

BEWEGUNGSMECHANISMUS DER ERDKRUSTE.

VON

W. JARDETZKY.

(MIT 18 TEXTFIGUREN)

Die Bewegung der Erde, wenn man sie als einen Körper des Sonnensystems betrachtet, ist schon längst mit großer Genauigkeit untersucht worden. Die Gesetzmäßigkeiten dieser Bewegung sind relativ einfach und lassen sich mit strengen mathematischen Methoden behandeln. Auch die Figur der Erde, falls man den im Vergleich zu ihren Dimensionen kleinen Unregelmäßigkeiten der Oberfläche keine Rechnung trägt, konnte mit immer wachsender Annäherung bestimmt werden. Es sind diese vom Standpunkt eines Astronomen kleinen Unregelmäßigkeiten das Ergebnis der, im Auge eines Geologen, gewaltigen Prozesse, die einst in der Erdkruste stattgefunden haben. Es stellt aber die Entdeckung des Bewegungsmechanismus der Erdkruste, der zu ihrem gegenwärtigen Aufbau geführt hat, eine schwere Aufgabe dar, denn es sollen nicht nur die Bewegung der ganzen Erdkruste, sondern auch die Verrückungen einzelner Krustenteile aus dem jetzt erstarrten Gebilde abgelesen werden. Die erste Schwierigkeit der Analyse der Hauptveränderungen in der Erdkruste liegt darin, daß die Zeitintervalle, in denen sie abgelaufen sind, sich jeder direkten Beobachtung entziehen. Auch sind die festgestellten Gesetzmäßigkeiten zum großen Teil in einer nicht für die mathematische Behandlung geeigneten Form angegeben, und es bestehen in der Geologie selbst über dieselben Tatsachen grundlegende Meinungsverschiedenheiten. Endlich können die Bewegungen in der Erdkruste entweder mit thermischen, radioaktiven oder anderen Erscheinungen im Erdkörper im Zusammenhang stehen, so daß ein ausschließlich auf mechanischer Basis beruhendes Schema unzureichend wird, oder auch durch kosmische Ursachen hervorgerufen werden. Es läßt sich dabei nicht immer, zumindest für die Vergangenheit, ein solcher Einfluß mit Sicherheit abschätzen. In dieser Unbestimmtheit liegt die Ursache für das Vorhandensein mehrerer Theorien über die Änderungen des Erdantlitzes, in welchen größtenteils nur auf bestimmte Gruppen von Erscheinungen, z. B. nur auf die Gebirgsbildung, Rücksicht genommen wird.

Wenn man aber für die allgemeine Entwicklung der Erdkruste ein mechanisches Modell schaffen will, so muß man in erster Linie den folgenden Tatsachen Rechnung tragen. Im ersten Stadium ihres Daseins war die Erde wahrscheinlich anfangs im vollkommen gasförmigen, dann aber im flüssigen Zustand. Streng genommen konnte dies kein Gleichgewichtszustand sein. Die Theorie der Gleichgewichtsfiguren einer flüssigen Masse gibt uns aber die Möglichkeit, die in erster Annäherung kugelförmige Gestalt der Erde zu erklären. Als zweite Annäherung gilt bekanntlich ein Rotationsellipsoid, aus der Reihe der sogenannten MacLaurinschen Ellipsoide. Die Frage, ob sich ein dreiaxiges Ellipsoid, eine von den anderen Gleichgewichtsfiguren einer rotierenden homogenen flüssigen Masse, der sogenannten

§ 1. Die Hypothese der zonalen Erddrehung.

