

Pentti Kaitera

Merenpaine maapallon kuorta muovaavana tekijänä, Sea Pressure as a Factor

Shaping the Earth's Crust

Terra N:o 4, 1963, s. 331–317

© Suomen maantieteellinen seura

MERENPAINEN MAAPALLON KUORTA MUOVAAVANA
TEKIJÄNÄ

PENTTI KAITERA

REPORT

*Sea Pressure as a Factor Shaping
the Earth's Crust*

HELSINKI

1963

Merenpaine maapallon kuorta muovaavana tekijänä

PENTTI KAITERA

Tutkiessani kesällä 1962 mannerten ja merten välistä vesibilanssia ja merten vesimäärissä mahdollisesti tapahtuneita muutoksia jouduin perehtymään myös maapallon geologiseen historiaan. Tällöin sain ajatuksen, että Tyynen valtameren laajuudella ja sitä ympäröivien alppilaisten vuorijonojen muodostumisella voi olla syy-yhteyttä keskenään. Myös Välimeren—Indonesian alppilainen vuorijonovyöhyke noudattelee meren rantaviivan yleissuuntaa (3, s. 177). Jos paine meren pohjaa vastaan jatkuvasti lisääntyy, tämä ylitettyään tietyn rajan panee maankuoren alla olevan aineen sellaiseen liikkeeseen merialueilta mantereita kohden, jota voidaan tarkastella potentiaalivirtauksen sääntöjen avulla (9). Tällainen paineen lisääntyminen voi aiheutua merten vesimäärien lisääntymisestä tai veden siirtymisestä vesihöyrynä ja sateina merialueelta toiselle, jos näitä erottaa mannerten ja niitä yhdistävien kannasten muodostama yhtenäinen vedenjakaja. Paine-eroa merten ja mannerten välillä syntyy myös mm. eroosion vaikutuksesta, kun maa-ainesta kulkeutuu pois mantereilta ja kasaantuu sedimentteinä merten pohjaan. Tällaisen paine-eron synnyttämä virtausliike sopii yhteen sellaisten maankuoren liikuntojen kanssa, joita vuorijonojen muodostuksessa tiedetään tapahtuneen (3, 246—248). Riippumatta siitä, miten paine-ero merten ja mannerten välillä syntyy, sen vaikutus on luonteeltaan samanlainen. Merten vesivolyymin lisääntyminen, johon tulin ensiksi kiinnittäneeksi huomiota merenpaineen lisääntymisen syynä, on vain vähäinen osa merten ja mannerten välistä paine-eroa suurentavista tekijöistä.

Ajatusta edelleen kehitellessäni sain maapallon kartasta ja myöhemmin paleoklimatologisista (12) ja paleomagneettisista (2) tutkimuksista niin paljon tukea olettamuksilleni merenpaineen mahdollisista vaikutuksista, että rohkenin esittää uuden hypoteesin eräiden keskeisten geologisten tapahtumien syistä (6 ja 7), vaikka jouduin näin tulemaan oman varsinaisen tutkimusalani ulkopuolelle. Vahvana lisäperusteluna tälle merenpainehypoteesille olivat professori E. Niskasen pyynnöstäni suorittamat laskelmat, jotka osoit-

tivat tietynsuuruisen merenpaineen lisäyksen riittävän synnyttämään liikettä, joka suunnan ja nopeuden suhteen sopi yhteen muiden asiassa esille tulleet näkökohtien kanssa. Wegenerin (18) mannerliikuntateorian yhteydessä tapahtunut selvittely ja esitetty kritiikki (17) antavat hyvän lähtökohdan asiaan liittyvien geologisten ja paleontologisten tekijöiden tuntemiseen. Eräät myöhemmin ilmestyneet tutkimukset, etenkin Runcornin (15) toimitama kokoomateos »Continental Drift», ovat myös tuoneet runsaasti sellaista aineistoa, joka tukee merenpainehypoteesia.

Wegenerin mannerliikuntateoriaa vastaan kohdistunut kritiikki on aiheuttanut, että aivan viime vuosiin saakka on suhtautuminen siihen ollut hyvin epäilevää ja valtaosaltaan kielteistä. Mainitun Runcornin teoksen ilmestymisen jälkeen on kiinnostus asiaan saanut uutta vauhtia. Useat mannerliikuntoja käsittelevät artikkelit osoittavat, että viimeisen kymmenen vuoden aikana saadut geofysikaaliset tutkimustulokset ovat aiheuttaneet olennaisen käsitysten tarkistuksen (14, 15, 19). Yhä useammat tutkijat alkavat pitää selvänä, että mantereet ovat liikkuneet toistensa ja maapallon napojen suhteen. Ongelmana on nyt lähinnä se, mitkä voimat ovat näitä liikuntoja aiheuttaneet. Esimerkiksi Chadwick (15, s. 195) viittaa vuorijonojen muodostumista koskevia hypoteeseja selostavassa kirjoituksessaan Adamsin lausuntoon, »että vuorijonojen alkuperää koskeva probleemi on vielä ratkaisematon». Omana käsityksenään hän mainitsee, että »mahdollisuus lopulliseen ratkaisuun näyttää jos mikään vetäytyvän takaisin». Wegenerin mannerliikuntateorian suhteen hän näkee suurimpana vaikeutena mm. liikuntoja aiheuttavien voimien riittämättömyyden ja mainitsee: »Oletettujen pintavaikutusten ja riittävien käyntiinpanovoimien ilmeinen puuttuminen muodostaa voimakkaan vastaväitteen mannerliikuntahypoteeseille.»

Kuljettaessaan maankuoren aineita mantereilta meriin vesi- ja tuulieroosio aiheuttavat mantereilla vertikaalipaineen vähentymistä, samalla kun tapahtuu sen lisääntymistä merten pohjaa vastaan. Tästä syystä paineero tulee eroosion vaikutuksesta kaksinkertaiseksi kulkeutuvien aineiden määrään verrattuna. Kun veden mukana kulkeutuva liete laskeutuu pääosaltaan kapealle vyöhykkeelle rannikon lähelle tai jokisuistoihin, on sen aiheuttaman maankuoren painumisen arvioitu rajoittuvan vain rannikoiden välittömään läheisyyteen. Maahiukkaset kadottavat kuitenkin vedessä painostaan lähes 40 %, mikä vähentää löyhien sedimenttikerrosten painetta pohjaa vastaan, ja maankuoren jäykkyys kykenee vastustamaan tuntuvasti painumista, jos kuormitusalue on kapea tai muuten alaltaan pieni. Lisäksi eroosion tuomat aineet pienentävät meren tilavuutta ja vastaavasti kohottavat meriveden pintaa koko merialan laajuudella riippumatta siitä, missä sedimentoitumista tapahtuu. Nämä näkökohdat huomioon ottaen myös rannikoilla tapahtunut sedimentoituminen vaikuttaa koko merialan laajuudella painetta lisäävästi. Rantasedimenttien aiheuttama runsaampi painuminen voi olla panemassa alkuun juuri sellaisen liikkeen, jota koko merialalla

tapahtuva paineen kasvu tukee, nimittäin merenpohjan työntymisen man-
nerten alle. Ilman tällaista liikettä merenrannikoita reunustavien konsoli-
doitumattomien sedimenttikerrostumien täytyisi olla huomattavasti laajem-
pia ja tilavuudeltaan suurempia kuin on arvioitu (vert. esim. 15, s. 200).

