

Mega-Undationen als Ursache der Kontinentverschiebungen*)

Von R. W. van Bemmelen (Utrecht).

Es ist für mich ein Vergnügen und ein Vorrecht, in Hannover sprechen zu können über ein Thema, das mich in den letzten Jahren besonders beschäftigt hat — die geotektonischen Folgen der Mega-Undatorischen Beulungen und Senkungen der Erdoberfläche.

Wir befinden uns hier in Hannover mitten im klassischen Gebiet der Halokinese mit ihren lokalen Salzdomen und Randsenken — das sind Lokal-Undationen, die kleinste Klasse der wellenartigen Verbiegungen der Erdoberfläche. Hier möchte ich nun einige Gedanken äußern über Mega-Undationen, welche die größte Klasse der Undationen vertreten.

Die Undationen der Erdoberfläche, oder Oszillationen, wie sie von HAARMANN (1930) genannt wurden, sind geodynamische Äußerungen der endogenen Energie der Erde.

Im Falle der aufsteigenden Salzstöcke ist die Art und die Tiefenlage der Energie sehr gut bekannt. In der Sedimenthaut der Erde (die "Epiderma") hat die Sonnenenergie im Zusammenspiel mit der Sedimentation Salzablagerungen verursacht, deren relativ geringes spezifisches Gewicht die Ursache ist ihrer Tendenz aufzusteigen. Dieses Aufsteigen des Salzes verursacht Massenkreisläufe innerhalb der sedimentären Ablagerungen — die Halokinese. (TRUSHEIM, 1960). Das Grundprinzip zur mechanischen Erklärung der Halokinese ist, daß lithogene Elemente, die relativ zu leicht sind für die Stelle, welche sie einnehmen, die Neigung haben, aufzusteigen, wobei an der oberen Seite ein pilzartiges Verfließen des Salzes stattfindet. Es treten dabei Massenkreisläufe auf, die ich primär steigende Zirkulation („buoyant circuits“) nenne.

Umgekehrt: wenn sich irgendwo eine Erdmasse befindet, die durch irgendeine Ursache spezifisch schwerer ist als ihre Umgebung, dann hat diese lithogene Masse die Neigung abzusinken. Sie verursacht dann einen

*) Vortrag für die Deutsche Geologische Gesellschaft, 6. April 1966, im Alfred-Bentz-Haus, 3-Hannover-Buchholz.

**) Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. R. W. van Bemmelen, Geologisches Institut der Rijks-Universität Utrecht, Oude Gracht 320, Utrecht, Niederlande.

primären absteigenden Massenumlauf wie die Stange einer hydraulischen Druckpumpe („foundering circuits“).

Die potentielle Energie der Salzbewegungen ist gravitativ bedingt; es ist die Energie der Lage, welche jedem Massenpartikelchen seine eigene Bewegungs-(Verlagerungs-) Fähigkeit verleiht. W. SCHMIDT (1932) nennt das die Wegefähigkeit der lithogenen Elemente. Es hängt (a) von den physikalischen Materialeigenschaften, und (b) von den Vektoren des Spannungsfeldes ab, wie und mit welcher Geschwindigkeit Massenverlagerungen stattfinden werden.

Wenn man einen Würfel feuchten Tones mit Kantenlängen eines Zentimeters auf den Schreibtisch stellt, dann wird man wahrscheinlich noch keine Verfließung beobachten. Wenn man jedoch versucht, einem Würfel mit 10 cm Kantenlänge zu machen, dann wird der Würfel sich langsam ausbreiten. Ein Würfel feuchten Tones mit Kantenlängen eines Meters wird jedoch schnell zu einem flachen Kuchen verfließen.

Für uns als Beobachter spielen sich solche tektogenetische Prozesse innerhalb des Rahmens unseres Schreibtisches ab und wir können sie mit Hilfe dieses Bezugnehmens „fixistisch“ beschreiben. Eine Ameise, die von dem verfließenden Würfel überwältigt wird, würde jedoch bei diesem Erlebnis zu „mobilitischen“ Betrachtungen kommen, weil die Massenverlagerung die Begrenzung ihres Blickfeldes überschreitet. Es ist die relative Bedeutung der strukturbildenden (tektonischen) Prozesse, die maßgebend ist für das Gedankenmodell, das wir uns darüber machen. (Arbeitshypothese). Die verbindende Hypothese beider Anschauungsweisen muß gegründet sein auf die Relativität der Bewegungen.

In der Natur kann man Hebungs- und Senkungsgebiete beobachten, die sehr verschiedene Durchmesser und Amplituden haben. Ich unterscheide fünf Klassen der Undationen der Erdoberfläche:

Klasse I umfaßt die ganz kleinen **Lokal-Undationen** mit Durchmessern in der Ordnungsgröße eins oder einiger Kilometer und Amplituden von einigen Hundert Metern. Hierzu gehören die Salzstöcke und lakkolithische Magmaintrusionen in die Sedimenthaut oder Epiderma der Erde.