Es wurde in den klassischen Untersuchungen über die Gestalt der Planeten angenommen, daß diese sich auch vor ihrer Erstarrung gleich festen Körpern gedreht haben. Auf einigen Planeten konnte sich dann infolge der Abkühlung eine gleichmäßig dicke Kruste bilden, die weiter in das Planetinnere wuchs. Ein solcher Vorgang konnte den Gleichgewichtszustand nicht stören. Diese Voraussetzung über die Bewegungsart eines flüssigen oder gasförmigen Planeten können wir nur als Idealfall, der in Wirklichkeit kaum auftreten kann, betrachten, denn keiner der Planeten war eine im Raume isolierte Masse. Bei den komplizierten Verhältnissen im Sonnensystem ist das Gleichgewicht nirgends zustande gekommen. Außer des wechselnden Gravitationsfeldes haben in Wirklichkeit noch die termischen und anderen Vorgänge ihre störende Wirkung ausgeübt. Vom astronomischen Standpunkt hat das auf die Erdfigur keinen großen Einfluß gehabt, obwohl sich in gewissen Punkten auch die Theorie der Gleichgewichtsfiguren einer heterogenen Flüssigkeit mit den Beobachtungen nicht in Einklang bringen läßt, auch dann nicht, wenn man eine ellipsoide Schichtung der Erde postuliert. Geht man von den unregelmäßigen Bewegungen in einem neu gebildeten Planeten aus, so dürfte die Ausgleichung dieser Bewegungen eine sehr lange Zeit gedauert haben, da nach Helmholtz und Poincaré die Wirkung der Zähigkeit sich nur sehr langsam bemerkbar macht.

Wenn man nicht imstande ist, gewisse Erscheinungen auf einem Planeten mit der Theorie der Gleichgewichtsfiguren zu erklären, kann man noch immer versuchen, die Theorie durch die Annahme irgendwelcher anderer regelmäßiger innerer Bewegungen zu erweitern. Im Falle der Erde haben wir die sogenannten zonalen Bewegungen gewählt, deren Vorhandensein bei einigen Himmelskörpern uns die unmittelbare Erfahrung zeigt. Um ganz allgemein zu sprechen, wollen wir voraussetzen, daß ein gasförmiger oder flüssiger Planet sich im Zustande einer zonalen Rotation jener Art befindet, welche gegenwärtig an der Sonne, am Jupiter und Saturn beobachtet wird. Weiter werden wir annehmen, daß dieser Zustand bis zur Erstarrung herrscht, und die Folgen ins Auge fassen, die auftreten werden, wenn auf dem Planeten ein schwimmender Körper, d. h. ein Kontinent entsteht.

Die Sonne rotiert nicht wie ein starrer Körper. Auf Grund der langjährigen Beobachtungen der Bewegungen der Sonnenflecken wurde festgestellt, daß ihre Winkelgeschwindigkeit (w) von den Polen gegen den Äquator zunimmt. Ihre Verteilung in einem Meridian läßt sich durch das Gesetz von Faye

$$w = a + b \sin^2 \vartheta \quad (1)$$

darstellen. Dabei bedeutet ϑ die heliozentrische Breite und a und b zwei Konstanten, die nach K. Sotome [30] folgende Werte haben:

$$a = 14^\circ, 44, \quad b = -2^\circ, 31.$$

Daß die Winkelgeschwindigkeit gegen den Pol abnimmt, wurde auch an allen anderen Objekten der Sonnenoberfläche festgestellt. Die Beobachtungen der Sonnenflecken gehen bis zu den heliozentrischen Breiten $\pm 35^\circ$, die der anderen Objekte bis zu höheren Breiten; die Abnahme von w nach den Polen zu wurde auch durch die spektroskopischen Messungen der Geschwindigkeit fast bis zu den Polen bestätigt.

