af det areal, Jorden i dag har. Derved blev det muligt at forestille sig, at Jorden til at begynde med var helt omgivet af kontinentskorpe.

Så vidt, så godt; men hvorledes skaffe bevis for, at Jorden faktisk udvidede sig? Carey forestillede sig, at Jorden i begyndelsen var kold, og dernæst ved kompressionsvarme opvarmede sig selv. En udvidelse ville blive følgen, måske ville den blive yderligere forstærket ved, at noget af materialet ville gå over i luftform.

Det blev ikke vanskeligt at fælde ballon-teorien. Jordens størrelse synes ikke at have forandret sig måleligt. En kæmpeudvidelse af den i lighed med den, Carey bl. a. gennem faseforandringer forestillede sig, er i alle tilfælde utænkkelig. Når jeg har omtalt denne teori, er det, fordi den kan tjene som eksempel på de anstrengelser geologerne gjorde sig for at komme forbi den geofysiske forhindring, der hele tiden stillede sig i vejen for den tydning af forholdene, som så mange af deres observationer syntes at pege henimod som værende rigtig.

Nye veje

Det blev ikke en fortsat, stædig søgen efter beviser for en enkelt teoris holdbarhed, der bragte sagen videre.

De geologer, der tog stilling til Wegeners teori, delte sig vel nok i to lejre, én for og én imod, men mange andre arbejdede i områder af faget, som ikke indbød særlig til at sysselsætte sig med kontinentalvandring, og de beskæftigede sig derfor heller ikke med dem. Under den anden verdenskrig fik man desuden andet at tænke på.

Ikke før i halvtredserne begyndte Jorden selv uimodståeligt at åbne for nye, hidtil ukendte træk i sin opbygning og udvikling. Dem vil vi prøve at se på.

Pionererne i denne epokes opdagelser kom såvel fra geologisk som fra geofysisk side. De færreste af sidstnævnte havde forud interesseret sig nævneværdigt for „kontinentalvandring“; de gik blot igang med at arbejde videnskabeligt igen, da krigens mest umiddelbare følger var overstået. På flere arbejdsområder var imidlertid nye hjælpemidler i mellemtiden dukket op, og de fik afgørende betydning. Jeg skal i forbifarten nævne to ting: Den forfinede lokaliseringsmulighed på det åbne hav takket være helt nyt instrumentel og udviklingen af de elektroniske regnemaskiner.

Fra ganske forskelligt hold gjordes nye opdagelser, der på fængslende måde føjede sig ind i hinanden, så at de tilsidst kom til at danne et fællesmønster, som ingen havde drømt om eksistensen af fra begyndelsen. Et helt nyt billede af Jorden tonede efterhånden frem; det blev i erkendelsesmæssig henseende til intet mindre end en geologisk revolution.

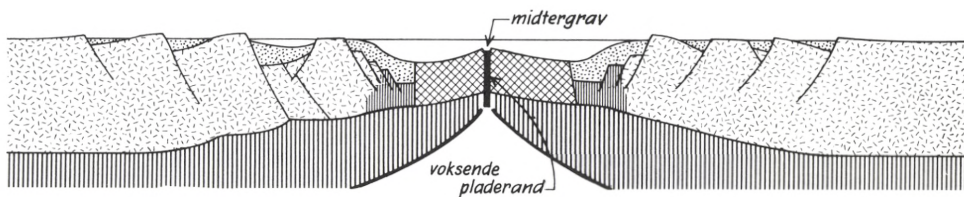


Fig. 3. Skematisk snit gennem den midtatlantiske ryg, således som den muligvis er opbygget. Her efter Troels Østergaard.

Jeg vil begynde med havbundsgeologien, men iøvrigt i den videre fremstilling ikke tage de andre enkeltemner, der har betydning, slavisk hver for sig, men derimod gå nogenlunde kronologisk til værks. På den måde vil det forhåbentlig fremgå, at der meldte sig mange forskellige indfaldsveje, der kom til indbyrdes at påvirke og inspirere hinanden under skabelsen af det nye begreb „pladetektonik“.

Havbunden

Ikke for ingenting er 70 % af jordoverfladen dækket af hav; og det man vidste om, hvad der skjulte sig under det, var indtil for nylig kun uendelig lidt. Med stormskridt er man nu, takket være de nye hjælpemidler, gået frem i udforskningen af oceanernes bund, og gevinsten har været meget stor, idet vor viden om oceanbunden er blevet så stærkt udvidet gennem den sidste snes år, at det har kastet afgørende nyt lys over Jordens geologi som helhed.

Lad os påny, som Wegener gjorde, tage udgangspunkt i Atlanterhavet. Midt gennem dette løber der en undersøisk højderyg, der rejser sig omkring 2 km over den omgivende havbund. Man har foretaget meget detaljerede målinger af dens topografiske form og derigennem fundet, at den betragtet på tværs falder i to næsten symmetriske halvdele, der adskilles af en smal længdedal, der kan være 1 km, men i hvert fald de fleste steder er 5–600 m dyb og fra nogle få hundrede meter kan blive kilometer bred. Denne midtoceaniske ryg, der løber på langs gennem hele Atlanterhavet, har form som et S.

Ser man nærmere på den, er det imidlertid iøjnefaldende, at ryggens højestliggende (d.v.s. aksiale) parti og længdedalen i den ikke fremtræder som „bøjede“ på de steder, hvor ryggen skifter retning, men derimod følger dens krumning som mindre, „knækkede“, retlinjede stykker, der er forskudt i forhold til hinanden langs tværgående brudlinjer (fig. 4).

Man har længe været klar over, at der var noget særligt ved den midtatlantiske ryg; bl. a. ligger der en mængde aktive vulkaner på den, af hvilke man fra nord til syd kan nævne Jan Mayen, Island, Ascension og Tristan da Cunha.

Hertil kommer nu, at den stigende nøjagtighed i stedfæstelsen af jordskælv klart har vist, at de fleste jordskælv i Atlanterhavet finder sted netop under oceanryggens

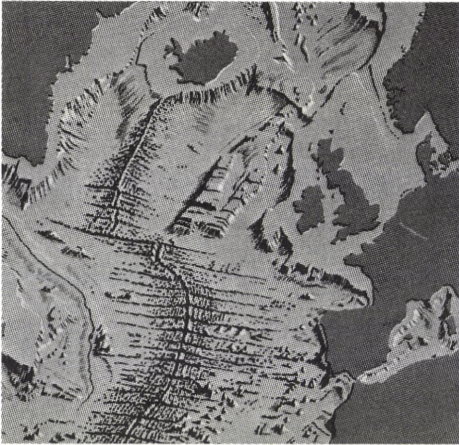
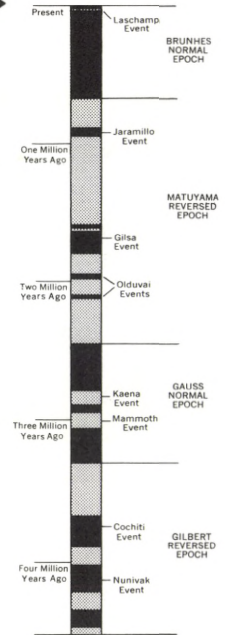


Fig. 4. Den midatlantiske rygts nordlige del. Forenklet efter Nat. Geogr. Mag.

Fig. 5. Geomagnetisk → målestok for variationen mellem normal og revers magnetisme gennem nogle millioner år. Sort angiver normal, grå revers magnetisering. Det viste søjlestykke af tidsskalaen dækker 4 magnetiske epoker, der har fået egne navne, henholdsvis: Brunhes, Matuyama, Gauss og Gilbert.



højstliggende del samt under de centrale dele af de brudlinjer, som skærer den på tværs.

Yderligere har man gennem de seneste år ved direkte målinger fundet ud af, at der sker en ekstraordinær udstrømning af varme netop på den oceaniske ryg. Varmeudstrømningen (der måles i mikrokalorier pr. sekund pr. cm^2) kan på oceanryggen stige til det ottedobbelte af den normale værdi på havbunden.

Såvel tilstedeværelsen af de mange virksomme vulkaner på oceanryggen som den forøgede varemudstrømning røber, at der må befinde sig varmt materiale neden under den. I samme retning peger det, at bølgerne fra jordskælvenes „første forløber“ (P-bølgerne) forplanter sig meget langsommere under den midatlantiske ryg end udenfor. Det tyder man på den måde, at man antager, at en lokal opvarmning medfører „blødgøring“ af materialet, således at det derved taber i elasticitet og får sværere ved at lade jordskælvsbølgerne passere igennem. At der til stadighed hersker „uro“ i oceanrygssystemet er alene jordskælvenes hyppighed et udtryk for.