Professori Kullerbergin ilmoituksen mukaan luotettavimpana arviona
vesierosion määrästä voidaan pitää Kallen (8, s. 118) tekemää. Sen mukaan
tapahtuu humidisilla alueilla maa-aineksen poiskulkeutumista lietteenä ja
kemiallisina rapautumistuotteina n. 0,0085 cm/v mannerpinta-alaa kohden.
Jos oletetaan, että mannerten osuus maapallon pinta-alasta on viime 150
miljoonan vuoden aikana ollut likimäärin sama kuin nykyään (6, s. 38—42)
sekä eroosion määräkin pysynyt edellä esitetyn suuruisena, olisi tuona aikana
tapahtunut merten vedenpinnassa nousua, jonka määrä olisi ollut n. 5 km.
On vaikea arvioida, missä määrin rantasedimenttien aiheuttama painuminen
mannerreunustoilla tätä määrää olisi voinut pienentää, sillä toisaalta tapah-
tuu sedimenttien laskeutumista myös koko merialalla ja mahdollisesti valta-
merten keskusselänteiden muodostumisen yhteydessä esiintyy merenpohjan
kohoamista.

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi on merten paineessa voinut tapahtua
nopeita vaihteluita, jos mantereet ovat muodostaneet vedenjakajia ja ilma-
massojen kiertokulku on siirtänyt vettä vesihöyrynä ja sateina meri-
alueelta toiselle (6, s. 32 ja 7, s. 47). Monet paleoklimatologiset ja paleo-
magneettiset todisteet osoittavat, että laajoja alueita nykyisistä mantereista
on paleotsooisena ja mesotsooisena aikana sijainnut lähellä päiväntasaajaa
niin, että tällainen eteläistä ja pohjoista valtamerta erottanut mannervyö
on varsin todennäköisesti voinut olla olemassa. Geologiset ja paleontologiset
tutkimustulokset tukevat mm. oletamuksia, että Pohjois-Amerikan ja Euroo-
pan sekä Aasian ja Pohjois-Amerikan välillä on ollut manneryhteys (18). Myös
ns. Tethys-meri on voinut olla muusta merestä erillinen merialue. Ylöspäin
kohoavat ilmavirrat, joita tapahtuu erityisesti päiväntasaajan tienoilla, ovat
voineet pudottaa toiselta merialueelta siirtyneen kosteuden toiselle meri-
alueelle. Myös voidaan esittää näkökohtia, että jo geologisen ajan alussa on
alkumanner syntynyt juuri päiväntasaajan tienoille maapalloa ympäröivänä
mannervyönä (6, s. 27—33). Näin on voinut syntyä hyvinkin huomattavia
korkeuseroja eri valtamerten välille, joten nekin ovat voineet myötävaikut-
taa mannerten siirtymiseen etenkin meridiaanin suunnassa (7). Transgres-
siot ja regressiot, joita yleisesti on todettu tapahtuneen, saavat selityksensä
esitetyn kaltaisista merenpinnan korkeuden muutoksista ja merenpaineen
mantereita kohottavasta vaikutuksesta.

Kuten on mainittu, voidaan merenpaineen vaikutusta tutkia laskelmalli-
sesti potentiaalivirtauksen sääntöjen avulla, koska Maan manttelin aine
on jäykkään nesteeseen verrattavaa silloin, kun rasitukset ylittävät tietyn
rajan. Niskasen suorittamien laskelmien mukaan noin 200 metrin paksui-
sen vesikerroksen aiheuttama paineen lisäys näyttää riittävän murtamaan

manttelin jäykkyydestä aiheutuvan vastuksen, jos sekä manner- että merialan leveys on n. 3000 km mannerrannikkoa vastaan kohtisuorassa leikkauksessa. Tällaisesta paineen lisäyksestä johtuvat leikkausjännityksen maksimiarvot, jotka tuolloin esiintyvät n. 1000 km:n syvyydessä, ovat suuruudeltaan 10 kp/cm^2 , jolloin mannerta kohden suuntautuva horisontaalivirtaus pääsee alkuun (6, s. 66—68). Sitten on dipl. ins. Heikki Kutvonen täydentänyt näitä laskelmia Niskasen antamien perusolettamusten mukaisesti. Nämä antavat samanlaisia tuloksia kuin Niskasen laskelmat, jos lähtöoletukset ovat samat. Laskelmissa on ollut lähtökohtana se, että lisäpainetta aiheuttavan vesikerroksen paksuus on 200 m, että maapallon pintaosassa on viskositeetiltaan kaksi erilaista kerrosta sekä että painejakaantuma on epätasainen ollen suurempi mannerten luona kuin valtamerien keskellä. Kutvonen käytti laskelmissaan viskositeetin arvoina ylemmässä kerroksessa 10^{23} cgs-yksikköä ja alemmassa kerroksessa 10^{21} cgs-yksikköä sekä eri vaihtoehtoja (1—10) rannikkojen lähellä olevan paineen suhteesta valtamerien keskustassa olevaan paineeseen, jolloin leikkausjännitykset vaihtelivat eri syvyyksillä $10\text{—}80 \text{ kp/cm}^2$ ja vaakanopeudet $10\text{—}80 \text{ cm/v}$. Jos liike jännitysten laukeamisen johdosta lähtee käyntiin aikaisemmin, ovat nopeusarvotkin vastaavasti pienempiä, taikka toisaalta voidaan olettaa, että viskositeetti on suurempi kuin esimerkkitapauksissa on käytetty. Laskelmat osoittavat, että merenpaineen lisäys kykenee toistuvasti synnyttämään mannerten alle suuntautuvia voimia, jotka ovat jopa 10 000—100 000 kertaa suurempia kuin Wegenerin mannerliikuntateorian yhteydessä on voitu osoittaa.

Merenpaineen aiheuttaman liikkeen määrä on lisäksi riippuvainen sen kerroksen paksuudesta, missä virtausta tapahtuu jännitysten ylittäessä aineen viskositeettikynnyksen. Voidaan olettaa, että viskositeetti riippuu paitsi aineen lämpötilasta myös paineesta ja aineen laadusta. Näiden yhteisvaikutus voi aiheuttaa paitsi sellaisen muutoksen viskositeetissa syvemmälle mentäessä, että tietyn rajan alapuolella se on huomattavasti pienempi kuin sen yläpuolella, myös sellainen, että jossakin syvyydessä voi olla kerros, missä viskositeetti on pienempi kuin ylä- ja alapuolella, jolloin liike keskittyy erityisesti tälle kohdalle.¹

¹ Ylijohtaja Aarno Niini esitellessään omaa hypoteesiaan maapallon nykyisten pinnanmuotojen syntymisestä (13, s. 158) on mm. maininnut, että olettamukseni merenpaineen vaikutuksesta ei johda reaalisiin tuloksiin, koska mannerten siirtymisessä on määräävänä siirtyvän aineen määrä ja sen siirtymä matka. Hän tekee laskelman, jossa hän olettaa, että 150 milj. vuoden aikana on kerääntynyt 200 m:n vesikerros ja että siirtyvä ainemäärä olisi 1000 km syvä ja 40 000 km leveä kerros, jolloin hän saa siirtymämatkan pituudeksi n. 1,5 km.