Klasse II umfaßt die **Minor-Undationen** mit Durchmessern in der Ordnungsgröße von zehn Kilometern und Amplituden von einigen Kilometern. Die batholitischen Plutone und Gneisdome im Grundgebirge (Mesoderma) gehören zu dieser Klasse.

Klasse III umfaßt die **Meso-Undationen**, deren Durchmesser hundert bis einige hunderte von Kilometern erreichen kann, und deren Ampli-

tude fast 10 km groß werden kann. Hierzu gehören die Kettengebirge (wie die Alpen) und Dome (wie die Black Hills in den Vereinigten Staaten von Nordamerika). Die ursächlichen Massenumläufe dieser Meso-Undationen befinden sich im unteren, mobilisierten (magmatischen und migmatischen) Teil der Kruste, dem Bathyderma, welche an der Unterseite begrenzt werden von Abbiegungen der Moho-Diskontinuität bis zu Tiefen von 50 bis 75 km (statt der Normaltiefen von etwa 30 km).

Klasse IV umfaßt die Geo-Undationen mit Breiten von einigen Tausenden von Kilometern. Die maximal erreichbare Amplitude der Erdoberfläche nimmt jedoch wieder ab, weil die Reaktionserscheinungen der Erosion und der Sedimentation immer mehr an Einfluß gewinnen. Die interkontinentalen geosynklinalen Senkungsgebiete und Becken bleiben im Allgemeinen Flachseen und die großen Aufwölbungen übersteigen im Durchschnitt selten die Höhen der Mittelgebirge. Zu dieser Größenordnung der Undationen gehören auch das NW-germanische Becken und das skandinavische Hebungsgebiet.

Klasse V ist die allergrößte Art der geoidalen Verbiegungen, die Mega-Undationen. Diese sind so groß, daß man sie kaum mehr mit den normalen geologischen Methoden fassen kann. Die ausgedehnten Felder gravitativer Anomalien mit Durchmessern von 5 bis 10.000 km, wie sie mit Hilfe künstlicher Satelliten festgestellt worden sind (KAULA, 1963), sind wahrscheinlich Andeutungen für solche Großverbiegungen der Erde. Das große Feld der Minusanomalien im Indischen Ozean mit dem Carlsberg-Rücken im Zentrum, dehnt sich vom Kongo im Westen bis Java in Osten. Das ist ein Durchmesser von ungefähr 10.000 km. RUNCORN hat die Felder mit negativen Anomalien als Aufsteigungsgebiete der Konvektionszellen gedeutet und jene mit positiven Anomalien als Absenkungsgebiete. Er hat die gravitativen Anomalien also gedeutet als Folge von Temperaturunterschieden zwischen den aufsteigenden und absteigenden chemisch homogenen Massen.

Hierzu können zwei Bemerkungen gemacht werden. Erstens sind die Gradienten so schwach und die Ausdehnung dieser Felder so groß, daß die bezüglichen Störungen des isostatischen Gleichgewichtes sehr tief liegen müssen. BERNAL (1961), KNOPOFF (1964) und andere sind der Meinung, daß die kausativen Massenkreisläufe (entweder laminäre oder turbulente) im Innenmantel stattfinden. Der Außenmantel und die Kruste sind nur die Wirkungssubstanz dieser tiefen Motore. Zweitens haben thermale Konvektionsströmungen die *conditio sine qua non* der chemischen Homogenität. Es ist jedoch sehr fraglich, ob diese Bedingung der chemischen Homogenität wohl zutrifft für die thermalen Konvektionsströmungen, die den ganzen Mantel (vom Kern bis zur Kruste) durchlaufen.

Die Darlegungen bezüglich Konvektionsströmungen gehen manchmal von den Grundgedanken aus, daß es schwer ist, sich einen anderen Mechanismus der Kontinentverlagerungen von mehr als 1000 Kilometern vorzustellen (siehe z. B. die Bemerkung GIRDLETS in dem „Continental Drift Symposium“, London 1965 S. 275). Man ist sich dann nicht klar, daß auch die potentielle Energie der Lage, welche die weitläufige Abströmung des Materials an der oberen Seite einer Konvektionszelle verursacht, auch das seitwärtige und autonome „Abströmen“ von Krustenteilen zufolge haben kann. Es ist dabei gar nicht nötig, daß diese Krustenteile passiv, mittels Friktionskupplungen mitgeschleppt und verfrachtet werden. Es genügt schon, sie im Bezug auf ihre geoidale Gleichgewichtslage etwas zu heben und schief zu stellen. Die andradische Viskosität der höheren Stockwerke der Erde verursacht dann ein gleitbrettartiges Verfließen, wie ein schiefgestellter Stoß Bücher. Das unterste Buch oder Stockwerk kann an derselben Stelle bleiben, und braucht nur etwas gehoben zu werden. Das oberste Buch oder Stockwerk gleitet am weitesten vorwärts als Folge seiner eigenen autonomen Energie der Lage. Dieser Mechanismus steht auch z. B. WEERTMAN (1962) und OROWAN (1965, Fig. 6, S. 293) vor Augen.