Schematisch können wir uns die Sonnenfläche in Zonen (a, b, c, \dots) eingeteilt denken und für jede Zone eine mittlere Geschwindigkeit annehmen (Fig. 1). Die Periode der äquatorialen Zone beträgt 25 Tage. Diese Zone dreht sich um einige Tage (8–9) schneller als die Polarkappen. Bezeichnet man mit s den Abstand eines Punktes (M) von der Achse und mit R

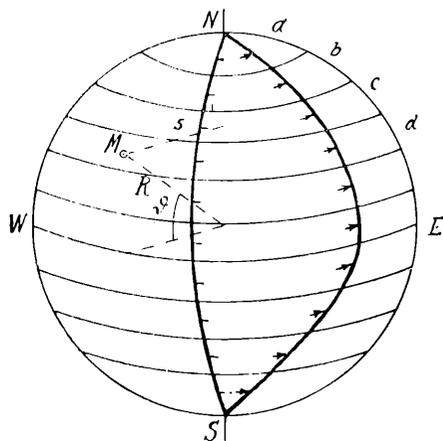


Fig. 1

den Sonnenradius, so wird $\cos \vartheta = \frac{s}{R}$ sein und

$$w = w_0 + \lambda s^2 \quad (2)$$

wobei $w_0 = a + b$ und $\lambda = \frac{-b}{R^2}$ ist.

Für den Fall der zonalen Rotation des Jupiters und des Saturns besitzt man noch kein bestimmtes Gesetz.

Über die Verteilung der Winkelgeschwindigkeiten im Innern der Sonne wissen wir nichts, so daß man verschiedene Annahmen darüber machen kann. Ein Funktionalzusammenhang zwischen der Drehgeschwindigkeit eines Teilchens und seinem Abstand von der Drehachse des Himmelskörpers kann den Bewegungsgleichungen einer idealen Flüssigkeit bei Vorhandensein eines Gravitationspotentials gemäß in der Form

$$w = w(s^2) \quad (3)$$

geschrieben werden. Diese Gleichung bezeichnen wir als Rotationsgesetz. Diesem Gesetz zufolge haben Teilchen einer Zylinderfläche im stationären Zustand die gleiche Winkelgeschwindigkeit. Als eine Anfangsbedingung kann man das Rotationsgesetz in einer beliebigen Form annehmen, z. B. daß eine flüssige Masse mit einer mit dem Abstand von der Achse zunehmenden Winkelgeschwindigkeit oder im Gegenteil mit einer abnehmenden rotiert. Man kann sich aber auch kompliziertere Verteilungen denken. Wilsing [40] hat z. B. angenommen, daß sich der Sonnenkern mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit umdreht, dagegen in der umhüllenden Schicht $w = w(s, z)$ sein soll, wobei z den Abstand von der Äquatorebene bedeutet. In diesem Fall würden die Punkte einer Fläche $w(s, z) = \text{const.}$ die gleichen Winkelgeschwindigkeiten aufweisen und Kreise um die Achse beschreiben. Die Untersuchungen von Wilsing beziehen sich aber auf den Fall einer zähen Flüssigkeit, welche streng genommen in keinem anderen stationären Bewegungszustand begriffen werden kann als in einer gleichförmigen Rotation um eine Hauptträgheitsachse. Infolge der Reibung zwischen den Schichten muß sich das Geschwindigkeitsfeld ändern, damit auch die Verteilung der Winkelgeschwindigkeiten, die dann zu Zeitfunktionen werden. Von dieser Verteilung hängt aber die Figur eines flüssigen oder gasförmigen Körpers ab. Wenn sich die dadurch entstehenden Deformationen nur sehr langsam vollziehen werden, können wir uns auf quasi stationäre Bewegungen beschränken, die durch ein Rotationsgesetz von der Form $w = w(s, z)$ bestimmt sind. Zwischen diesen Gesetzen läßt sich auch folgendes denken: in einer rotierenden flüssigen Masse kann man eine Schar von geschlossenen Flächen ziehen, z. B. Flächen, die sich wenig von konzentrischen Kugeln unterscheiden, so daß jede Fläche schneller rotiert als die sie umhüllende, und die Teilchen einer Fläche von den Polen zum Äquator zunehmende Winkelgeschwindigkeiten besitzen. Infolgedessen würden die Winkelgeschwindigkeiten mit zunehmendem Abstand vom Massenmittelpunkt längs des Radius abnehmen, in der Oberflächenschicht aber könnte ein dem FAYESCHEN ähnliches Rotationsgesetz herrschen. Die durch neuere Beobachtungen bei der Sonne mit Sicherheit festgestellte Zunahme der Winkelgeschwindigkeit mit der Erhebung über die Photosphäre spricht aber zugunsten eines Gesetzes von der entgegengesetzten Art, was die Verteilung der Winkelgeschwindigkeiten im Sonneninneren betrifft. Die theoretischen Überlegungen haben in dieser Frage noch kein endgültiges Ergebnis gebracht (vgl. R. EMDEN [4]). Stationären zonalen Bewegungen sind zahlreiche Untersuchungen gewidmet, die in dem Werke des Verfassers [11] angeführt sind (vgl. auch J. WASIUTYŃSKI [37]).