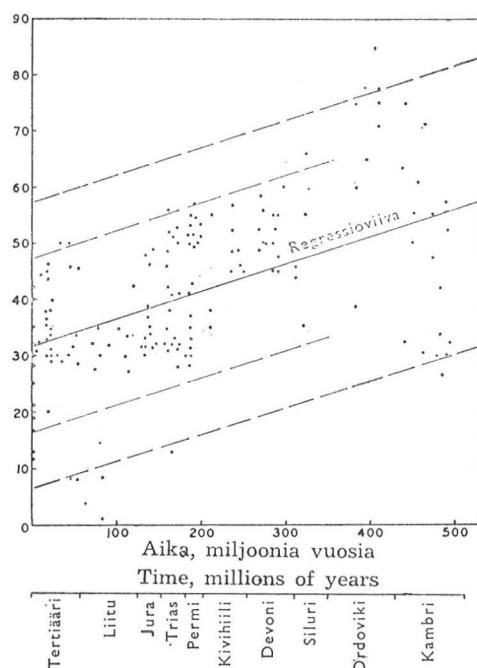
Olen osittain jo aikaisemmin vastannut tähän Niinin väitteeseen (7) kiinnittämällä huomiota mm. siihen, että jos mantereet ovat muodostaneet vedenjakajan pohjoisen ja eteläisen meren välillä, on voinut tapahtua sellaista vedenpinnan nousua, joka on voinut olla yli 1000-kertainen Niinin käyttämään arvoon verrattuna. Jo sellainen

Kun merenpainehypoteesin valossa tarkastelin maapallon karttaa, sopivat mannerten muodot, eri aikoina syntyneiden vuorijonojen sijainti ja poimuttumissuunnat, merenpohjaselänteet, merten syvänehaudat ja tietyt merissä olevat saaret niin hyvin olettamuksiini, että pelkästään niiden nojalla ja ottamalla huomioon Wegenerin mannerliikuntateorian yhteydessä esitetyt näkökohdat muodostui hypoteesini runko. Se antaa mm. mannerliikkeiden yleisistä suunnista huomattavasti toisenlaisen kuvan, kuin mitä Wegener on oletanut.

Seuraavassa esitän eräitä ongelmia, joihin merenpainehypoteesi näyttää antavan tyydyttävän tulkin:

Green (12, s. 83) on esittänyt tilaston lämpimien aridisten vyöhykkeiden sijainnista 500 milj. vuoden aikana (kuva 1). Sen tuloksesta hän mainitsee: »Osoittautuu, että lämpi-

MANNERTEN LIIKUNNOISTA



Kuva 1. Geologisen ajan ja haihtumiskerrostumien leveysasteenmukaisen sijainnin välinen regressio Robert Greenin mukaan.

Fig. 1. Regression of geological time on evaporation distribution in terms of latitude, after Robert Green.

epäsymmetrisyys vedenjakajan sijainnissa päiväntasaajan suhteen, joka olisi vain 1 % merialasta, voisi saada aikaan n. kilometrin merenpinnan nousun 100 000 vuodessa toisella pallonpuoliskolla ja vastaavan merenpinnan alennuksen toisella pallonpuoliskolla, jos sademäärien oletetaan pysyneen nykyisellään ja ilmavirtojen kohoavan ylöspäin tarkalleen päiväntasaajalla. Tällainen jatkuva paine-eron muodostuminen riittäisi 150 milj. vuoden aikana aiheuttamaan tuhansia kilometrejä mannerliikkeitä meridiaanin suunnassa.

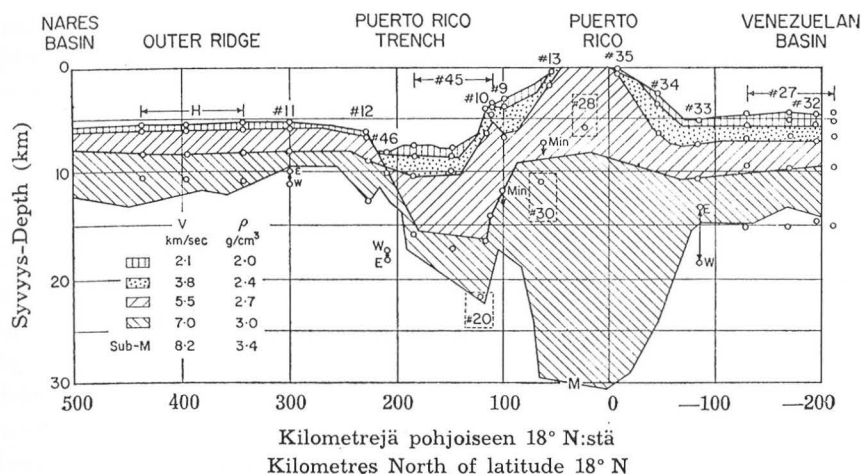
Mutta vaikka tarkastellaan vain eroosion yhteydessä tapahtuvaa merenpinnan nousua ja sedimenttien aiheuttamaa merenpohjan painumista (vrt. esim. 15, s. 302) niiden seikkojen valossa, mitä edellä olen esittänyt, ja otetaan huomioon se, että eroosion kulutus poistamalla maata mantereiden kohdalta aiheuttaa alkuun päässeeseen virtauksen jatkumisen vastaavassa määrässä, tulee paine-erojen kasvusta aiheutuvan liikkeen määrä n. 50-kertaiseksi Niinin käyttämään arvoon verrattuna. Jos tämän lisäksi oletetaan, että merenpaineen johdosta liikkuvan kerroksen syvyys on 100–200 km, muuttuu Niinin esittämä 1,5 km:n siirtymämatka näiden oletamusten vaikutuksesta n. 375–750 km:ksi. Viittaan myös siihen, mitä tämän artikkelin lopussa esitän konvektiovirtauksen ja merenpaineen mahdollisesta yhteisvaikutuksesta, mikä vielä voi lisätä nämä matkat moninkertaisiksi. Merenpaineen lisääntymisestä aiheutuvat siirtymämatkat riittävät siis hyvin siihen, mitä paleoklimatologiset, paleomagneettiset ja geologiset todisteet osoittavat tapahtuneen, ja liikkeiden suunnat ovat sellaisia, kuin merenpainehypoteesin mukaan pitäisi olla.



Kuva 2. Paleomagneettisia napaliikuntakäyriä määritettynä Euroopasta, Pohjois-Amerikasta, Japanista, Intiasta, Australiasta ja Etelämantereelta Doellin ja Coxin mukaan. Numerot osoittavat likimääräistä ikää milj. vuosina.