Die Darlegungen VERHOOGENS (1965), daß Phasenübergänge im Außenmantel die Konvektionsströmungen nicht ernstlich behindern, sind sehr überzeugend, wenn die Verhältnisse im ganzen Mantel der — nicht explizit erwähnten — Grundvoraussetzung thermaler Konvektionsströmungen entsprechen würden, nämlich die chemische Homogenität. Aber kann man wohl hinnehmen, daß der ganze Mantel aus einem Forsterit-Fayalitgemisch eines bestimmten Verhältnisses besteht, von der Basis in fast dreitausend Kilometer Tiefe bis zur Kruste? Das ist thermodynamisch, physikalisch-chemisch und geophysisch höchst unwahrscheinlich. KNOPOFF (1964) weist darauf hin, daß solch eine chemische Homogenität in dem ziemlich rheiden Innenmantel vielleicht besteht oder angestrebt wird. Aber für den Außenmantel ist eine Homogenität der chemischen Zusammensetzung sehr fraglich. Und damit scheidet man an der Grundvoraussetzung thermaler Konvektionsströmungen.

Wenn Massenverlagerungen auch im Mantel stattfinden — ich selbst gehe von dieser Voraussetzung aus — dann verursachen diese Platzaustausche und Umläufe des Materials, welche in den verschiedenen Teilen der Strömungen eine verschiedene Zusammensetzung und Dichte haben können. Es sind dann nach Gleichgewicht strebende geodynamische Prozesse, welche die Folge sind von gleichgewichtsstörenden, physikalisch-chemischen Prozessen (siehe VAN BEMMELEN, 1965 c).

Wenn wir jetzt die gravitativen Reaktionen auf die Undationen überblicken, dann sehen wir, daß die geodynamischen Prozesse, welche die

kleineren Klassen (I, II und III) begleiten, nicht tief gehen, und etwa auf die äußersten 100 km beschränkt sind. Das ist die „Tektonosphäre“ im engeren Sinne. Aber für die Klassen IV und V (Geo- und Mega-Undationen) muß angenommen werden, daß auch Massenverlagerungen und Umläufe im Mantel stattfinden. Die Tektonosphäre im weiten Sinne reicht sicher bis in den Innenmantel. Diese größten Klassen müssen auf Grund einer „Stockwerktektonik *sensu lato*“ analysiert werden. (1966 e).

Im folgenden werden die Relationen zwischen Mega-Undationen und geotektonischen Prozessen in der Kruste (wie Kontinentverlagerungen, ozeanische und kontinentale Schwellen, Riftsysteme, große Seitenverschiebungen, alpinotype Orogenese) kurz erläutert.

Es wird dabei von der Voraussetzung ausgegangen, daß im Innenmantel exotherme, physikalisch-chemische Prozesse auftreten, welche das hydrostatische (rheostatische) Gleichgewicht stören. Das können Aufspaltungen des Materials sein in metallischen Fraktionen, welche zum Kern abge-saigert werden, und etwas kieselsäurereichere Restschmelzen, die zum Außenmantel aufsteigen. Solche „Hypodifferentiationen“ können die Folge sein anderer Prozesse, die das physikalisch-chemische Gleichgewicht im Innenmantel stören. HOLMES (1965 S. 991—993) unterscheidet drei Hauptquellen endogener Energie: 1. Radioaktivität (wahrscheinlich unzureichend, 2. Hypodifferentiation im Innenmantel. Dieser Prozeß würde schon längst aufgehört haben als Hauptlieferant der endogenen Energie, wenn er nicht ständig wieder angeregt würde von einem dritten Prozeß, den HOLMES (1965 S. 1031) als wichtigsten Lieferant der endogenen Energie betrachtet, nämlich:

3. Die Befreiung von Energie durch Phasenübergänge an der Grenze zwischen Kern und Mantel, im Zusammenhang mit Druckabnahme im Weltall (DIRAC) (siehe auch v. BEMMELEN, 1965 a, S. 35—36; 1965 d S.43).

Die Störungen des rheostatischen Gleichgewichtes im Innenmantel werden geodynamische Prozesse verursachen; Gebiete wo Material hinaufquillt und steigt und dabei die Grenze mit dem Außenmantel aufwölbt, und andere Gebiete, wo diese Grenze eingewölbt wird (als volumetrische Kompensation im Prozeß des Platzaustausches im Innenmantelmaterial).