Svarende til den midtoceaniske ryg i Atlanterhavet finder vi den østpacifiske ryg i Stillehavet og Carlsbergryggen i Det indiske Ocean; dem kommer vi siden til.

Paleomagnetisme

Vi vil forlade den midatlantiske ryg og gøre en afstikker til magnetismens verden og dér stoppe op ved den „gamle“ magnetisme (paleomagnetismen).

Alle magnetiske materialer passerer, når de ophedes, et punkt, Curie-punktet, oven over hvilket de taber deres magnetisme og bliver umagnetiske. Omvendt vil, i naturen, en lava, der ved sin fremtrængning er rød- eller hvidglødende til at begynde med ikke være magnetisk, men bliver det først, når den afkøles tilstrækkeligt. Den lava, vi i naturen har med at gøre på havbunden, er basalt, og i denne er det små korn af mineralet magnetit = magnetjernsten (Fe_3O_4), der er bærere af magnetismen. Når lavaen fra en temperatur på over 1000°C under afkølingen passerer magnetitens Curie-punkt, der ligger på ca. 520°C , bliver den magnetiseret. Nu kommer det spændende: Magnetiseringen sker i overensstemmelse med det jordmagnetiske felts krav på det pågældende tidspunkt og på det pågældende sted af Jorden, og den magnetiske bjergart kan blive ved med at „huske“ dette. Derfor kan vi gennem måling af den tilbageværende (remanente) magnetisme i en prøve genskabe et billede af den magnetiske situation, som den var på stedet, da lavaen blev dannet.

Rækkevidden af dette gik først gradvis op for videnskabsmændene, fordi geofysikere og geologer i begyndelsen ikke havde lært at tale rigtigt sammen; de talte endnu ligesom hver sit sprog og ud fra delvis forskellige forudsætninger.

Magnetismen på havbunden

I begyndelsen af halvtredserne gik man forsøgsvis i gang med at slæbe et specialindrettet magnetometer efter et sejrende skib i en sådan afstand, at det var uden for påvirkning af skibet selv. Målinger af denne art blev efterhånden gjort til simpel rutine, men man må vist sige, at de opnåede registreringsresultater i begyndelsen ikke var særlig ophidsende. Én ting kom der dog ud af det; man lagde mærke til, at hver gang et måleskib passerede centerlinjen på den midtatlantiske ryg, viste der sig en udpræget top på den magnetiske styrkeskala.

I 1955 gennemførte så U. S. Coast and Geodetic Survey en meget nøjagtig kortlægning af havbunden i det østlige Stillehav efter en forudlagt, meget stram plan. Undersøgelsesskibet „Pioneer“ skulle sejle målelinjer med en indbyrdes afstand af 8 km og med så præcis en øst-vestlig linjeføring, som indenfor 150 m til siden; dette var blevet muligt takket være anvendelsen af LORAN i navigationen. På dette måletoget blev nogle af de videnskabsmænd, der hidtil havde arbejdet med paleomagnetisme på tørt land fra Scrippes Institute inviteret med, og så begyndte der at ske noget.

Da man efter toget kom hjem med de omfangsrige registreringsdata til laboratoriet, var et computerapparat blevet udviklet til at tage materialet under behandling. En besøgende engelsk videnskabsmand R. M. Mason indtegnede derefter variationen i den magnetiske intensitet langs målelinjerne på et kort omtrent på samme måde, som når man anvender højdekurver i et topografisk kort over et landskab. Derved dukkede der et overraskende billede op. Hele kortet kom til at fremtræde med parallelle, „magnetiske bakkestrøg og mellemliggende dale“ (fig. 6). Aldrig tidligere havde man mødt et lineært mønster på jordoverfladen af en sådan ensartethed og et sådant omfang, men hvad betød det mon?

„Normal“ og „revers“ magnetisering

Paleomagnetiske målinger havde hidtil primært været bragt i anvendelse for at få slået fast, hvorledes et bestemt landområde havde forholdt sig til de magnetiske poler ned gennem Jordens historie.

Ved regelmæssigt arbejde med paleomagnetiske målinger opdagede man overraskende, at magnetiseringen af en del lavastrømme, uden at man forstod hvorfor, var lige omvendt af den, man skulle forvente. Kort og godt, de pegede med nordretningen mod Sypolen og omvendt sydretningen mod Nordpolen. Det sundede man sig først lidt på, men fortsatte ufortrødent målingerne og fandt efterhånden ud af, at iagttagelsen dækkede en realitet, samt at den eneste mulige forklaring måtte være, at Jordens magnetiske poler engang imellem havde byttet plads. Det betød, at lavaer med „revers“ (omvendt) magnetisering var trængt frem i perioder, i hvilke Jordens magnetiske poler havde haft modsat orientering af i dag; vor nuværende situation i magnetisk henseende kalder vi for „normal“. Sml. fig. 5.

Efter at denne iagttagelse var blevet tolket, gik man videre med at måle magnetiseringen af de enkelte lavabænke i tykke lavaserier og dér finde omslagene i magnetiseringsretningerne, idet man hurtigt indså, at de måtte kunne anvendes som en „geomagnetisk“ tidsskala, som ville have den fortræffelige egenskab, at den registrerede en hændelse, der indtraf på nøjagtig samme tid over hele Jorden.

De magnetiske bånd på Stillehavets bund

Det lineære mønster fra det østlige Stillehav havde været en sensationel opdagelse, bl. a. fordi ingen endnu evnede at forklare det. Men det ansprede videnskabsmændene fra Scripps Institute til at fortsætte med at sejle frem og tilbage med deres instrumenter endnu et år, indtil de havde dækket en havstrækning på 2000 km i længden og flere hundrede km i bredden. Stadigvæk kom det samme sribede magnetiske mønster frem med sine bælter, der viste henholdsvis „over gennemsnittet“ og „under gennemsnittet“. Nogen steder kunne man klart se, at øst-vestløbende forskydninger havde brudt mønsteret, så at den ene del af det lå forskudt i forhold til den anden. Den største sideforskydning af denne art, er Mendocinoforkastningen, der beløber sig til mere end 1000 km (fig. 6).

Omtrent på samme tid, d. v. s. sidst i halvtredserne, havde man nået at få et klart billede af, at de midtoceaniske rygge Jorden over udgjorde et verdensomspændende netværk. Ved at betragte de steder af havbunden, hvor såvel forløbet af oceanryggen som af det gådefulde magnetiske mønster var kendt, faldt det A. D. Raff i øjnene, at de magnetiske striber lå parallelt med oceanryggen, hvilket kunne betyde, at de to ting havde noget med hinanden at gøre; men sribernes betydning forblev stadigvæk en uopklaret gåde.

Næste skridt til forståelse af sribemønsteret kom fra Det indiske Ocean, hvor det britiske havundersøgelsesskib „HMS Owen“ på Sir Edward Bullards opfordring fore-



← Fig. 6. Det magnetiske mønster på en strækning af Stillehavets bund er indtegnet på grundlag af data, som blev indsamlet i årene 1955–56. De rette linjer er brudlinjer langs med hvilke, der er sket en forskydning af det magnetiske mønster. (Symmetrien på begge sider af Juan de Fuca ryggen blev af Vine og Wilson anset for at være bevis for, at der ud fra den var sket en havbunds-spredning i overensstemmelse med Hess' antagelse). De sorte striber angiver magnetintensitet over, de hvide under gennemsnittet. (Efter A. D. Raff og R. G. Mason 1961).

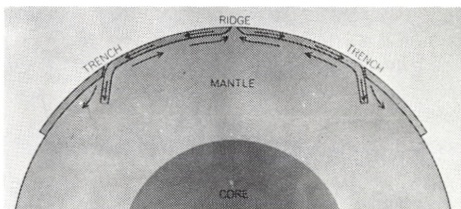


Fig. 7. En mulig konvektionsmodel for Jorden. Den viser én oceanisk ryg og to „Benioffzoner“. Her efter „The Scientific American“.

tog en indgående magnetisk opmåling af et område på 40×50 sømil på Carlsbergryggen (tidligere påvist og navngivet af den danske Dana-ekspedition). De måleresultater, som D. H. Matthews bragte med hjem, blev computer-behandlet af F. J. Vine.