Die zonale Drehung der Sonne ist kein stationärer Zustand, auch dann nicht, wenn man eine Reihe von bekannten Erscheinungen außer acht läßt. Falls man mit Wilsing und WILCZYŃSKI die zonalen Bewegungen als Ursache der Sonnenflecken betrachtet, so bleibt noch die Periodizität der Fleckenbildung ungeklärt. Nach Wilsing fällt die Rotationsachse der Sonne nicht mit der Hauptträgheitsachse infolge asymmetrischer Massenverlage-

rungen zusammen und dadurch kann diese Periodizität hervorgerufen werden. Es wurde außerdem auf Grund einer Reihe von Beobachtungen festgestellt, daß der polare Halbmesser größer als der äquatoriale ist, wenngleich bei der sich stationär umdrehenden Sonne der umgekehrte Fall zu erwarten wäre. Aus dem Gesagten folgt, daß wir eine zonale Drehung der Sonne nach dem FAYESCHEN Gesetz als zweite Annäherung betrachten können, nachdem wir als erste die Umdrehung um eine von den Hauptträgheitsachsen mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit angenommen haben.

Die Bedeutung dieser Voraussetzung kann noch verallgemeinert werden. Es wurde schon einige Male der Gedanke ausgesprochen (WILSING, FESSENKOFF, SECCHI), daß der beobachtete Zustand der Sonne kein Ausnahmefall ist, sondern eine bestimmte Phase in der Entwicklung mehrerer Himmelskörper darstellt. Dafür spricht auch der erwähnte zonale Charakter der Rotation des Jupiters und des Saturns.

§ 2. Die Figuren einer zonalrotierenden Flüssigkeit.

Für den Fall einer zonalen Verteilung der Winkelgeschwindigkeiten in einer im Raume isolierten flüssigen Masse, deren Teilchen sich nach dem NEWTONSCHEN Gravitationsgesetz anziehen, kann man zunächst wie im Falle des relativen Gleichgewichtes die Existenz und Art der Figuren der in Betracht gezogenen Masse feststellen. Die Möglichkeit eines stationären Zustandes von der Art, welche durch das Gesetz (3) bestimmt ist, wird im allgemeinen der Bedingung, daß die ganze Masse einer idealen Flüssigkeit um eine von ihren Hauptträgheitsachsen rotiert, unterworfen. Diese notwendige Bedingung ist bekanntlich noch nicht hinreichend, weil die Oberfläche der Flüssigkeit eine von den Niveauflächen sein muß.

Bei der Lösung dieser Aufgabe kann man zwei Fälle unterscheiden, je nachdem die ins Auge gefaßte flüssige Masse homogen oder heterogen ist. Im letzten Fall muß noch das Dichteverteilungsgesetz berücksichtigt werden. Variiert man das Rotationsgesetz (3), so entstehen verschiedene Figuren der zonalrotierenden Masse, die sich mehr oder weniger von den Gleichgewichtsfiguren unterscheiden werden. Mit Rücksicht auf die bekannten Planetenfiguren oder die Sterne ist es zweckmäßig, sich auf den Fall der wenig von den Gleichgewichtsfiguren abweichenden Körper zu beschränken, in denen sich also die Winkelgeschwindigkeit w nur wenig ändert. Auf diese Weise gelangt man zu einer Problemstellung, die sich mit denselben strengen mathematischen Methoden behandeln läßt wie in der Theorie der Gleichgewichtsfiguren.