Die Amplitude der Verbiegungen der Grenzfläche zwischen Außen- und Innenmantel kann viele Dutzende Kilometer betragen. Sie ist jedoch weder gravimetrisch, noch seismisch gut zu fassen. Die oberflächennahen, geodynamischen Reaktionen sind dagegen viel deutlicher als geotektonische Erscheinungen wahrzunehmen.

An der Oberfläche kann eine solche Verbiegung der äußeren Stockwerke sicher nicht derart große Amplituden vertragen. Ein pilzartiges Verfließen wird stattfinden, wobei sich (zufolge der andradischen Viskosität) „Gleitbretter“ bilden, die durch Zonen größerer Durchbewegung und höherer seismischen Aktivität geschieden sind.

Oberhalb des Dachgebiets dieser Mega-Undation öffnen sich Neozeane des atlantischen Typus (VAN BEMMELEN, 1966 b), worin die Gesteine des Außenmantels an die Oberfläche kommen (S. Pauls Rock'). Die Druckentlastungen im Dachgebiet werden die Ausscheidungen eutektischer Magmen basaltischer Zusammensetzung verursachen. Diese basaltischen Magmen steigen wegen ihrer geringen Dichte auf, und bilden Großlinsen an der oberen Seite des Außenmantels, die sogenannten „ozeanischen Asthenolithe“, welche die ozeanischen Schwellen bilden mit Dehnungsgraben im Scheitel (TALWANI et al, 1965; BOTT, 1965).

Die sialische Kruste „fließt“ oder „gleitet“ vom Dachgebiet der Mega-Undation seitwärts ab. Das ist eine Art Dekollement im größten Stile, wobei das oberste Gleitbrett, die sialische Kruste als Ganzes, ihrer eigenen Energie der Lage zufolge, sich schneller vorwärts bewegt als das nächst-tiefere (HARRINGTON, 1963; v. BEMMELEN, 1965 b; OROWAN, 1965).

An der Vorderseite, wo die aufeinanderfolgenden Stockwerke der Kruste und des Außenmantels den vorliegenden Ozeanboden überfahren, tritt eine allgemeine Steigerung des Druckes auf. Das führt zu Übergängen von verschiedenen Mineralien in Phasen, die bei diesem höheren Druck stabil sind. Die entsprechenden Erhöhungen der spezifischen Dichte führen zu langsamen isostatischen Absenkungen, welche an der Oberfläche geosynklinale Flachseegebiete verursachen.

An der Rückseite treten dagegen Dehnungserscheinungen auf mit Grabenbildungen, wie entlang der Ostküste Nordamerikas (ENGELN, 1964; VAN BEMMELEN, 1964).

Die abgleitenden kratonischen Großschollen der Kruste werden am Backbord von linken (sinistralen) Seitenverschiebungen begrenzt, und am Steuerbord von rechten (dextralen) Scherbewegungen.

Die Konsequenzen dieses mechanischen Modelles führen deshalb zu Voraussagungen (Prognosen) über wahrnehmbare geotektonische Erscheinungen (diagnostische Tatsachen). Dieses hypothetische Modell kann deshalb wissenschaftlich nach der Prognose-Diagnose Methode geprüft werden (VAN BEMMELEN, 1959).

Diesen Test habe ich für verschiedene Fälle angelegt (die Entwicklung der Mega-Undation im Bereich des Atlantischen und Indischen Ozeans (VAN BEMMELEN, 1965 b, 1965 d). Die Prognosen dieses mechanischen Modells

werden sehr gut von dem geotektonischen Tatsachenbestand bestätigt. Das erhöht unser Vertrauen in der funktionellen Richtigkeit dieser geomechanischen Vorstellung.

Zum Schluß möchte ich noch ein Beispiel mehr detailliert besprechen, nämlich die geotektonischen Begleiterscheinungen der Entwicklung des thulischen Teils der atlantischen Mega-Undation (die a_{III} Phase).

Der Thulische Teil der atlantischen Megaundation.

Ein gutes Beispiel der Bildung eines Neuozeans durch eine megaundatorische Beulung des Geoids ist das thulische Meeresbecken zwischen Grönland und NW-Europa. Die ersten Anzeigen der nordatlantischen Spalte traten nach WESTOLL (1965) schon im Devon („Old Red“) auf.

Brackwasser-Fischfaunen verbreiteten sich zwischen Grönland und Norwegen südwärts. Am Ende des Paläozoikums war diese Meeresenge der Lieferant der permischen Salzablagerungen im NW-germanischen Becken.