Konvektionsstrømme og oceanbundsspredning

Før vi tager fat på resultaterne fra Det indiske Hav, må vi gøre en afstikker til et par af de andre felter af oceanbundsundersøgelserne, der i disse år foregik med fuld styrke. En af drivkræfterne her var H. H. Hess, Princeton. Som ung student havde han været med Hollands store havforsker F. A. Vening Meinesz i indonesiske farvande, senere, som tjenstgørende søofficer under den anden verdenskrig (til sidst med rang af kontreadmiral), havde han sejlet det vestlige Stillehav tyndt med forstærkninger til general McArthur under det japanske tilbagetog – og med gode instrumenter til lokalisering og dybdemåling. Men han kunne mere end sejle; han havde taget forestillingen om aktive konvektionsstrømme i Jorden med sig fra Vening Meinesz, der især havde arbejdet intensivt med tyngdeforholdene langs Sumatras og Javas kyster. Et stærkt indtryk gjorde desuden en ny ting på ham, nemlig resultaterne fra det tiltagende antal målinger af varmeudstrømningen fra oceanbunden og fra oceanryggene.

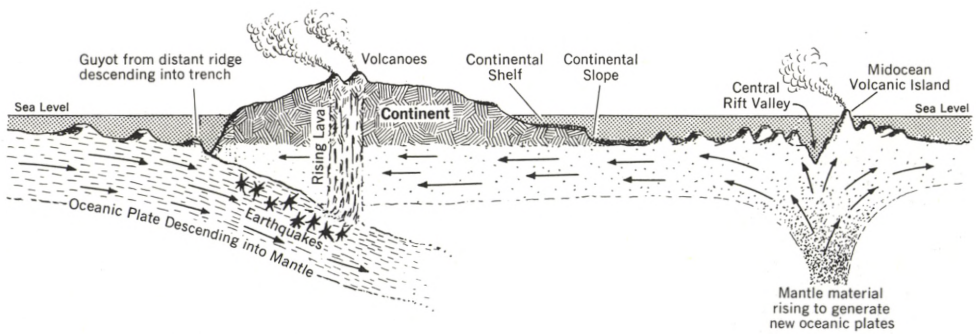


Fig. 8. Skematisk billede af „havbundsspredning“, som H. H. Hess tænkte sig den. Langs en midtoceanisk ryg (til højre) dannes der ved opstrømsstedet ny havbund, medens gammel havbund (til venstre) til gengæld glider ned under en kontinentrand eller en øbue og går til grunde. I den derved opståede nedadskrånende grænseflade mellem en „oceanisk“ og en „kontinental“ plade udløses jordskælv og vulkansk aktivitet. Længere fremme i artiklen er denne omtalt som Benioff-zonen.

Der, hvor opstrømmene fra den (antagne) indre konvektion fandt sted, måtte de i form af varme kunne erkendes på jordoverfladen. Var det måske ikke netop det, man nu fandt i de oceaniske rygge?

Hess havde yderligere det på hjerte, ja det var blevet en overbevisning hos ham, at oceanbunden simpelthen udgjorde en helt anden verden end kontinenterne. I intet af de store have, havde man fremdraget forsteningsførende lag, der oversteg ca. 200 millioner år i alder, medens kontinenterne kunne opvise bjergarter, der var mere end 3 milliarder år! Kort sagt: Kontinenterne er ældgamle, oceanerne er unge. Hvorfor er det da således? Jo, fordi der til stadighed bliver tilført varme og dannet ny havbund, dér hvor opstrømmene nedefra når frem til overfladen ved de oceaniske rygge. Herfra udgik der med andre ord en impuls til den spredning, som han gav navnet „oceanbundsspredning“ – et nyt geologisk begreb.

Hvad begrebet indebar, var man i begyndelsen næppe helt klar over. Hess var petrograf og arbejdede med de bjergarter, som han søgte og for en del fandt; han var i begyndelsen ikke engageret i spørgsmålet om „kontinentalbevægelser“. Ikke desto mindre stod han med dét i hånden, som Wegener havde savnet, og kunne uden besvær sige: De tangentielle bevægelser må være reelle nok, men de udgår fra de oceaniske rygge; desuden er det ikke bare kontinenter, men både oceaner og kontinenter, der skifter plads.

Hess forestillede sig, at havbunden bestod direkte af „kappemateriale“, der kun var dækket af et tyndt tæppe af havbundssedimenter.

Målingerne på Carlsbergryggen, og hvad de medførte

Vi vender tilbage til Vine og hans computerarbejde med Matthew's data fra Det indiske Ocean. En af de første ting, han rendte ind i, var, at én af vulkanerne på

havbunden dér (et såkaldt „seamount“) var omvendt magnetiseret. Han regnede ud, at det godt kunne forholde sig rigtigt, dersom vulkanen var blevet dannet i en periode, i hvilken Jordens magnetfelt var reverst; men han standsede ikke ved det.

Hvis det nu var en rigtig formodning, og hvis man videre antog, at teorien om havbundsspredning, som Hess netop havde fremført, også var det, så ville man kunne overføre iagttagelsen fra den enkelte submarine vulkan til oceanryggen selv og gå ud fra, at det vulkanske materiale, der blev født på den og siden afkøledes og antog magnetisk orientering, ville modtage det magnetiske præg, som øjeblikkets jordmagnetiske situation satte på det. Vine sluttede videre: Når så dette „magnetbånd“ var blevet splittet på langs og skubbet til side ud på havbunden af nyt materiale, der trængte op langs dets midte i oceanryggen, så ville også dette antage præg af det herskende jordmagnetiske felt.

Videre „gættede“ han, at dersom nu feltet senere blev reverst, ville dets magnetiske præg blive vendt om. Virkningen af denne proces ville så efter en række reversalier føre til, at der dannedes en serie magnetbånd med skiftende magnetisk polaritet på havbunden, parallelt med oceanryggen.

I 1963 foreslog derefter Vine og Matthews på grundlag af deres materiale fra Det indiske Ocean, at det drejede sig om ca. 50 % af oceanskorpen, der var omvendt magnetiseret! Dermed antydede de, at oceanbunden verden over burde vise parallelle striber med skiftende normal og revers magnetisering. Når denne antagelse ikke straks kunne bekræftes eller afkræftes, skyldes det simpelthen, at det kun var ganske få og små stumper havbund, som dengang endnu var kendt.

I begyndelsen af året 1965 blev der i Cambridge taget et nyt skridt. Da mødtes nemlig Vine og Matthews med Tuzo Wilson fra Toronto i Canada og H. H. Hess, der havde friår fra Princeton. Hess blev fyr og flamme for Vines og Matthews' idé, der passede så glimrende sammen med hans egen opfattelse af havbundsspredningen. Han så for sig, hvorledes man, når man gennem studiet af boreprøver fra havbunden havde lært alderen at kende på nogle få magnetiske striber, ville være i stand til at bestemme alderen af en hvilken som helst anden del af et ocean blot ved at tælle magnetbåndsstriber på kortet, som man kan tælle årringe i en træstamme.

Under deres samtaler gjorde Vine og Wilson sig endvidere klart, at hvis det var rigtigt, at de lange magnetiske bånd blev skabt på oceanryggen, så måtte det mønster, de frembragte, være ens på begge dens sider, altså være spejlbilleder af hinanden. Der var som nævnt kun kendt få oceanbundsområder dengang, men i Juan de Fuca ryggen i Stillehavet så de den symmetri, de ledte efter, virkeliggjort, selvom den på grund af de mange brudzoner, der skærer den, ikke i dag forekommer særlig klart overskuelig (fig. 6).

Omtrent på samme tid var klargørelsen af Jordens magnetiske historie på landjorden, altså magnetfeltets skiften fra normal til revers, for de sidste 3–4 millioner år ved at være klarlagt.

Følgelig tog Vine og Wilson sig for at se, om denne magnetiske tidstabel kunne ses

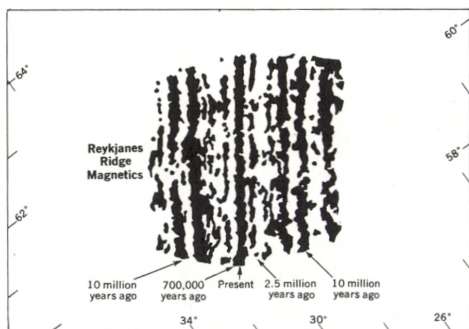


Fig. 9. Det magnetiske mønster på begge sider af Reykjanesryggen.

afspejlet i den relative bredde af de magnetiske striber på begge sider af oceanryggen. De „lagde“ så at sige den lodrette magnetiske tidssøjle fra landjorden „ned“ på havbunden.