Fig 2. Palaeomagnetic polar wandering curves for Europe, North-America, Japan, India, Australia and Antarctica. Numbers indicate approximate age in millions years. (After Doell, R. and Cox, A.)

män aridisen ilmastovyöhykkeen keskimääräinen sijainti on liikkunut ekvaattorille päin geologisena aikana keskimäärin 5 leveysastetta 100 miljoonassa vuodessa ja että lämmin aridinen ilmastovyöhyke on aina sijainnut suurin piirtein yhdensuuntaisena ekvaattorin kanssa.» Tilasto voidaan tulkita myös niin, että mantereet ovat vastaavasti siirtyneet pohjoista kohden. Kun tässä tilastossa korrelaatio Greenin mukaan on ajan ja leveysasteen välillä 0,1 %:n tarkkuudella merkitsevä, se varsin vakuuttavasti tukee sitä, että on tapahtunut yleistä mannerten liikettä pohjoiseen ja että napojen liikkeet ovat samana aikana olleet vähäisiä. Tämä saa vielä vahvistuksen Doellin ja Coxin laatimasta kartasta (2, s. 298), joka esittää eri mantereilta havaittuja pohjoisnavan liikkeitä paleomagneettisten tutkimusten nojalla (kuva 2). Jos mantereet ovat liikkuneet pohjoissuuntaan, saavat tässä kartassa esitetyt, toisistaan eroavat napaliikkeen käyrät yksikäsitteisen tulkinnan, kun samalla lähdetään siitä, että Pohjois-Amerikka on myöhäisessä vaiheessa siirtynyt länteen Keski-Atlantin selänteeltä ja Eurooppa siitä itään sekä että Japanin saarijono on kiertynyt myötäpäivään, minkä merenpaine on voinut aiheuttaa. Viimeksi mainittujen olettamusten tueksi voidaan esittää muita tutkimuksia. Myös kuvan 2 nojalla voidaan päätellä, että itse pohjoisnavan liikkeet ovat geologisena aikana olleet vähäisiä. Monet muut paleoklimatologiset ja paleomagneettiset havainnot tukevat näitä päätelmiä (12, s. 177—178, 220, 286, 310—330).



Kuva 3. Puerto Ricon syvänteiden rakenne Bruce C. Heezenin mukaan (15, s. 241).

Fig. 3. Structure of the Puerto Rico Trench after Bruce C. Heezen (15, s. 241).

Edellä selostetut mannerliikkeet poistavat myös sen ristiriidan, joka on paljon askarruttanut geologeja, että samanaikaisesti, kun etelänavan lähistöllä on ollut kivihiili-permiläinen jääkausi, on pohjoisella pallonpuoliskolla vallinnut hyvin lämmin ilmasto, jolloin paksut kivihiilikerrostumat ovat syntyneet. Intian, Australian, Afrikan ja Etelä-Amerikan jääkautiset esiintymät ovat merenpainehypoteesin mukaan voineet muodostua etelänavan lähistöllä samalla, kun tietyt kivihiiliesiintymät ovat syntyneet nykyisiä sijaintipaikkojaan paljon etelämpänä ja alueet ovat pohjoissuuntaisten mannerliikkeiden yhteydessä siirtyneet nykyisille paikoilleen. Myös mm. Grönlandin ja Huippuvuorten eräät lämpimään ilmastoon viittaavat esiintymät ovat tämän mukaan syntyneet jossain 40—50 leveysasteella. Tällainen pitkäaikainen ja yleinen pohjoiseen suuntautuva mannerten liike, joka myös osoittaa syyn mannerten sijaintiin pääosaltaan pohjoisella pallonpuoliskolla, viittaa edellä mainitun ekvaattorin suuntaisen vedenjakajan olemassaoloon pohjoisen ja eteläisen meren välillä.

Kun merenpaine aiheuttaa merenpohjan liikkumista mannerten alle, tulee ymmärrettäväksi, miksi maankuoren paksuus mannerten kohdalla on yli 30 km, mutta merten kohdalla vain n. 5 km (15, s. 200). Heezenin (15, s. 241) esittämä piirros Puerto Ricon syvänteiden luona olevista maankuoren kerrostuksista antaa sangen yksityiskohtaisen kuvan juuri tällaisesta tapahtumasta (kuva 3). Samoin sen kanssa ovat sopusoinnussa mannerten reunustoilla havaitut maanjäristyskeskusten murrospinnat, jotka monilla alueilla ovat hyvin toisiaan muistuttavia (15, s. 123, 124, 127). Myös merenpohjassa havaitut laajat liikkeet kohtisuoraan mannerrannikkoa vastaan sopivat merenpainehypoteesiin (15, s. 136). Samoin merenpohjan nuoruus verrattuna man-

nerten ikään tukee myös tätä samoin kuin sitä, että mantereet ovat vaeltaneet laajassa mitassa, jolloin niiden jättämällä jäljillä on nuorta merenpohjaa.

Vanhimmat kalliomuodostumat ovat mannerten keskustassa, kuten mm. Pohjois-Amerikassa (11, s. 413) ja Aasiassa (3, s. 273) tehdyt havainnot osoittavat, ja kallioperä tulee nuoremaksi, kun lähestytään mannerreunustoja. Tämä sopii hyvin siihen, että merenpaine työntää aina uusia mannerreunustan lähellä olevia merenpohjan vyöhykkeitä vanhempaa mannerrunkoa vastaan.

Poimuvuoristot ovat suurelta osalta muodostuneet merisedimenteistä, osaksi matalaan ja osaksi syvään mereen laskeutuneista. Tämän vuoksi on luotu teoria kapeista ja syvistä geosynklinimeristä, jollaisia tosin nykyään ei ole osoitettu esiintyvän. Mutta matalan meren (shelf) ja mannerluiskan (continental slope) ja sen juurella olevan merenpohjan sedimentit ovat kokoomukseltaan juuri sellaisia, joista poimuvuoristojen oletetaan muodostuneen. Nämä alueet ovat myös sellaisia kapeita ja pitkiä vyöhykkeitä, jollaisia geosynklinimerten on edellytetty olevan.

Merikanjoneiden, joiden synnystä on paljon kiistelty, eikä niille vielääkään ole esitetty lopullista selitystä, voidaan myös olettaa muodostuneen joko suoraanaisina painumina siinä yhteydessä, kun meren pohja painuu mantereeseen alle, tai niiden venytysjännitysten synnyttämänä, joita merenpaine voi aiheuttaa rannikkojen suuntaisesti.

Valtamerten keskusselänteet sopivat sijainnilleen niiksi vyöhykkeiksi, joissa merenpaine jakaantuu molemmilla puolilla olevia mantereita kohden. Meren pohjassa havaittu hiljainen liike keskusharjanteesta poispäin (19, s. 94) sopii nopeustensakin puolesta (2—6 cm/v) yhteen muiden tietojen kanssa manttelin aineen virtausnopeuksista. Samoin muutkin mannerliikuntojen nopeudet, jotka ilmenevät paleoklimatologisista ja napojen liikettä koskevista paleomagneettisista tutkimuksista, sopivat näihin laskelmiin.

Valtamerten keskusselänteiden rakenne runsaine lämmönjohtumisineen ja poikkeuksellisine ainetiheyksineen (15 s. 267, 271) sopii siihen oletukseen, että kun meren pohjassa oleva maankuori repeää merenpaineen vaikutuksesta, alemmaa tunkeutuu uutta ainetta tilalle muodostuen tämän liikkeen yhteydessä keskusselänteiden suuntaisiksi vuoristoiksi (vrt. myös 1).

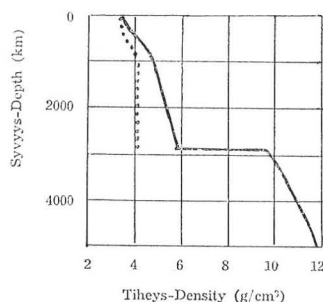
Valtamerten syvänehaudat saavat myös selityksensä, kun oletetaan, että ne osoittavat seutuja, joissa erityisesti on tällaista merenpohjan liikettä mantereeseen alle parhailaan käynnissä eikä isostaattinen tasapaino ole vielä ehtinyt palautua.