Zwischen Grönland und Norwegen befand sich während des jüngeren Paläozoikums und des älteren Mesozoikums wahrscheinlich eine schmale Grabenzone, wie das Rote Meer der Gegenwart. An dieser Grabenzone entlang hatten große sinistrale Scherbewegungen stattgefunden, wie die Great Glen Fault in Schottland, die ihre Fortsetzung hatte in der Cabot Faultzone im NW-Teil des amerikanischen Schildes. Die Verbindung zwischen beiden Teilstücken des jungpaläozoischen Systems von großen Seitenverschiebungen wurde während der zweiten Phase der atlantischen Megaundation in jungmesozoischer Zeit gelöst durch dextralen Seitenverschiebungen am Steuerbord des westwärts treibenden nordamerikanischen Kontinents.

Danach war es lange Zeit ziemlich ruhig in diesem Gebiet zwischen Grönland und Norwegen, bis die Dehnung der Zerreißung am Ende des Mesozoikums auch hier wieder anfang, zufolge der schrittweisen Süd-Nord-Entwicklung der atlantischen Megaundation. Diese drang in dieses Gebiet während ihrer dritten Entwicklungsphase vor, welche von mir die thulische Phase genannt wird (VAN BEMMELEN, 1965 b, S. 441 u. f.).

Diese thulische Phase wird vom Erguß der thulischen Plateaubasalte begleitet. Nach RASMUSSEN und NOE-NYGAARD (1966) fingen diese Ergüsse in den Faeroer Inseln schon vor 150 ± 20 Millionen Jahren an, also im Mittel Jura. Der Scheitel der thulischen Megabeulung verläuft über den Reikjanis-Rücken, Island und Jan Mayen nach Spitzbergen. Diese ungefähr NE—SW verlaufende Scheitellinie schneidet mit scharfem Winkel die NNE—SSW verlaufende Westgrenze des kaledonischen Gebirgs-

systems. Während der nachfolgenden Erweiterung des thulischen Meeresbeckens blieb der südliche Teil dieser Westgrenze, die östlich von der Scheitellinie lag (die Moine-Überschiebung Schottlands) zurück. Währenddessen bewegte der nördliche, auf der Ostseite Grönlands gelegene Teil, sich weiter westwärts (WAGER and HAMILTON, 1964), so daß diese zwei Teile jetzt 1800 km voneinander entfernt sind. Das Nordende der schottischen Moine-Überschiebung ist jetzt nur durch einen submarinen Rücken und die Insel Island mit dem früher anschließenden Südende der Moine-Überschiebung Grönlands verbunden. Wenn diese Entfernung während des Kenozoikums im Laufe von etwa 60 bis 80 Millionen Jahren entstanden wäre, hätte sie eine mittlere Geschwindigkeit von maximal 3 Zentimetern pro Jahr. Wenn sie jedoch schon vor 150 Millionen Jahren angefangen hätte, dann wären es etwa 1½ Zentimeter im Jahr. Dieser Betrag stimmt gut überein mit dem Betrag der Ausdehnung der Plateaubasaltserie auf Island. Die kumulative Breite der Basaltgänge Islands wird von BODVARSSON und WALKER (1964) auf 400 km geschätzt, was eine mittlere Dehnungsgeschwindigkeit von etwa ½ cm pro Jahr bedeuten würde.

BERNAUER (1943) fand einen mittleren Betrag von 3½ cm Dehnung pro Kilometer Breite des Zentralgrabens (siehe auch VAN BEMMELEN und RUTTEN, 1955, S. 161).

WALKER (1965) schätzt, daß die klaffenden Spalten (Gjår) des Zentralgrabens in Island kumulativ etwa 30 m breit sind, was mit einer aktiven Dehnung in den letzten 5000 bis 10.000 Jahren von etwa ½ cm pro Jahr übereinkommt.

Diese Schätzungen der mittleren Dehnungsgeschwindigkeit in Island bestätigen also gut die Schätzung der etwas größeren mittleren Geschwindigkeit, womit die Ost- und Westseite des thulischen Beckens sich von einander entfernt haben.

Die Öffnung des thulischen Beckens wird am Backbord durch sinistrale Seitenverschiebungen und am Steuerbord durch dextrale Seitenverschiebungen begrenzt.

An der frontalen Westseite der thulischen Beulung bekam Kanada eine SW-gerichtete Verschiebungsrichtung, welche z. T. in einem zusammenhängenden Scherbruchsystem endete, nämlich in N-S dextralen Seitenverschiebungen im nördlichen Teil der Rocky Mountains (St. AMAND, 1957) und den O-W sinistralen Seitenverschiebungen der Lewis und Clark Lineamente (SMITH, 1965). Letztgenanntes System läßt sich vielleicht via die Grenville und St. Laurens Störungen verbinden mit den sinistralen Seitenverschiebungen am Backbord der thulischen Megaundation (VAN BEMMELEN, 1966 a, 1966 b).