Tilskyndet af Hess antog de, at magnetismen befandt sig i et temmelig tyndt basaltlag på selve havbunden, og de regnede forsøgsvis med, at oceanbundsspredningen på hver side af ryggen beløb sig til ca. 2 cm om året. Det magnetiske profil, der kom ud af deres regnestykke kom til at antage en slående lighed med det, man i naturen havde målt sig til.

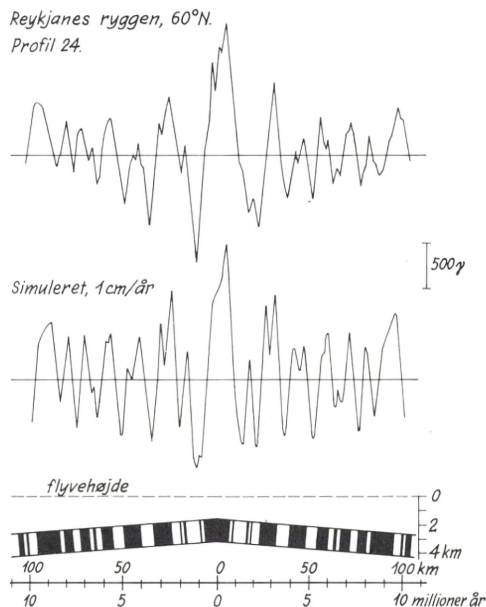
Tilbage til Atlanten

Samme år, som briterne arbejdede fra skib på Carlsbergryggen i Det indiske Ocean, lykkedes det J. Heirtzler fra Lamont Observatory at overtale U.S. Navy til med fly, udstyret med magnetisk apparatur at udføre en måleserie i det nordlige Atlanterhav, dels for at se, hvorvidt Atlanterhavets oceanryg lignede den, man havde fundet i det østlige Stillehav, dels fordi en række tidligere målinger fra skib havde vist, at der var en kraftig magnetisk anomali på Reykjanesryggen. Resultatet som gengives her som fig. 9 viser et bemærkelsesværdigt symmetrisk billede af de magnetiske striber på begge sider af ryggen, således som det kom frem ved udtegningen af ca. 50 overflyvninger af den.

Medarbejderne fra Lamont Observatory var imidlertid ikke straks modne til at gå ind på Vines og Wilsons tydning af magnetbåndene. Det, de registrerede, var for dem magnetiske striber, hvis intensitet lå henholdsvis over og under gennemsnittet. Deres første kort blev med andre ord endnu opfattet helt på linje med de første Scripps Institute kort fra Stillehavet.

Men der gik skred i tvivlernes rækker. Heirtzler var den første, der begyndte at fæste lid til den nye tolkning. Det ræsonnement, der løste endeligt op for almindelig tiltro var følgende: Hvis teorien er korrekt, så skal som sagt tidsskalaen for de magnetiske omslag fra normal til revers være indskrevet på begge sider af enhver oceanisk ryg på Jorden.

Fig. 10. Udtægning af målinger på Reykjanesryggen. Det øverste profil er målt, det nederste er beregnet ud fra den model af havbundsopbygningen, som ses nederst på tegningen. Efter T. Østergaard fig. 20.



Hvad kunne vel herefter være mere nærliggende for Lamont-folkene end netop at prøve tidsskalaen på den smukt symmetrisk udviklede Reykjanesryg, som lige var blevet flyvermålt? Det gjorde de; overensstemmelsen mellem det forudsagte og det, de fandt, var overbevisende. Det slog hovedet på sømmet.

De kastede sig nu med iver over alle de magnetiske måledata, de kunne få fat i. W. C. Pittman tog sig af det sydlige Stillehav, X. Le Pichon af Det indiske Ocean og M. Talwani af Nordatlanten. Resultaterne udeblev ikke; det var lysten, der drev værket, og computerudstyret var i orden.

Spredningshastigheden

Når man, så langt man nu var kommet i arbejdet, derefter fandt det dobbelt-symmetriske billede af de magnetiske striber gå igen fra ocean til ocean, og man hvert sted kunne genkende de samme omslag fra normal til revers magnetisering, blev man uden videre istand til direkte at måle, hvor stor spredningshastigheden var ved de forskellige afsnit af oceanryggene. Man fandt da, at den relative bredde altid var den samme, men at spredningens hastighed varierede fra én ryg til en anden. I Reykjanesryggen var den 1 cm/år på hver side af midterlinjen, i den østpacifiske ryg derimod over 5 cm/år. En nutidig geologisk proces, der arbejder med så stor hastighed og tumler med så store områder, er næsten ikke til at fatte!

Medens der som nævnt er forskelle i spredningshastigheden fra oceanryg til oceanryg, så synes den at have været konstant for en given ryg gennem millioner af år.

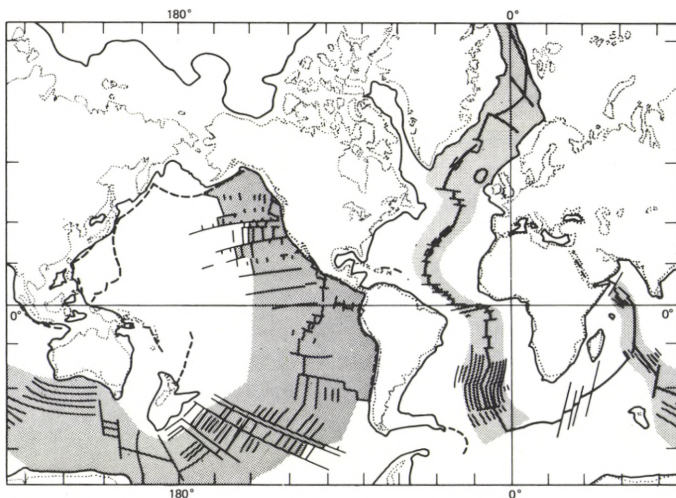


Fig. 11. Den magnetiske kortlægning af havnes bund viser, hvorledes disse bliver ældre og ældre med tiltagende afstand fra de oceaniske rygge. De skyggede områder er blevet dannet i løbet af de sidste 65 millioner år, d.v.s. siden den yngre del af Kridtperioden. Efter Troels Østergaard.

Heirtzler og hans hjælpere indså nemlig, at hvis de tog udgangspunktet i en oceanisk ryg og bevægede sig fra den hen til nærheden af et kontinent, hvor magnetbåndene udviskedes, fordi de her dækkes til af udskyllet materiale fra land, blev de nødt til at forlænge den magnetiske tidsskala bagud i tiden; den indtil da kendte skala var altfor kort. De forskere, der målte paleomagnetisme på havsens bund, var nået meget længere tilbage i tid end paleomagnetikerne på land. De havde fundet 171 omslag fra normal til revers magnetisering i løbet af 76 millioner år! Eftersom nu den tidsregning, man nåede frem til i ét ocean, passede sammen med den, man fandt i et andet, kunne man vide, at spredningsraten i ingen af tilfældene havde været udsat for større, lokale variationer.

Kortet, fig. 11, viser omtrent, hvad vi nu ved om spredningsmønstret. Det befinder sig imidlertid under stadig komplettering.

Blot et hastigt blik på det giver os oplysninger, vi ikke havde før. Det ser ud til, at hele Atlanterhavet, både i nord og syd, vokser i bredde ud fra den midtatlantiske ryg, og at hastigheden af den proces, som skilte Sydamerika fra Afrika, svarer til, at åbningen i syd begyndte for ca. 200 millioner år siden.

Betragter vi et helt andet område, f. eks. oceanryggen syd for Australien, kan vi se, at den har tvunget Australien og Antarcis bort fra hinanden. Vi kan endvidere ved at måle bevægelsehastigheden bort fra ryggen af de to landområder slutte, at adskillelsesprocessen ikke har taget mere end ca. 40 millioner år (fig. 13).