Lähtien siitä, että mantereita kohden suuntautunut merenpaine on riippuvainen myös merialan laajuudesta, kuten laskelmat osoittavat, on Tyynen valtameren valtavalla pinta-alalla ollut määräävä vaikutus maankuoren liikkeissä. Tämä myös selittää, miksi juuri Tyyntä valtamerä ympäröi alppilaisten vuorijonojen vyö. Tyynen valtameren paine yhdessä Intian valtameren suunnalta tulleen paineen kanssa on myös voinut synnyttää

vääntöjä mannerlohkoissa, joissa kiteytyneen ja alustaansa lujemman maankuoren paksuus on 5–10 -kertainen merten pohjassa olevaan kuoreen verrattuna. Afrikan repeytyminen irti Etelä-Amerikasta on ehkä saanut alkunsa juuri tällaisesta väännöstä, jossa vipuvartena olevan Euraasian mannerrungon vääntötukikohta on ollut Euroopan ja Pohjois-Amerikan yhdyskannaksella oletetun Tethys-meren pohjoispuolella. Tällaisen väännön pohjalta tulevat ymmärrettäviksi eräät venytystä osoittavat repeämäalueet, kuten Itä-Afrikan hautalaskeumavyöhykkeet, Punaisen meren ja Persian lahden painanteet samoin kuin monet muut karttakuvioiden erikoispiirteet (6, s. 84 ja 7, s. 49). Samoin saa tulkintansa se, miksi Välimeren suunnassa oleva aktiivinen vyöhyke on kohtisuorassa Tyynen meren rannikkoa ympäröivää aktiivista vyöhykettä vastaan (15, s. 201).

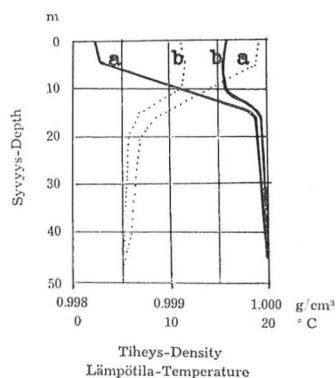
Etsittäessä mannerliikuntojen syitä on viime aikoina huomio kohdistettu erityisesti konvektio-olettamuksiin. Tällaisten virtausten olemassaoloa puoltaa etenkin se, että on muodostunut jyrkkä olkauseros Maan ainetiheydessä manttelin ja sydämen välillä n. 2900 km:n syvyydessä. Jos otetaan huomioon paineen ja lämpötilan vaikutus, on manttelin tiheys Birchin mukaan likimäärin vakio n. 900 km:n syvyydestä alkaen (kuva 4). Maan sydämen muodostuminen on Runcornin mukaan tapahtunut radioaktiivisuuden synnyttämän lämmönkehityksen ja konvektiovirtausten vaikutuksesta (15, s. 35). On esitetty laskelmia, miten konvektiovirtauksissa mahdollisesti syntyvät virtausrenkaat eli kennot kehittyvät (15, s. 145–194), mutta maanpinnan muodoissa ei ole voitu osoittaa sellaisia piirteitä, joita näin säännöllisten virtausrenkaiden muodostuminen edellyttäisi.

Chadwick (15, s. 231) toteaa vuorijonojen muodostumista koskevia hypoteeseja selostaessaan mm.: »Ne fysikaaliset perusideat, joilla konvektio-olettamukset lepäävät, ovat monimutkaisempia kuin ne, jotka perustuvat kutistumis- ja laajentumishypoteeseihin, ja se erikoisrakenne, joka on luotu varsinkin Vening Meineszin toimesta, on vastaavasti enemmän spekulatiivinen.» MacDonald (10, s. 602) lausuu Chamalaun ja Robertsien vastaavista laskelmista, että vaikka hyväksyttäisiin epärealistinen fysikaalinen malli, käsittely ottaa huomioon vain epävakavuuden alun ja heidän käyttämänsä numeeriset parametrit takaavat *a priori* turbulenttisen konvektion niin, että »symmetrisen virtausmallin epälineaarisuuksien hävittäminen eliminoi jopa konvektiohypoteesin, sen että osoitettaisiin järjestynyt vetovoima maankuoren pohjassa». Wilson



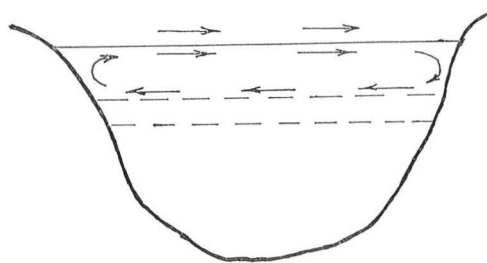
Kuva 4. Maan tiheys eri syvyyksillä Bullenin mukaan (yhtenäinen viiva) ja manttelin tiheys redukoituna maan pinnan lämpötilaan ja paineeseen Birchin mukaan (pisteiviiva) (4 s. 11).

Fig. 4. Density in the earth (after Bullen) and density in the mantle, reduced to surface temperature and pressure (after Birch, dotted line) (4, p. 11).



Kuva 5. Veden tiheys ja lämpötila (piste-
viivat) Venepohjan järvessä, a) 7.8.1930 ja
b) 19.9.1930 (5, sivut 22 ja 57).

Fig. 5. Density and temperature (dotted
lines) of water in Venepohja lake, a) 17.8.
1930 and b) 19.9.1939 (5, p. 22 and 57).

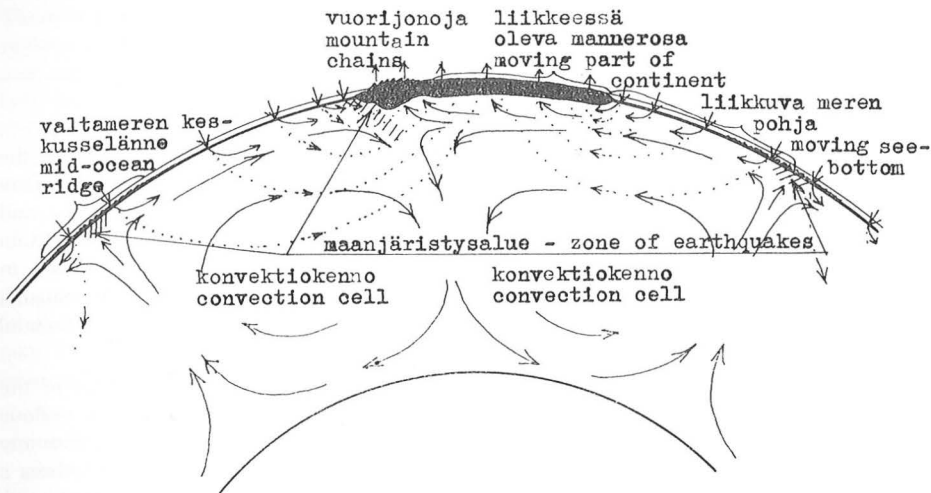


Kuva 6. Tuulen aiheuttamia virtauksia jär-
vessä, jossa on lämpötilakerrostuneisuus
(kaaviollisesti).

Fig. 6. Currents caused by wind in a lake
with thermal stratification (schematically).

(19) on myös olettanut, että konvektiovirtaukset, jotka ovat aika-ajoin muutaneet suuntaansa, ovat mannerliikuntojen aiheuttajia. Nämä virtaussuunnat samoin kuin valtameren saarten nuoruus ja eräät muut hänen esittämänsä uudet todisteet sopivat hyvin merenpainehypoteesiin. Wilsonin hahmottelema kartta alkumannerten sijainnista on kuitenkin ristiriidassa monien paleoklimatologisten ja paleomagneettisten havaintotulosten kanssa.