NW Europa befand sich an der Ostseite der thulischen Beulung. Durch die Corioliskräfte herrschten hier, im Sog der atlantischen Megaundationen (die Phasen I, II und III) Zugkräfte mit Dehnungserscheinungen vor. Von West nach Ost kann man in Westeuropa nach CLOOS (1947) unterscheiden:

1. der Irische Horst
2. der Graben des Irischen Meeres
3. der West Englisch-Schottische Horst
4. der Graben (bzw. Senkungsgebiet) des Nordmeeres
5. die Reihe der Horste West Norwegen—Ardennen und Rheinisches Schiefergebirge—Zentral Massiv Frankreichs (mit N—S Teilgräben und Senken, wie Clermond Ferrand, Vichy, Trier)
6. die Mittelmeer—Mjösen-Grabenzone (Rhône — Rhein — Göttingen — Gifhorn — Ostholstein — Oslo)
7. der Böhmisches Horst

Dieses Horst- und Graben-System hat mehr oder weniger die „Rheinische Richtung“. Es fing an sich am Ende der Kreide und Anfang des Tertiärs zu bilden. Die Albtransgression in Ost-England und Nordwest-Deutschland könnte eine Senkungserscheinung des Grundgebirges sein, welche durch diese Dehnung verursacht wurde. Der präneokome N-S-Zerrungsgraben der Salzgitter Eisenerze unterstützen diese Annahme. Mit diesen Dehnungen sind auch vulkanische Erscheinungen verbunden, wie die Gangsysteme und zentralvulkanischen Komplexe in NW Schottland und NO Irland, der Vulkanismus in Zentralfrankreich und des Rheingrabensystems. STORETVEDT (1965) berichtet, daß die N-S Basaltgänge Süd-Norwegens, die früher mit dem jungpaläozoischen Vulkanismus in Verbindung gebracht wurden, auch ein tertiäres Alter haben. Im Skagerrak, südlich von Kristiansand befindet sich wahrscheinlich ein zentralvulkanischer Komplex eozänen Alters.

Weil die Dehnungsbeträge nicht überall gleich groß waren, wurden die Grundgebirgsschollen begrenzt von WNW — OSO bis NW — SO streichenden Störungen, welche neben vertikalen auch erhebliche horizontale Komponenten haben können. Diese herzynisch streichenden Störungen befinden sich größtenteils zwischen der großen sinistralen Seitenverschiebung am Backbord (Nordpyrenäen Störung) und der großen dextralen Seitenverschiebung am Steuerbord (Randabbruch des Russischen Tafels). Die Aller-Elbtalstörung hat z. B. einen dextralen Versatz von etwa 10 km (MÖBUS, 1966). Der Horizontalversatz zwischen dem Gifhorne Trog und dem Ostholsteiner Trog scheint wieder sinistral zu sein. Auch der Aufstieg

der merkwürdigen Salzwälle im tiefsten Teil des NW germanischen Beckens ist wahrscheinlich zuerst von rheinisch gerichteten Systemen von Dehnungsspalten angeregt worden. Die Hakenwürfe im Verlauf dieser Wälle sind aber die Folge von mehr oder weniger synchronen, herzynisch gerichteten Seitenverschiebungen.

Diese herzynisch gerichteten Störungen haben natürlich auch vertikale Komponenten, welche sich geologisch viel leichter feststellen lassen. Wenn diese vertikalen Komponenten relativ zu groß werden, findet eine Umbiegung und schließlich auch ein „Verfließen“ nach der abgesenkten Scholle statt. Dadurch entstehen Auf- bzw. Überschiebungen im Streichen der ursprünglichen Seitenverschiebung. Die Osning-Überschiebung (STILLE, 1924), könnte davon ein Beispiel sein.

Wenn man die STILLE'sche Karte von 1922 bezüglich der saxonischen Gebirgsbildung betrachtet, sieht man deutlich wie z. B. die rheinisch gerichtete Göttinger Spalte nordwärts breiter wird und dann von herzynisch gerichteten Störungen (die Leintal- und Elfas-Linien) abgeschnitten und beendet wird. Solche Störungen sind Beispiele einer neu erkannten Art von Brüchen, die TUZO WILSON (1965) „transform faults“ genannt hat. Für die deutsche Übersetzung könnte vielleicht die Nahme von „Umwandlungsbrüche“ vorgeschlagen werden, da mittels solcher Störungen der Charakter der geodynamischen Verformungsprozesse sich ändert. Die Vardarzone z. B. ist eine große dextrale NW — SO Seitenverschiebungszone, welche die Nordanatolische, dextrale O — W Seitenverschiebung abschneidet. Sie endet im Alpenkörper viele hundert Kilometer entfernt, wo die Seitenverschiebung in einer Kompressionsstruktur transformiert werden. Die Vardargrenze hat also den Charakter eines Umwandlungsbruches oder Umwandlungsbruchsystems.

Der kumulative Betrag herzynisch gerichteten Dehnungserscheinungen in NW-Europa ist wahrscheinlich klein im Vergleich zum Hauptphänomen, der Öffnung des Thulischen Meeresbeckens. Sie könnte schätzungsweise einige dutzend von Kilometern betragen.