Videre udsyn

Med de perspektiver, der herved er blevet åbnet, trænger der sig straks nye spørgsmål på; mere end det, mange af disse finder forbavsende hurtigt et svar. Det har

nemlig hidtil været en hovedfinesse ved oceanbundsspredningen, at den har kunnet anvendes til forudsigelser.

Hvis oceanbundsspredningen fungerer på den måde, som jeg har skildret, må det f. eks. forudsættes, at de sedimenter, der er blevet aflejret først, som altså et givet sted hviler direkte på basalten på havbunden, må være ældre og ældre, jo længere man kommer væk fra oceanryggen. Boringer i havbunden, som først og fremmest er udført af boreskibet U.S. „Glomar Challenger“ siden 1969, har til fulde godtgjort, at det netop er tilfældet.

I en boreserie på ca. 30° sydlig bredde tværs over Sydatlanten fandt man, at alderen af de ældste sedimenter voksede med ca. 50.000 år for hver kilometer, man fjernede sig fra oceanryggen.

Den geologiske tidsskala, som organismerne sagde god for, faldt sammen med den, som var blevet bestemt ud fra de magnetiske målinger. To helt forskellige veje ledte til samme mål og førte til en bekræftelse på oceanbundsspredningens principielle rigtighed.

Pladetektonik

Fra gammel tid har man naturligvis gennem smertelig erfaring kendt jordskælvsbælternes forløb som en ring rundt om Stillehavet, og udgående herfra som et øst-vestgående bælte gennem Indonesien, Himalaya, Lilleasien og Middelhavslandene; men konstateringen af de mange jordskælvscentre på oceanryggene er af ret sen dato.

Efterhånden som et verdensomspændende registreringsnet er blevet udbredt over Jorden, er stedfæstelsen af jordskælvne blevet meget nøjagtig. Når man ser på et verdenskort, der viser beliggenheden af jordskælvscentrene, f. eks. for jordskælvne gennem en seksårs periode, falder det i øjnene, at de helt overvejende forekommer i smalle bælte, samt at der næsten ingen jordskælv findes i meget store områder imellem disse.

Det er denne observation, der direkte leder frem til tanken om, og siden til indførelsen af begrebet „pladetektonik“.

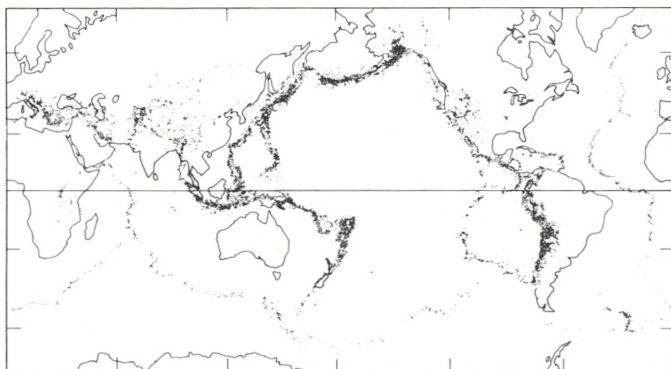


Fig. 12. Epicentrene for samtlige jordskælv, som U.S. Coast and Geodetic Survey har registreret i seksårsperioden 1961-67.

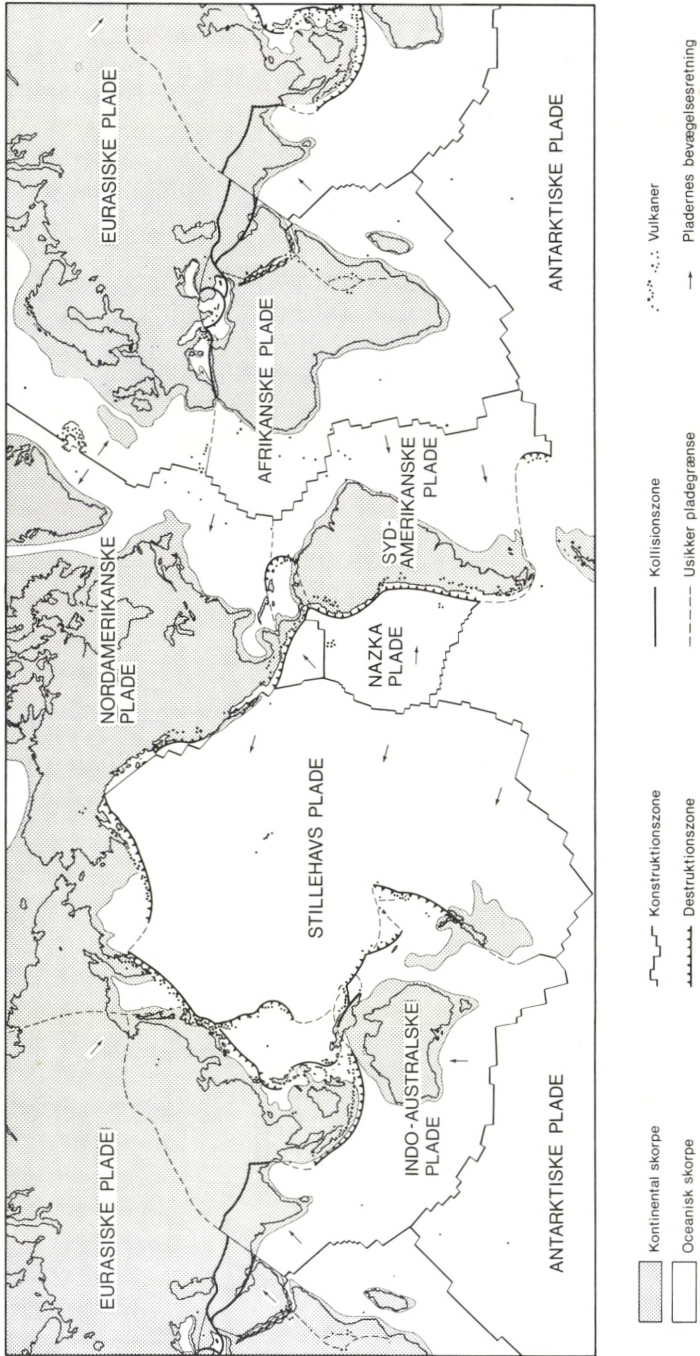


Fig. 13. De største plader i mosaikken. Tegning af Ragna Larsen efter diverse kilder.

Pladerne, der ikke har seismisk aktivitet, er meget store, og de er langs randen omgivet af de smalle jordskælvszoner. Det er i dem, at vi kan måle, at bevægelserne finder sted, og i virkeligheden er kun pladernes rande udsat for at få virkelige „knubs“. Billedet af isflager på en vandoverflade trænger sig uvilkårligt på som illustration til det, der sker.

Jordskælvskortet selv, fig. 12 viser umiddelbart eksistensen af seks store, ikke-seismiske plader og deres beliggenhed. Vi kalder dem henholdsvis for: Den eurasiske, den indiske, den pacifiske, den antarktiske, den amerikanske og den afrikanske. Ind imellem de store plader findes der lige så mange mindre, der ligeledes nu har fået deres egne navne: Den arabiske, den philippinske og den caribiske, samt Cocos-, Nasca- og Scotiapladerne. Ialt 9 plader er vist med navn på fig. 13.

Det bløde mellemlag

Mange ting synes hermed at være faldet vel på plads i et mønster, som ser lovende ud, men indtil nu er vi gået udenom et altafgørende spørgsmål. Dersom der virkelig finder horizontale bevægelser sted, som nu de mange ting tilsammen tyder på, må vi også kunne henvise til et lag i Jorden, der tillader, at denne type af bevægelser kan realiseres. (Det var ved valget af et sådant formodet lag, hvortil han havde udset sig havbundens basaltlag, at Wegener ved fremsættelsen af sin teori tog alvorligst fejl).

Forplantningshastigheden af et jordskælvs første og anden forløber, der internationalt betegnes som henholdsvis P- og S-bølger, tiltager indad i Jorden og viser dermed, at denne mod dybet bliver tættere og tættere.

Imidlertid sker der en mindre nedsættelse af hastighedsforøgelsen i en zone, der ligger mellem ca. 70 km og ca. 140 km's dybde. Denne forholdsvise hastighedsforringelse forklarer man ved at antage, at en ganske lille del af materialet i denne dybde i kappen befinder sig i smeltet tilstand i form af en vandholdig smelte mellem mineralkornene, der sammensætter bjergarterne på stedet. Tilstedeværelsen af selv en meget ringe mængde smelte vil nedsætte stivheden og dermed forsinke forplantningshastigheden af jordskælvsbølgerne.