Mutta konvektiovirtausten mahdollisuutta voidaan tarkastella myös merenpainehypoteesin valossa. Vertausmalli tähän on saatavissa järvissä tapahtuvista konvektiovirtauksista. Ne jakavat vesirungon tiheydeltään kahteen erilaiseen kerrokseen, päällysveteen ja alusveteen sekä näitä erottavaan olkauserrokseen, väliveteen (kuva 5). Tämä kerrostuneisuus johtuu tuulen aiheuttamasta virtauksesta veden pinnassa (kuva 6). Merenpaineen vaikutus Maan pintakerroksessa muistuttaa tuulen vaikutusta vedenpintaan. Samoin kuin keveämpi pintavesi sekoittuu alempana olevan raskaamman veden kanssa, kun tuulien vaikutuksesta vastarannalle kerääntynyt vesi lähtee virtaamaan syvemmällä vastakkaiseen suuntaan, samoin merenpaine pakottaa merenpohjaa ja sen alla olevaa ainetta painumaan mannerrannikolla syvyyteen, mitä osoittaa maanjäristyksen murros-pinta. Tätä helpottaa se, että manttelin aine on lähempänä pintaa tapahtuneen virtauksensa aikana jäähtynyt ja tullut raskaammaksi. Toisaalta kun merenpohja repeää keskusharjanteen kohdalla ja liikkuu kahteen suuntaan, nousee tässä syvemmältä ainetta pintaan ja näin syntyy konvektiovirtauskennoja. Sen kerroksen paksuus, joka lähtee virtaamaan merenpohjassa tapahtuvan paineen lisäyksen vaikutuksesta, ei tarvitse olla suuri sen jälkeen, kun syvälle ulottuvat virtausviivat ovat ensin panneet konvektiovirtauksen käyntiin. Esimerkiksi 100—200 km:n paksuinen ja ehkä ohuem-



Kuva 7. Eräs oletamus, miten merenpaineen aiheuttama konvektiovirtaus voi olla suuntautunut. Pisteviivat osoittavat vaikutusviivojen suuntaa ennen kuin konvektiovirtaus on päässyt käyntiin, jos manttelin viskositeetti on homogeeninen.

Fig. 7. An assumption as to how the motion in mantle caused by the pressure of seas and convection flows can be directed. The dotted lines show the direction of the influence lines before convection flow if the viscosity in mantle is homogenous.

pikin kerros voi olla hyvinkin riittävä. Tämän alla oleva aine kiertää konvektiokennossa mukana osittain sen johdosta, että raskaampaa ainetta erottuu Maan sydämeen aineen ollessa syvällä sulassa tilassa — sydämen suuri tiheyshän osoittaa tällaista tapahtuneen —, jolloin ylöspäin tapahtuvassa virtauksessa on nouseva osa kennosta keveämpää kuin laskeva osa. Tämä johtuu myös aineen lämpiämisestä syvemmällä.

Jos tämän lisäksi manttelissa tapahtuu radioaktiivisuuden johdosta sellaista lämmönkehitystä, joka lisää työntävää painetta ylöspäin, tämä tehostaa merenpaineen alulle panemaa konvektiovirtausta, jolloin merenpaineen merkitys kohdistuu erityisesti virtauksen suunnan ja mahdollisesti myös nopeuden säätämiseen. Radioaktiivisen hajaantumisen olettaisi kuitenkin olleen geologisen ajan alussa suuremman kuin myöhemmin, jolloin mannerliikuntoja on erityisesti tapahtunut. Kuvassa 7 on kaavamaisesti esitetty eräs oletamus tällaisesta merenpaineen aiheuttamasta konvektiovirtauksesta. Pilkkuviivat osoittavat influenssiviivojen suuntaa silloin, kun mitään virtausta ei ole käynnissä ja oletetaan manttelin aine täysin homogeeniseksi viskositeetin suhteen. Virtauksen lähtiessä käyntiin muuttuvat virtausviivojen suunnat edellä kuvatun konvektiotyönnön vaikutuksesta nuolten osoittamiksi.

Esitän tässä samalla kiitokseni professoreille Ilmo Hela, R. A. Hirvonen ja E. Niskanen sekä dipl. ins. Heikki Kutvoselle heidän antamastaan avusta ja myönteellisestä tuesta tämän tutkimuksen suorittamisessa.

REPORT

Sea Pressure as a Factor Shaping the Earth's Crust

In the course of my studies concerning the changes that may have occurred in the water quantities of the seas, I was also led to contemplate the effects which the pressure of the seas may exert, assuming that the water volume is continuously increasing and that the water level can rise owing to other reasons too. Also erosion and the formation of sediments can increase the pressure against the sea bottom. This has resulted in the hypothesis that the pressure of the seas plays a remarkable role as a factor causing certain geological phenomena, such as the generation of mountain chains, the continental drift, and the bottom shapes of the oceans (6 and 7).

An attentive scrutiny of the map of our globe revealed such good agreement of the continental shapes, of the location of mountain ranges that have originated at various times and their direction of folding and of the submarine ridges and trenches with my assumptions, that my hypothesis was formed, merely on their strength, which hypothesizes a considerably different picture of the general continental drift directions as presents Wegener's theory.

Erosion caused by water and wind, carrying along substance from the continents into the sea, lessens the vertical pressure in the continents. Simultaneously vertical pressure increases in the sea floor. For this reason, the difference in pressure grows twice as rapidly as the quantity of transported soil. A great part of alluvial sediments descend on a narrow zone near the coast or in outlets of rivers. It has, therefore, been assumed that the area where the earth's crust is weighed down by these sediments is limited to the immediate vicinity of the coast. In water the loss of weight of the particles of soil is, however, nearly 40 per cent. This lightens the pressure of unconsolidated sediments against the bottom. The rigidity of the crust also resists considerable pressure if the loaded area is narrow or otherwise of minor extent. Furthermore, the eroded substance diminishes the volume of the sea. Correspondingly, the water level rises over the whole extent of the sea, even where no sedimentation occurs. On account of these circumstances the sedimentation increases pressure in all sea areas. A process which obviously can be attributed to pressure increment all over the seas, may have been supported by heavier stress and sinking of the crust near the coasts, i.e. the movement of the ocean floor in under the continental margin. Without a movement of this kind the unconsolidated sediment deposits bordering the coasts would have to be immensely larger than they are.

Professor Kullerberg mentioned the estimate proffered by Kalle (8, p. 118) as the most dependable one concerning the quantity of rocks and soil eroded by water. According to this estimate there occurs in humid areas transportation of weathered substance from the continental surface at the mean rate of 0,0085 cm/yr per continental area. Assuming that the proportion between continental and sea surface has remained approximately equal during the last 150 million years (6, p. 36—40) and that the erosion, too, has remained nearly the same as above, it would mean a rise of about 5 km in the sea level in the course of that time. It must be taken into consideration that the sedimentation occurs also over the whole extent of the seas, and that the ocean floor possibly rises in connection with the formation of mid-ocean ridges.

In addition to the aforesaid, considerably rapid fluctuations in sea pressure may have occurred if the continents have been so grouped that watersheds have developed between different seas, with the result that the circulation of air masses has been able to transport water, in the form of water vapour, from one sea area to another.