Man kann also z. B. nach der Methode von LIAPOUNOFF mit beliebiger Annäherung die Figur einer zonalrotierenden flüssigen Masse bestimmen. Es ergeben sich dann Figuren, welche sich wenig von den MACLAURINSCHEN Ellipsoiden unterscheiden, wenn wir im Gesetz (2) λ als eine kleine Größe betrachten. Die Gleichung des Meridians einer solchen Fläche in erster Annäherung lautet

$$x^2 + Az^2 + Bz^4 = C \quad (4)$$

wobei die Konstanten A , B und C durch die Dimensionen und Dichte der flüssigen Masse und durch das Rotationsgesetz bestimmt sind. Diese Figuren können an den Polen mehr abgeplattet sein und einen größeren Äquatorwulst haben als das Rotationsellipsoid oder umgekehrt längs des Äquators zusammengedrückt sein und aus dem Ellipsoid herausragende Polarkappen besitzen.

Nachdem die Existenz der Figuren einer zonalrotierenden flüssigen Masse auf der gleichen Basis wie der der Gleichgewichtsfiguren bewiesen ist, können wir weitere Folgen der Hypothese der zonalen Rotation eines Planeten untersuchen. Da diese Hypothese nur zur Erklärung von Vorgängen herangezogen wird, die in der Oberflächenschicht verlaufen, spielt das Rotationsgesetz der inneren Schichten eine sekundäre Rolle. Der Charakter der Rotation der Sonne, Jupiters und Saturns soll uns auf den einzuschlagenden Weg hinweisen und wir wollen annehmen, daß auch im Falle der Erde in ihrem früheren Entwicklungsstadium ein Zurückbleiben der Zonen mit zunehmender Breite stattgefunden hat.

(3) oder nach einem verwandten verteilt sind. Stellen wir uns nun einen flüssigen Planeten mit einem schwimmenden Kontinent vor, so läßt sich theoretisch beweisen, daß dieses materielle System nur in ganz speziellen Fällen eine Gleichgewichtsfigur sein kann und daß diese sogar nur dann eintreten kann, wenn sich der flüssige Teil wie ein starrer Körper dreht. Als Beispiel für einen solchen Ausnahmefall können wir uns einen ringförmigen Kontinent längs des Äquators denken. In allen der Wirklichkeit näheren Fällen ist das Gleichgewicht ausgeschlossen. Die Existenz eines Kontinentalblockes führt zu einer instabilen Konfiguration [11], was z. B. für die Theorie der Polwanderung von Bedeutung sein kann.

Der auf einem Planeten schwimmende Kontinent wird in den mehr oder weniger regelmäßigen zonalen Strömungen gewisse Störungen hervorrufen und dabei sich ständig verschieben. Dieser Bewegung werden auch die Deformationen des ganzen Systems folgen. Eine strenge mathematische Behandlung dieses Problems stößt in seiner allgemeinen Formulierung auf unüberwindliche Schwierigkeiten, besonders wenn man noch die Zähigkeit oder Plastizität der Stoffe berücksichtigen wollte. Gerade diese Eigenschaften der Stoffe spielen aber eine große Rolle in den weiteren Überlegungen. Infolgedessen wollen wir die Problemstellung zunächst vereinfachen und das weitere Schicksal eines Urkontinents mit Hilfe eines Schemas untersuchen, in dem vorläufig gewisse Erscheinungen nicht berücksichtigt werden.

§ 4. Ein flüssiger Planet mit einem schwimmenden Kontinent.