Man kan på dansk kalde den pågældende zone for „det bløde mellemlag“, internationalt benævner man den gerne asthenosfæren, d. v. s. kugleskallen, der ikke besidder styrke. Det er på denne kugleskal, man forestiller sig, at de ovenover liggende, stive, omkring 100 km tykke stenplader, der som en mosaik sammensætter lithosfæren (sten-kugleskallen) er i stand til langsomt at skifte plads (fig. 14).

Da nogle lithosfæreplader som f. eks. den pacifiske helt består af oceanbunds-materiale og andre som den afrikanske og den sydamerikanske er sammensat af såvel en oceanisk, som af en kontinental del, kan vi her dårligt tale om „kontinent“-vandring eller „kontinental“-bevægelser. Det er fornemmelsen af denne brist ved en tidligere navngivning, der har affødt de nye og korrekte ord som oceanbunds-spredning og pladetektonik.

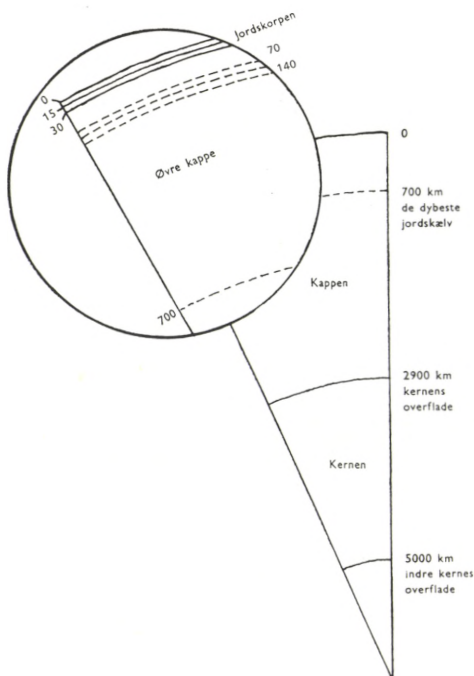


Fig. 14. Et snit gennem Jorden, der viser dens hovedsammensætning. Øverst i venstre hjørne ses et stykke „i lup“. Jordskorpen forestiller et stykke kontinentalskorpe; man bemærker, at det bløde mellemlag ligger et stykke nede i kappen. Her modificeret efter Henry Jensen.

De „transforme“ forkastninger

Der er en ting, vi endnu ikke har set nærmere på. Et hastigt blik på kortet over Atlanterhavets bund, fig. 4 er nok til at opfatte, at det rummer et særdeles veludviklet system af brudlinjer, samt at disse løber tværs hen over den midatlantiske ryg og åbenbart tilsammen udgør et system.

Noget ganske tilsvarende finder man ved oceanryggene i de andre store have.

Det man straks fæstede sig ved og ikke begreb var, at brudlinjerne ikke indskrænkede sig til at forbinde de stykker af ryggen, der er forskudt i forhold til hinanden, men at de fortsætter, ofte hundredvis af kilometer til begge sider udenfor den.

Enhver geologs umiddelbare opfattelse måtte være, at de forkastninger, der forskubber stykkerne af oceanryggen i forhold til hinanden, simpelthen betød, at havbunden – med ryggen – på en eller anden måde havde undergået en forskydning; men hvorfor skulle imidlertid sådanne forskydninger netop ske i oceanryggene i stort tal? Det forstod man ikke.

En ny iagttagelse blev da gjort af seismologen L. R. Sykes, der var begyndt at samarbejde med folkene fra Lamont, idet han fandt, at de jordskælv, der havde hjemsted på brudlinjerne, kun indtraf på de strækninger af disse, der forbandt to stykker forskudt oceanryg; der fandt ingen sted udenfor (fig. 15).

Endnu en gang blev det Tuzo Wilson, der bragte situationen ud af dødvandet. Selv siger han, at han fik ideen en dag, da han sad i Bullards laboratorium på

Fig. 15. Beliggenheden af og bevægelsesretningen ved jordskælv, der indtræder på transforme forkastningslinjer i Atlanterhavet. Her efter Troels Østergaard.

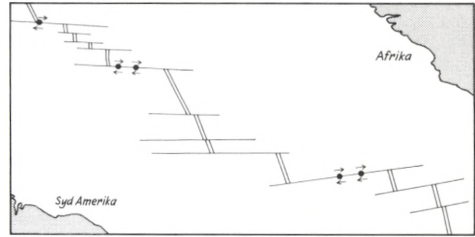
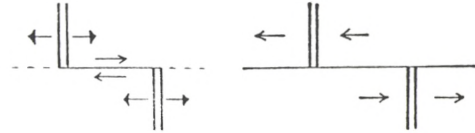


Fig. 16. Transforme forkastninger. I en almindelig forkastning (til venstre) bevæger den ene side sig i modsat retning af den anden. Det var således, som enhver geolog ved første betragtning måtte forestille sig, at bevægelserne langs de brudlinjer, der fortsatte de midtoceaniske rygge, fandt sted.



I den transforme forkastning (til højre) bevæger stykkerne af oceanryggen sig ikke i forhold til hinanden, men materialet flyder væk fra hvert af dens to stykker, som er vist på tegningen. Alene langs det stykke af forkastningen, som forbinder de to stykker af oceanryggen, er der bevægelse i modsatte retninger; det er det, som fremkalder jordskælv (sml. fig. 15). Her efter W. Sullivan.

Madingley Rise i Cambridge og legede med papirmodeller. – Den gik ud på følgende: Som følge af spredningen bort fra oceanryggen vil der opstå en ny slags forkastning, som overhovedet ikke tidligere var kendt af geologerne, idet selve fænomenet var nyerkendt. Wilson valgte at kalde forkastningen for en „transform“ forkastning, fordi den, dér hvor den møder en ryg, i seismisk henseende bliver transformeret (d. v. s. ændret) til en ny form, nemlig til oceanryggen selv. Jordskælvsmønsteret i midten af oceanryggen viser tydeligt, at epicentrene enten ligger på selve ryggen eller i de transforme forkastninger, der forbinder de adskilte stykker af den.

Wilson antog oprindeligt, at forkastningerne var anlagt som normale forkastninger, før de to sider af et ocean begyndte at vandre bort fra hinanden, og at de siden skiftede karakter til at blive transforme, når de kom til at deltage i de bevægelser, der sattes i gang ved oceanbundsspredningen. Nu er man blevet klar over, at de i virkeligheden er en del af selve spredningssystemet og må være anlagt i begyndelsen af en spredningsepisode! Når den oceaniske jordskorpe slår revner sker det efter et bestemt mønster, og bevægelsen i det sker dels langs selve den nydannede ryg, dels langs de transforme forkastninger. Ny jordskorpe fødes langs med oceanryggen, „gliden af-mod-hinanden bevægelse“ sker langs de transforme forkastninger mellem de forskubbete segmenter. Det vil vi herefter se lidt nærmere på.

Pladernes bevægelsesretninger

Lithosfærepladerne bevæger sig sindigt henover atshenosfærens kugleflade.

Enhver bevægelse på en kugleflade kan beskrives som en drejning. Overført på det

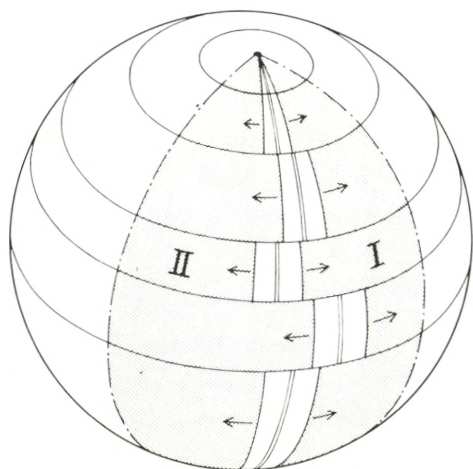


Fig. 17 viser bevægelsen af to lithosfæreplader henover jordkuglen; bevægelsen har nået at dreje dem lidt bort fra hinanden. Efter Troels Østergaard.

foreliggende vil det sige, at man kan beskrive en enkelt plades bevægelse ved en vinkelhastighed og en akse gennem jordcentret. Aksens beliggenhed beskrives ved hjælp af de geografiske koordinater til en af dens poler, altså et af de to steder, hvor akse træder ud på jordoverfladen.