There is a lot of palaeoclimatologic and palaeomagnetic evidence indicating that extensive regions of the present continents have been located close to the equator in the palaeozoic and mesozoic era, and implying that the existence at that time of such a continental belt separating the southern from the northern ocean has a fair probability. It is also possible to present circumstances in favour of the contention that already at the beginning of geological time the original continent developed near the equator, as a continental belt encircling the globe. The air masses ascending over the equator may then have precipitated the moisture derived from one hemisphere in the ocean of the other hemisphere. In this manner even very considerable differences in altitude may have been produced between the different oceans so that this, too, has possibly contributed to continental drift, most of all in the direction of the meridian. The transgressions and regressions commonly observed in geology may likewise find their explanation by such fluctuations and by changes that have occurred in the quantity of sea water and the pressure of the seas.

The effect of sea pressure can be investigated mathematically, because the substance of the Earth's mantle is comparable to a viscoplastic material when the stresses exceed a given limit. The flow of such fluids, again, obeys the laws of potential flow (9). At my request, Professor E. Niskanen has made calculations concerning the pressure increments sufficient to overcome the resistances due to the rigidity of the mantle (6, p. 66—69). For instance, if the width of a sea area is 3000 km in cross-section perpendicular to the continental coast line, then, at an increment equivalent to 200 m hydrostatic pressure, the shear stress maxima occurring at about 1000 km depth are in the order of 10 kg/cm², enough for a horizontal flow about 4.6 cm/yr towards the continent to get started.

Subsequently, Niskanen's calculations have been supplemented by Mr. H. Kutvonen, M.Sc. in Eng., building upon the basic assumptions given by Niskanen. At equal values of viscosity etc. they lead to similar results as those made by Niskanen. As a basis he has supposed that there exist in the mantle two layers of different viscosity, and that pressure is greater in the vicinity of the continents than in mid-ocean. If the pressure in mid-ocean is 20 kg/cm² and the coefficients of viscosity in the upper layer 10²³ and in the lower layer 10²¹ cgs-units, the shear stress values rise to 10—80 kg/cm² and likewise, the horizontal velocities to 10—80 cm/yr. If the viscosity is greater, the velocities are correspondingly lower. These calculations show clearly that the increment of sea pressure is sufficient to produce, repeatedly, forces directed in under the continents, of a magnitude about 10000—100000 times greater than any forces connected with calculations concerning Wegener's theory of continental drift.

In the following, I shall present some groups of problems which seem to receive an acceptable interpretation by this hypothesis. At the same time, the assumptions I have made on the basis of the major global forms are supported by observations made in connection with these problems.

Green (12, p. 83—85) has presented a statistic concerning the location of warm, arid zones during 500 million years (Fig. 1). Of the results, he mentions: 'It appears that the mean position of the warm arid climatic belt has moved equatorwards through geological time at a mean rate of five degrees of latitude each 100 million years, and that the warm arid climatic belt has always lain grossly parallel to the Earth's present equator. 'This may also be interpreted as a result of a corresponding general continental drifting northwards. As this statistic is 'significant at the 0.1 per cent level', it supports rather convincingly the idea that a general movement of the continents toward the north has taken place and that the motion of the Earth's poles during the same time has been fairly negligible. This finds corroboration in the map presented by Doell and Cox (12, p. 298), which shows the movements of the north pole observed on different continents on the strength

of palaeomagnetic studies (Fig. 2). If the continents have moved northwards, (also westwards from the Mid-Atlantic Ridge in the case of North-America and eastwards in that of Europe) and if, furthermore, certain torques caused by sea pressure have taken place (for example in Japan), the polar movement curves presented in the said map find an unambiguous interpretation, and they are also consistent with the thesis that the movements of the north pole during the last 500 million years have been negligible. Many other palaeoclimatologic and palaeomagnetic observations (Schwarzbach, 12, p. 286; Craig, 12, p. 220; King, 12, p. 310—330; Nairn & Thorley, 12, p. 177—180) also support the assumptions.

These lines of development render understandable the fact that at the same time as the carboniferous-permian glacial period prevailed in the vicinity of the south pole, a very warm climate should have existed on the northern hemisphere, during which the great coal deposits have been formed. The assumptions based on sea pressure effects, concerning the directions of continental movements, would seem to indicate that the glacial deposits in India, Australia, Africa and South-America would have been formed in the vicinity of the south pole and that certain coal deposits were originally formed in more southern parts of the Earth. Also certain deposits of later origin, for example on Spitzbergen and Greenland, would have come into existence somewhere on the 40th to 50th degree of latitude and been displaced from there to their present location. The movement of the sea-bottom caused by sea pressure is directed in under the continents, because the maximum velocity of flow occurs at a depth of several hundred kilometers. This makes clear why the thickness of the Earth's crust is more than 30 km at the continents but about 5 km under seas (15, p. 200). Sediments and crust on the sea bottom are jammed in under the continental crust. The diagram presented by Heezen (15, p. 241) of the strata found adjacent to the Puerto Rico trench furnishes rather a detailed illustration of exactly this kind of occurrence (Fig. 3). Similarly consistent with this interpretation are the earthquake fault planes on the margins of continents (Benioff, 15, p. 123—127, Chadwick, 15, p. 203) and the large movements observed in the sea-bottom (Vacquir, 15, p. 136; Heezen, 15, p. 260—261). Also the young age of the rocks found on the sea bottom, as compared with the age of the continental rock base, supports this idea, as well as the one that the continents have wandered on a large scale, with the result that there is young sea bottom in the places they have left behind.

On the continents, e.g. in North-America (11, p. 413) and in Asia (3, p. 273) the oldest rock formations are found in their centre, and they are generally younger towards the continental margins. This is well-consistent with the idea that the sea pressure constantly pushes new zones close to the continental edge against the older continental body.

The folded mountains have largely been formed of marine sediments, partly deposited in shallow and partly in deep seas; for this reason the theory of narrow and deep geosyncline seas has been created. But the sediments of a shelf and of the continental slope and the sea bottom beginning at its base have the composition of which the folded mountains are assumed to be made up. Furthermore, they occur as such narrow, long belts as the geosyncline seas have been assumed to be.

The submarine canyons, the origin of which has caused much dispute and has not even today found its ultimate explanation, can also be assumed to come into being either directly as depressions when the bottom is pushed in under the continents, or as a result of the tensile stresses which the sea pressure may cause in a direction parallel to the coasts.

The mid-ocean ridges are appropriate, as regards their location, to be considered as the belts at which the sea pressure is divided towards the continents on either side. The slow movement of the ocean floor away from the ridges (19, p. 94) is consistent, also as

regards its velocity, with the above-mentioned calculations concerning the velocity of the mantle substance. Similarly, the other rates of continental movement, which are manifested by the palaeomagnetic studies on the polar motions, are also in agreement with these calculations (Fig. 2).

The structure of the mid-ocean ridges (Heezen, 15 p. 255—273) and the high thermal conductivity observed in them are consistent with the assumption that when the sea bottom is ruptured at this place as a result of the sea pressure, new matter emerges in its place from farther down and is formed into high submarine mountain chains paralleling the mid-ocean ridges, at the same time being the cause of high thermal conductivity and unusual densities.