Wir nehmen jetzt an:

1. Daß in einem flüssigen Planeten, zumindest in seiner äußeren Schicht, ein zonaler Bewegungszustand herrscht. Die Geschwindigkeitsverteilung sei dabei durch Gesetz (2) oder durch ein ähnliches bestimmt, also durch ein Gesetz, dem zufolge die Winkelgeschwindigkeit vom Äquator gegen die Pole abnimmt. Die Figur des Planeten sei ein Sphäroid. Dies ist immer der Fall, wenn nur seine Winkelgeschwindigkeit genügend klein ist.

2. Daß sich auf dem Planeten ein Urkontinent ($A A_1 B_1 B$, Fig. 2) beiderseits des Äquators erstreckt und daß diese sphärische Platte eine im Vergleich zum Planetenradius geringe Dicke besitzt. Die Dichte des festen Kontinentalblocks soll sich nur wenig von derjenigen der äußeren flüssigen Schicht unterscheiden.

3. Die Bewegung des Kontinentalblocks vollzieht sich unter der Wirkung folgender Kräfte: der Anziehungskraft der übrigen Planetenmasse (und der anderen Körper des Sonnensystems, was wir jetzt aber nicht zu berücksichtigen brauchen), der Zentrifugalkräfte, des Druckes der flüssigen Unterlage auf die Bodenfläche und den Mantel des Kontinentalblocks, schließlich der Reibung längs dieser Flächen.

Es sei (Fig. 2) NS die Rotationsachse der flüssigen Masse, WE der Äquator. Hätte die Flüssigkeit wie eine ideale nach dem Gesetz (3) rotieren können, so wären cc_1d_1d und aa_1b_1b zwei zylindrische Schichten und der konstante Wert der Winkelgeschwindigkeit der ersten wäre größer als derjenige der zweiten. Bei den reellen Flüssigkeiten werden solche Schichten im Inneren des Planeten eine kompliziertere Form haben, was aber für unsere Aufgabe keine wesentliche Rolle spielt, denn bei der Wirkung auf einen Kontinentalblock kommt nur die Schichtung in der Nähe der Oberfläche in Frage. Es seien weiter A', A_1, B', \dots die Punkte der Bodenfläche des Kontinents, in welchen die Planetenradien OA, OA_1, OB, \dots diese durchstoßen.

Wir nehmen weiter an, daß man die kleinen Formänderungen und die durch die Anwesenheit des Blockes hervorgerufenen Störungen in den zonalen Strömungen in erster An-