Den enkleste illustration af fænomenet fremkommer, hvis vi som eksempel vælger den situation, hvor to lithosfæreplader bevæger sig i forhold til hinanden omkring en pol, som netop er Nordpolen. Vi vil yderligere gøre den antagelse, at de to plader begynder at bevæge sig bort fra hinanden begyndende ved en udgangslinje, der løber fra Nordpolen til Sydpolen. Efter en vis tids forløb, vil der være indtruffet en drejning, f. eks. som vist skematisk på fig. 17.

Vi ser, at de to plader ved polerne stadig ligger temmelig tæt ved hinanden, medens de ved Ækvator har fjernet sig mest fra hinanden. Resultatet er, at de nye rande, der har fjernet sig fra den oprindelige udgangslinje, ligger parallelle med hver sin længdekreds.

Men grænsen mellem to lithosfæreplader i naturen viser, som det f. eks. er tilfældet langs den midtatlantiske ryg, hele tiden „knæk“ i sit forløb og meget markerede spor af tværgående forkastninger. Skal de to plader, dér hvor de ved knækkene næsten som to tandhjul griber ind i hinanden, undgå at komme i besæt, er det nødvendigt, at bevægelsen langs med de transforme forkastninger forløber parallelt med lille-cirkler omkring bevægelsespolen. Det vil i vort tilfælde sige parallelt med bredde-cirklerne.

Med den viden, at afstanden mellem de plader, der bevæger sig, vokser fra polen mod ækvator, og at forkastningerne forløber langs med lillecirkler, er det ikke vanskeligt at beregne polens beliggenhed. Man kan nemlig prøve, om den pol, man har beregnet for et pladepar, er rigtigt placeret eller ikke.

Til det formål kan man dreje hele jordskorpen, så at bevægelsespolen kommer til

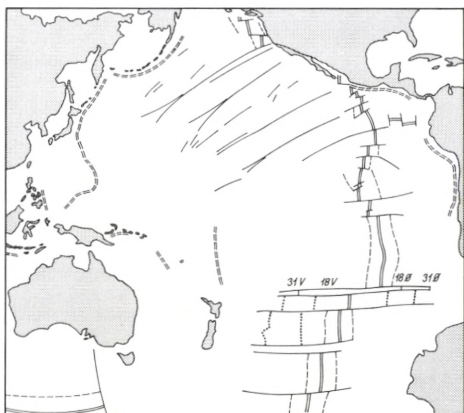


Fig. 18. Der er foretaget en drejning af Stillehavet, således at polen for de bevægelser, som udgår fra den sydpacifiske ryg er flyttet til nordpolen. Her efter Troels Østergaard.

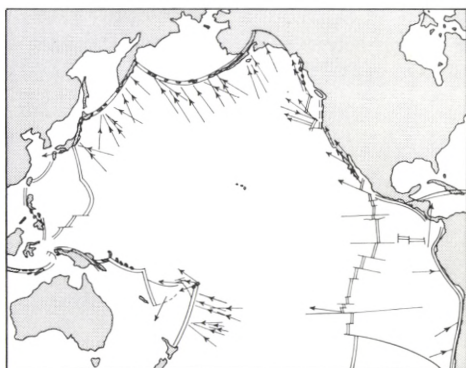


Fig. 19 viser bevægelsesretningen, som den er blevet bestemt for en række jordskælv i Stillehavsområdet ind imod dybsøgravene i NV, N og Ø. Her efter Troels Østergaard.

at ligge på Nordpolens plads. Herefter tegner man verdenskortet ud i Mercatorprojektion, og finder da, at oceanryggens enkeltstykker forløber nord-syd og forkastningerne øst-vest. Fig. 18 viser et eksempel fra Stillehavet.

Ved at benytte denne enkle fremgangsmåde har Le Pichon bestemt de seks store lithosfærepladers bevægelser ud fra følgende oceanrygge: Den nordpacifiske, den sydpacifiske, den antarktiske, den midtatlantiske og ryggen i Det indiske Ocean.

Ved hjælp af de bevægelseshastigheder, man havde beregnet for pladerne, kunne man udpege de steder på jordoverfladen, hvor der for tiden må finde sammenpresning og de steder, hvor der for tiden må finde udvidelse, sted. Moderne jordskælvsmålingsinstrumenter gør det nu muligt at bestemme retningen af en forskydning langs med et pladeafsnit. Overensstemmelsen mellem de beregnede og de faktisk fundne bevægelsessituationer var simpelthen forbløffende!

Stillehavet

Der mangler endnu noget i det billede, som jeg har forsøgt at tegne.

Ved oceanbundsspredningsprocessen dannes der ny jordskorpe i de oceaniske rygge. Heraf følger imidlertid, at de plader, der udgår herfra, vokser sig større og større langs randen; de danner det, vi kalder „konstruktionsrande“; men da det efterhånden må anses for givet, at Jorden ikke øger sin størrelse tilsvarende, må der nødvendigvis forsvinde noget andetsteds.

Til belysning af det problem egner Stillehavet sig udmærket.

Stillehavet rummer et væsentligt strukturelement i sine lange, buede dybsøgrave; noget tilsvarende er så at sige ikke tilstede i Atlanterhavet. Dybsøgravene findes næ-

sten hele vejen rundt langs Stillehavets kyster; de rummer de største vanddybder, vi kender på Jorden.

Der blev foretaget en række betydningsfulde undersøgelser i et kompleks af dybsøgrave i første halvdel af halvtredserne af den amerikanske seismolog H. Benioff. Han bearbejdede registreringer af jordskælv fra Kamchatka-Kurilerne og opdagede derved, at jordskælvscentrene med hensyn til dybde fordelte sig på en karakteristisk måde.

Lige indenfor (d. v. s. på landsiden af) dybsøgravene ligger jordskælvscentrene ganske nær ved jordoverfladen. Bevæger man sig herfra indad mod land, finder man, at centrene efterhånden kommer til at ligge dybere og dybere, og i ca. 1000 km afstand fra graven udgår de dybest kendte jordskælv fra en dybde af ca. 700 km. Disse observationer aftegner således tilsammen en skråtliggende, indad mod land hældende jordskælvszone, der nu efter sin opdager kaldes for Benioff-zonen (fig. 7 og 8).

Man fandt yderligere ud af, at jordskælvsbølgerne bevægede sig med forøget hastighed lige under Benioff-zonen og gav sig derfor i lag med at undersøge det forhold nærmere. Til den ende sammenlignede man løbetiden for jordskælvsbølger, der bevægede sig parallelt med en Benioff-zone, med løbetiden for bølger, der bevægede sig vinkelret på den. Sammenligningen gav til resultat, at jordskælvsbølgerne løber hurtigere på langs end på tværs i den.

Disse iagttagelser var gjort, inden oceanbundsspredning og pladetektonik var kommet virkelig på tale.

I det østlige Stillehav ligger der en oceanryg, og langs den finder der en kraftig havbundsspredning sted. To plader bevæger sig her væk fra hinanden med en betydelig hastighed. Ser vi på disse pladers modsatte rande, opdager vi, at de mestendels har kurs mod dybsøgravene, som Peru-Chile-graven i øst, Aleutergraven i nord og graven udfor Kamchatka-Kurilerne i nord-vest (fig. 19).

Hvad sker der da i de grave? Åbenbart det simple, at de to oceaniske plader – den pacifiske og Nascapladeren – der vokser, udgående fra oceanryggen, med deres anden rand bukker ind under hver sin kontinentalrand og forsvinder der, og derved hver især danner en „destruktionsrand“. Det er friktionen mellem den kontinentale plade og den underskudte plade, der fører til udviklingen af en Benioff-zone, som f. eks. den, der giver sig stærkt tilkende i Japans mange jordskælv.

I forbindelse med tanken om oceanbundsspredning var det nu, at tilstedeværelsen af det ca. 100 km tykke lag under Benioff-zonen, hvori jordskælvsbølgerne viste forøget hastighed, og som derfor måtte være stivere end sine omgivelser, fik mening. Man gjorde følgende antagelse: Hvis et „bagfra“ kommende tryk presser en kold og som følge deraf tung stenplade ind under en lettere og (som følge af radioaktiv opvarmning) varmere kontinentpladerand, vil den kolde plades stivhed i forhold til omgivelserne åbenbart kunne holde stand indtil ca. 700 km dybde i Jorden. Herunder ophører jordskælvsimpulserne og man antager derfor, at pladen gradvis mister sit særkende og siden bliver optaget i kappen.