The ocean trenches also find an explanation if it is assumed that they point out the places where, particularly, just now such displacement of the sea bottom in under the continents is in progress and the isostatic equilibrium has not yet had time to be restored.

Starting from the premise that the pressure of the seas is also dependent on the extent of the water body, as the calculations show, the huge area of the Pacific ocean is found to have had a decisive influence as regards the continental movements. This also provides an explanation why particularly the Pacific should be surrounded by a belt of Alpine mountain ranges. This pressure of the Pacific Ocean, together with that of the Indian Ocean, has produced torques which have given rise to ruptures of continental blocks. The detachment of Africa from South-America may perhaps have been initiated partly just by this torque, which has had its fulcrum in the connecting isthmus between Europe and North-America north of the assumed Tethys sea. This assumption of a torque also renders rational the rift-valley fault belts in East-Africa, which are produced by tension, the ruptures of the Red Sea and the Gulf of Persia, and many other special features of the map configurations. Likewise, an interpretation is found to account for the fact that the active belt running in the direction of the Mediterranean is at right angles to the active zone encircling the Pacific Ocean (Chadwick, 15 p. 201).

In the efforts to clarify the origins of continental movements special attention has lately been paid to the convection currents. A fact which especially speaks in favour of the existence of such currents is, that there has developed a sharp discontinuity in the density of the Earth's substance between mantle and core at the depth of about 2900 km (Fig. 4). Bearing in mind the effects of pressure and temperature, the mantle density, according to Birch, is nearly constant from the depth of about 900 km on (4, p. 11). According to Runcorn, the Earth's core is developed, as a result convection currents caused by heat generation of radioactive origin. Calculations have been presented about the development of convection cells (15, p. 145—194), but the existence of so regular cells would necessarily show in features of the Earth's crust, and such evidence has not been produced. In his article on the hypotheses concerning mountain range formation Chadwick (15, p. 231) states among other things: »The basic physical ideas upon which convection hypotheses, rest are more complex than those which underlie contraction and expansion hypotheses, and the superstructure which has been erected, notably by Vening Meinesz, is correspondingly more speculative.» Mac Donald (10, p. 602) observes about corresponding calculations made by Chamalaun and Roberts: »Even if the unrealistic physical model is accepted, the treatment considers only the onset of instability. The numerical parameters used by Chamalaun and Roberts guarantee a priori a turbulent convection, so that the destruction by nonlinearities of the symmetric flow pattern eliminates the very purpose of the convective hypothesis, that of providing an organized dragging force on the base of the crust.» Wilson (19), too, assumes that continental movements are caused by convection currents which, at times, have changed their direction. He presents maps showing pressure directions in the oceans. These, as well as the young age of ocean islands and certain other new proofs he has put forth are fully consistent with the ocean

pressure hypothesis, whereas Wilson's map outlining the site of the original continent is incongruous with several palaeoclimatologic and palaeomagnetic data.

But the possible existence of convection currents can be considered in the light of the ocean pressure hypothesis as well. A model for comparison offers itself in the convection currents occurring in lakes. They divide the water body in two layers of different density, the epilimnion and the hypolimnion and a separating layer, the metalimnion (Fig. 5). This stratification is due to flows in the surface caused by wind (Fig. 6). The influences of sea pressure upon the Earth's surface resemble the effects of wind upon the surface of the lake. Just as the lighter water on the surface gets mixed with the heavier water lower down, when the wind forces it downwards meeting the opposite shore, in the same way does the sea pressure force the ocean floor and the substance under the floor to sink deeper at the continental margins, as the fault zones of earthquakes show. This is made easier by the fact that mantle substance has cooled down and become heavier while the flow proceeds nearer the surface. On the other hand, when a rupture occurs in the ocean floor at the mid-oceanic ridge and the crust moves apart, substance emerges from the deeper parts to the surface and in this way a convection cell develops. The layer in which the flow begins, as a result of pressure increment in the sea floor, need not be very deep when the convection current is first started by influence lines going to greater depth. The convection continues partly because heavier matter in great depths selectively separates and sinks into the core while the substance is in fluid condition, and, again, in the upward flow, the rising part of the current cell is of lower density than the falling part. This is partly due to the fact that the substance warms up reaching greater depths.

If, in addition, radioactivity causes in the mantle such generation of heat which increases the upward pressure, this will strengthen the convection current started by sea pressure, whereat this pressure is especially significant in regulating the direction, probably also the velocity of the flow. One would, however, expect the radioactive decomposition to have been greater in early geological times than in later times characterized by continental movements. Fig. 7 presents a schematic picture of convection currents caused by sea pressure. The dashed lines indicate the direction of influence lines when no current is in action. The mantle substance is assumed to be perfectly homogeneous with regard to viscosity. When the flow sets out, the directions of the influence lines change on account of the convection push described above, as indicated by the arrows.

KIRJALLISUUTTA—LITERATURE

- (1) Bullard, E. C., 1963, Heat flow from the interior of the Earth, XIII general Assembly, Int. Un. of Geod. and Geoph., Berkeley 1963, Vol. 1, Upper Mantle Symp.
- (2) Doell, R. and Cox, A., 1961, Paleomagnetism, Landsberg, H. F. and van Miegheem J., Advances in Geoph., Acad. Press, New York.
- (3) Eskola, Pentti, 1951, Muuttuva Maa, WSOY, Helsinki.
- (4) Heiskanen, V. A. and Vening Meinesz, F. A., 1958, The Earth and its Gravity Field, Mc Graw-Hill, New York.
- (5) Järnefelt, Heikki, 1958, Vesiemme luonnontalous, WSOY, Helsinki.
- (6) Kaitera, Pentti, 1963, Merten paine Maan muovaajana, WSOY, Helsinki.
- (7) Kaitera, Pentti, 1963, Merten paine maapallon muovaajana, Geologi n:o 4—5, Helsinki.
- (8) Kalle, Kurt, 1945, Der Stoffhaushalt des Meeres, Probleme der kosmischen Physik, Akad. Verl. Becker & Erler, Leipzig.
- (9) Kaufmann, W., 1954, Technische Hydro- und Aeromechanik, Springer Verl., Berlin.
- (10) MacDonald, Gordon J. F., 1963, Runcorn, S. K., Continental Drift, Transact. Am. Geoph. Un.,

Vol. 44, Nr 2, June, New York. (11) Magnusson, N. H., 1960, Age Determination of Swedisch Precambrian Rocks, Geol. För. i Stockh. Förh., Nr. 503, Stockholm. (12) Nairn, A. E. M., 1961, Deskriptive Palaeoclimatology, Intersc. Publ., New York. (13) Niini, Aarno, 1963, Maapallon nykyisten pintamuodostumien syntyminen, Terra n:o 2, Helsinki. (14) Oftedahl, Christoffer, 1963, Teorien om kontinentenes vandring, Tekn. Ukeblad, Oslo. (15) Runcorn, S. K., 1962, Continental Drift, Acad. Press, New York. (16) Schneidegger, Adrian, S., 1963, Principles of Geodynamics, Springer Verl., Berlin. (17) Waterschoot van der Gracht, 1928, Theory of Continental Drift, Am. Ass. Petr. Geol., Tulsa, Oklahoma. (18) Wegener, Alfred, 1962, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, Fr. Vieweg & S., Braunschweig. (19) Wilson, Tuzo, 1963, Continental Drift, Sc. Am., April, New York.

Vammala 1963, Vammalan Kirjapaino Oy.