Diese Betrachtungen führen eindeutig zum Ergebnis, daß das europäische Vorland der Alpen nicht süd- und südostwärts während der Orogenese unterschoben wurde. Im Gegenteil, dieses Vorland wurde west- oder nordwestwärts von der Zone der alpinen Gebirgsbildung weggezogen. Dasselbe hat CLOSS (1963, S. 646) auch auf geophysischen Gründen für die Alpen-Orogenese betont; nämlich aktive Nordvergenz der Alpen und passives Vorland. Die geomechanische Folge war, daß in den Sektor zwischen Backbord und Steuerbord ein Sporn Afrika weit

nordwestwärts dringen konnte, so daß die Schlinge Apennin — Alpen — Karpathen gebildet werden konnte.

Wie ich anderswo dargelegt habe (VAN BEMMELEN, 1966 a, 1966 b) sind die alpinen Deckenüberschiebungen von orogenen Störungszentren im Tethysbereich gebildet worden. Die kumulativen Überschiebungsbeträge der penninischen und ostalpinen Decken verursachten Verkürzungen im Grundgebirge von einigen hundert Kilometern. Diese Verkürzungen der Kruste im Alpengebäude übertreffen also die Dehnungen und die gleichgerichteten Verlagerungen des Vorlandes um ein Mehrfaches. (1966 a und c).

Durch eine solche relativistische Strukturanalyse ist es möglich, die sonst so kontroversiell erscheinenden geomechanischen Prozesse des Alpensystems und des westeuropäischen Vorlandes mechanisch logisch zu deuten.

Die Dehnung des Europäischen Vorlandes im Sog der Thulischen Mega-Undation fand hauptsächlich um die Wende Mesozoikum-Tertiär statt, also fast gleichzeitig mit der Flyschphase der alpinen Orogenese, wobei die alpinen Großdeckensysteme (Ostalpine und Penninische Decken) gebildet wurden. Diese Decken überholten gleichsam das Vorland. Nachher, während der Molassephase, fand die Heraushebung des Alpenstranges statt, wobei an der Nordseite des Gebirges noch weitere gravitativ bedingte nordverengte Überschiebungen stattfanden. Nach dem Mitteleozän schob sich die Flyschzone über das Helvetikum und außerdem wurden beide Zonen nach dem Aquitan viele Kilometer über die Molasse geschoben.

Man findet also in den Alpen eine Interferenz von geodynamischen Erscheinungen, welche die Folge sind von gravitativ bedingten Spannungsfeldern verschiedener Größenordnung und verschiedener zeitlicher Einstufung, die sowohl im Vorland wie im Rückland existierten. Die kausativen primärtektonischen Massenverlagerungen traten in verschiedenen Gebieten der unterschiedlichen Stockwerke auf. Der Autor dieses Aufsatzes wird beim Kolloquium über Stockwerktektonik zu Ehren EUGÈNE WEGMANN'S in Neuenburg (18. bis 20. April 1966) darlegen, daß diese Interferenz der tektogenetischen Prozesse des Konzeptes der Stockwerktektonik *sensu lato* erklärt werden kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die diagnostischen Tatsachen der Geotektonik in Nordamerika, Grönland, Thulischem Meeresbecken und NW-Europa die Erwartungen (Prognosen) des geomechanischen Modells der Megaundationen bestätigen. Deshalb wird es sich loh-

nen, diese mechanische Deutung der Kontinentverschiebungen als Folge megaundatorischer Beulungen der Geoide weiter zu prüfen und zu untersuchen.

Literatur:

- Bemmelen, R. W. van (1959): Die Methode in der Geologie. Mitt. Geol. Ges. Wien, 53, 35—52.
- (1964): Appendix to the contribution by G. B. Engelen on the origin of the Bermuda Rise. Tectonophysics, 1, 1, 95—100.
- (1965 a): Phénomènes géodynamiques à l'échelle du globe (géonomie), à l'échelle de l'écorce (géotectonique) et à l'échelle de l'orogénèse (tectonique). Mém. Soc. Belge Géol. Paléont. Hydrol., 8, 126 S.
- (1965 b): The evolution of the Atlantic Mega-Undation. Tectonophysics, 1, 5, 385—430.
- (1965 c): Der gegenwärtige Stand der Undationstheorie. Mitt. Geol. Ges. Wien, 57, 2, 379—399.
- (1965 d): The evolution of the Indian Mega-Undation. Tectonophysics, 2, 1, 29—57.
- (1966 a): On Mega-Undations, A new model for the earth's evolution. Tectonophysics, 3, 2, 83—127.
- (1966 b): The evolution of Mega-Undations (a mechanical model for large-scale geodynamic phenomena). Upper Mantle Symposium, Ottawa, September 1965, in Druck.
- (1966 c): Stockwerktektonik *senso lato*. Symposium zu Ehren von E. Wegmann, Neuchâtel 1966, im Druck.
- (1966 d): Le mécanisme de la dérive continentale. Scientia, 101, 3/4, 140—149.
- Bemmelen, R. W. van und Rutten, M. G. (1955): Table-mountains of northern Iceland. Brill, Leyden, 217 S.
- Bernal, J. D. (1961): Continental and oceanic differentiation. Nature, 192, 4798, 123—125.
- Bernauer, F. (1943): Junge Tektonik auf Island und ihre Ursachen. In: O. Niemczyk (Red.), Spalten auf Island, Konrad Wittwer, Stuttgart, 14—64.
- Bodvarsson, G. and Walker, G. P. L. (1964): Crustal drift in Iceland. Geophys. J., 8, 285—300.
- Bott, M. H. P. (1965): The upper mantle beneath Iceland. Geophys. J., 9, 275—277.
- Cloos, H. (1947): Grundschollen und Erdnähte, Geol. Rundschau, 35, 133—154.
- Cloos, H. (1963): Der tiefere Untergrund der Alpen nach neuen seismischen Messungen. Geol. Rundschau, 53, 2, 630—649.
- Engelen, G. B. (1964): A Hypothesis on the origin of the Bermuda Rise. Tectonophysics, 1, 1, 85—93.
- Haarmann, E. (1930): Die Oszillationstheorie. F. Enke, Stuttgart, 260 S.
- Harrington, H. J. (1963): Deep focus earthquakes in South America and their possible relation to continental drift. In: A. C. Munyan (Ed.), Polar Wandering and Continental Drift. Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, Spec. Publ., 10, 55—73.
- Holmes, A. (1965): Principles of physical geology, 2nd ed., Nelson, London, 1288 S.
- Kaula, W. M. (1963): Determination of the earth's gravitational field. Rev. Geophys., 1, 507—551.
- Knopoff, L. (1964): The convection current hypothesis. Rev. Geophys., 2, 1, 89—122.
- Möbus, G. (1966): Die variscische Tektogenese in der Elbtalzone. Geologie, 15, 1, 6—18.
- Orowan, E. (1965): Convection in a non-Newtonian mantle, continental drift, and mountain building. In: P. M. S. Blackett, E. Bullard and S. Runcorn

- (Ed.), A symposium on continental drift, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **258 A**, 284—313.
- Rasmussen, J. and Noe-Nygaard, A. (1966): New data on the geological age of the Faeroes. *Nature*, **209**, 5029, 1229—1230.
- Schmidt, W. (1932): *Tektonik und Verformungslehre*. Borntraeger, Berlin, 206 S.
- Smith, J. G. (1965): Fundamental transcurrent faulting in Northern Rocky Mountains. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, **49**, 9, 1398—1409.
- St. Amand, P. (1957): Geological and geophysical synthesis of the tectonics of portions of British Columbia, the Yukon Territory and Alaska. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **68**, 1343—1370.
- Stille, H. (1924): Die Osning-Überschiebung. *Abh. Pr. geol. L.-Anstalt, N. F.*, **95**, 32—56.
- Storetvedt, K. (1965): Paleomagnetic dating of some younger dikes in southern Norway. *Nature*, **205**, 4971, 585—586.
- Talwani, M., Lepichon, X. and Ewing, M. (1965): Computed model of the Mid-Oceanic Ridges from gravity and seismic refraction data. *J. Geophys. Res.*, **70**, 2, 341—352.
- Trusheim, F. (1960): Mechanism of salt migration in northern Germany. *Bull. Am. Ass. Petr. Geol.*, **44**, 9, 1519—1540.
- Verhoogen, J. (1965): Phase changes and convection in the earth's mantle. In: P. M. S. Blackett, E. Bullard and S. K. Runcorn (Ed.), A symposium on continental drift, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **258 A**, 276—283.
- Wager, L. R. and Hamilton, E. I. (1964): Some radiometric rock ages and the problem of the southward continuation of the East Greenland orogeny. *Nature*, **204**, 4963, 1079—1080.
- Walker, G. P. L. (1965): Evidence of crustal drift from Icelandic Geology. In: P. M. S. Blackett, E. Bullard and S. K. Runcorn (Ed.), A symposium on continental drift, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **258 A**, 199—204.
- Weertman, J. (1962): Mechanism for continental drift. *J. of Geoph. Res.* **67**, 3, March 1962, 1133—1139.
- Westoll, T. S. (1965): Geological evidence bearing upon continental drift. In: P. M. S. Blackett, E. Bullard and S. K. Runcorn (Ed.), A Symposium on continental drift, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **258 A**, 12—26.
- Wilson, J. Tuzo (1965): A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, **207**, 4995, 343—347.