I Benioff-zonerne finder vi således det, vi har brug for, hvis pladernes materiale-regnskab skal gå op; langs dem forsvinder en portion plademateriale, der svarer til den, der nydannedes ved oceanryggen.

Endnu en slags pladerand

Vi har i det foregående mødt konstruktionsrande og destruktionsrande, og de er for det afsluttende afsnit om vulkanismen de vigtigste.

Den type pladerande, jeg endnu må nå at omtale, kunne man kalde „kollisionsrande“; de optræder dér, hvor plader af samme beskaffenhed og størrelse tørner sammen. Det mest iøjnefaldende eksempel findes dér, hvor det tidligere sydkontinent og det tidligere nordkontinent i al deres vælde er løbet ind i hinanden, d. v. s. i et bælte nær ved Ækvator. Begge disse oprindelige kæmpeplader har haft en enorm inerti og begge har de overvejende bestået af kontinentalt (d. v. s. let) materiale. Det har betydet, at ingen af dem har kunnet bevæge sig til at dykke ned under den anden. Kollisionen har derfor medført en sammenstuvning i bjergkæder dér, hvor mødet fandt sted: Himalaya – Alperne.

Et blik på jordskælvs-kortet er nok til at vise, at kollisionsrandene gennem den gamle verden fra øst til vest er mere komplicerede end de enkle konstruktions- og destruktionsrande er; de er først og fremmest bredere og langt mere uregelmæssige end disse. Sml. fig. 12.

Vulkaner

Når nu så mange træk i Jordens procesverden har fået sammenhængende mening i lys af pladetektonik-teorien, ligger det nær til sidst også at ofre vulkanerne en smule af vor opmærksomhed.

Betragter man et verdenskort, der viser beliggenheden af Jordens ca. 1000 aktive vulkaner, springer det straks i øjnene, at dette kort er næsten sammenfaldende med jordskælvs-kortet. Også vulkanerne synes tvangsfrit at følge det pladetektoniske mønster; de findes ganske overvejende i de tre hovedtyper af pladerande, vi har behandlet ovenfor.

På spørgsmålet, hvor vil i fremtiden vulkanudbrud først og fremmest indtræde, kan vi svare omtrent som følger. De fleste vulkanudbrud i nutiden forekommer i bæltet rundt omkring Stillehavet og i de oceaniske rygge; det vil de fremtidige sandsynligvis også gøre. Men vi kan sige mere end det. Vi ved nu, at ca. 80 % af alle Jordens vulkaner ligger i destruktionszonerne og kun ca. 16 % i konstruktionszonerne.

Eftersom destruktionszonernes vulkaner har et højt kiselsyreindhold og et højt vandindhold, og vi er helt klare over, at begge dele forøger eksplosionsfaren stærkt – under dannelse af pimpsten og aske – kan vi sige, at det er fra udbrud i disse, at de største eksplosionskatastrofer vil true.

Konstruktionszonernes vulkaner har i de fleste tilfælde lavt kiselsyreindhold og lavt vandindhold, deres eksplosivitet er derfor for det meste temmelig ringe, og det samme er normalt også risikoen for, at de vil volde vulkanske katastrofer af virkeligt stort omfang – medmindre da, at selve udbrudsstedet placerer sig midt i bebygget område.

Kollisionsrands-situationen er den mest uberegnelige, fordi de magmakamre, der kan dannes under de stærkt variable forhold, den betinger, kan antage form og vælge beliggenhed, som vi slet ikke kan forudsige.

Slutord

Et væld af enkeltheder om Jorden har vi ladet passere forbi os; tilsammen har de ydet deres bidrag til at give et helhedsbillede af vor klode. Følgen deraf er blevet, at Jordens ansigt tegner sig klarere end før, og at vi synes, at vi forstår mere og mere af det. Ikke desto mindre må vi blankt erkende, at vi stadigvæk ved næsten intet om selve de kræfter, som holder bevægelsen af kæmpepladerne i gang – og det er dog „det artigste“.

Litteraturhenvisninger

- Bullard, Sir Edward 1954: The Flow of Heat through the Floor of the Atlantic Ocean. Proceed. of the Roy. Soc. of London. Series A. Vol. 222.
- Carey, S. Warren 1958: „A Tectonic Approach to Continental Drift“ in Continental Drift. (A Symposium), Hobart.
- Du Toit, A. L. 1937: Our Wandering Continents. An Hypothesis of continental Drifting. Oliver & Boyd, Edinburg.
- Hess, H. H. 1962: „History of Ocean Basins“ in Petrol. Studies. A volume in Honor of A. F. Buddington.
- Heirtzler, J. R. 1968: „Sea-Floor Spreading“. Scientific American, Vol. 219.
- Jeffreys, Sir Harold 1970: The Earth, Its Origin, History and Physical Constitution. 5th. Edition, Cambridge.
- Jensen, Henry 1963: Jordskælv. Orientering, Haase.
- Johnson, G. Leonard and Bruce C. Heezen 1967: The Arctic Mid-oceanic Ridge. Nature, Vol. 215.
- Menard, H. W. 1969: „The Deep-Ocean Floor“. Scientific American, Vol. 221.
- Noe-Nygaard, Arne 1970: Geologi, processer og materialer. Gyldendal (4. udg. 2. opl.).
- Runcorn, S. K. 1962: „Towards a theory of continental drift“. Nature, Vol. 193.
- Sullivan, Walter 1974: Continents in motion. McGraw-Hill Book Co.
- van Waterschoot van der Gracht, W. A. J. M. et al. 1928: Theory of Continental Drift. (A Symposium). Am. Ass. of Petrol. Geologists.
- Wegener, Alfred 1922: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Die Wissenschaft, Bd. 66. 3. opl.
- Wilson, J. Tuzo 1963: „Continental Drift“. Scientific American, Vol. 208.
- Wilson, J. Tuzo 1965: A New Class of Faults and Their Bearing on Continental Drift. Nature, Vol. 207.
- Vine, F. J. & D. H. Matthews 1963: Magnetic Anomalies over Oceanic Ridges. Nature, Vol. 199.
- Vine, F. J. 1966: Spreading of the Ocean Floor. New Evidence. Science, Vol. 154.
- Østergaard, Troels 1975: Den nye Geologi. Orientering, Haase.

Grundvidenskaben i dag er navnet på en foredragsrække, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab begyndte i efteråret 1976. Formålet er at bidrage til en større forståelse af den forskning, der ikke direkte stiler mod praktisk anvendelse, men mod forøget indsigt i sammenhængen i verden.

Pjeceserien bygger på disse foredrag. Forfatterne er fremtrædende forskere hentet såvel i som uden for Selskabets medlemskreds. Fremstillingen er gjort så almen, at det enkelte hæfte kan tjene som udgangspunkt for en videre beskæftigelse med de behandlede fag og emner. Hertil hjælper også omfattende litteraturhenvisninger.

Behandlingen af de enkelte naturvidenskabelige og humanistiske videnskabsgrene sigter mod at give et indtryk af forskningens udvikling i den sidste menneskealder. Det drejer sig ikke alene om metoder og resultater; også spørgsmålet om grundforskningens praktiske betydning og de farer, den kan rumme, berøres. I det første hæfte drøftes den grundvidenskabelige forskning som helhed samt dens samfundsmæssige rolle.

De nedennævnte 10 pjecer forventes udsendt 1977-78. De nummererede er allerede udkommet:

1. Mogens Pihl: Hvad er grundvidenskab?
2. Erling Bjøl: Politik som videnskab.
3. Søren Egerod: Det fjerne Østens sprog – sammenhænge og påvirkninger.
4. C. Møller: Omvæltninger i fysikernes tankesæt i vort århundrede.
5. Arne Noe-Nygaard: Jordens nye ansigt.
6. Olaf Pedersen: Videnskabshistorien og dens aktuelle betydning.
P. Nørregaard Rasmussen: Økonomisk vækst.
Erik A. Nielsen: Hvad kan litteraturvidenskaben?
Ole Maaløe: Biologiens molekylære grundlag.
B. Gomard: Retsvidenskabens opgaver og metode belyst ved eksempler fra aktieselskabsretten.

Pris kr. 12,85 incl. 18 % moms.

ISBN 87-87696-04-5