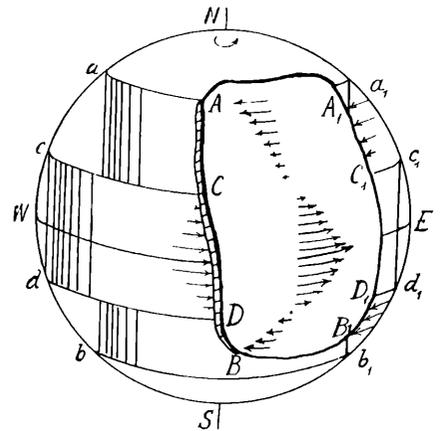


Fig. 2

näherung vernachlässigen kann. Der Urkontinent schwimmt also auf Zonen, die sich mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten umdrehen. Hat er sich nach einer Reihe von Umdrehungen des Planeten und Verschiebungen auf der Oberfläche in eine Lage versetzt, die in der Fig. 2 angenommen ist, so können wir drei Hauptzonen der äußeren flüssigen Schicht unterscheiden, und zwar die äquatoriale ($C'C_1D'D_1$), in der die Winkelgeschwindigkeit der Unterlage größere Werte als diejenige des Blockes besitzt, und zwei laterale ($A'A_1C_1C'$ und $D'D_1B_1B'$), in welchen sich die Flüssigkeit gegen Osten langsamer als der Block bewegt. Die Verteilung der relativen Geschwindigkeiten der flüssigen Teilchen in bezug auf diesen festen Körper ist in der Fig. 2 durch die Pfeile gekennzeichnet. In gewissen Spezialfällen, die uns an dieser Stelle nicht interessieren werden, könnte eine von den lateralen Zonen oder auch ein Teil der äquatorialen fehlen. Dies wäre der Fall, wenn sich z. B. der ganze Block irgendwo in der Nordhemisphäre befinden würde. In dem ins Auge gefaßten Falle wird also in der äquatorialen Zone die Flüssigkeit an der Westgrenze $C'D'$ unter den Block einströmen und zwischen den Breiten CC_1 und DD_1 am Ostrand ausströmen. Die relative Geschwindigkeit ist nach Ost gerichtet und nimmt gegen den Äquator zu. In den anderen zwei Zonen haben wir das umgekehrte Bild, weil sich der Block bei seiner Drehung um die Achse NS schneller als die dort unter ihm fließende Unterlage in der Ostrichtung bewegt. In diesen zurückbleibenden Zonen wird die Flüssigkeit an den östlichen Randteilen A_1C_1 und D_1B_1 unter den Block einströmen und an den westlichen AC , bzw. DB ausströmen. Die flüssige Unterlage in der äquatorialen Zone wird dann den Kontinent antreiben, dagegen die beiden anderen die Verschiebung verzögern, so daß sich in einem gewissen Zeitintervall zwischen beiden Wirkungen annähernd ein Gleichgewicht herstellen kann. Dieses wird wahrscheinlich nie in vollkommenem Maße erreicht und außer der Drehung des Kontinents um die Achse NS wird noch eine Drehung um eine andere Achse stattfinden. Auf diese Frage kommen wir später zurück und jetzt werden wir annehmen, daß sich die zweite Drehung vernachlässigen läßt.

Nun wollen wir die aus der obigen Verteilung der relativen Geschwindigkeiten folgenden Kräfte untersuchen. Der Bodendruck auf der gesamten Fläche $A'A_1B_1B'$ wird annähernd die Resultierende der auf den Kontinent wirkenden Anziehungs- und Zentrifugalkräfte aufheben (vgl. weiter A. Prey [26]). Es kommt also zunächst der hydrodynamische Druck p auf der Mantelfläche des Kontinents in Betracht. Dieser kann auf den Randteilen, wo die Flüssigkeit unter den Kontinent einströmt, eine größere Rolle spielen. Diese Randteile sind: $CC'DD'$ auf der westlichen Seite des Mantels, wo der Druck durch eine Resultierende

$p_2 = - \int_{C'C'DD'} p \, d\mathbf{f}$ in der Ostrichtung dargestellt werden kann, falls man mit $d\mathbf{f}$ ein in der Richtung

der äußeren Flächennormale gerichtetes Flächenelement bezeichnet, und $A_1A_1C_1C_1$ und $D_1D_1B_1B_1$ auf der östlichen Seite des Mantels. Die zwei entsprechenden Resultierenden

in der Westrichtung sind dabei: $p_1 = - \int_{A_1A_1C_1C_1} p \, d\mathbf{f}$ und $p_3 = - \int_{D_1D_1B_1B_1} p \, d\mathbf{f}$. An allen Stellen der

Mantelfläche, an denen eine Einströmung oder Ausströmung stattfindet, wirken außerdem Tangentialkräfte infolge der Reibung. Die Größenordnung aller dieser Kräfte werden wir später untersuchen.

Ihre Verteilung ist aber einer einfachen Gesetzmäßigkeit unterworfen. Gehen wir vom nördlichen Rand (AA_1) aus, an dem die sich in bezug auf den Kontinent verschiebende Flüssigkeit die größte relative Geschwindigkeit gegen Westen hat, so erreicht auch die Reibung längs AA_1 ihren größten Wert. Abnehmend in der südlichen Richtung wird sie an einem Breitenkreis CC_1 gleich Null, ändert weiter ihren Richtungssinn und wirkt längs des Äquators am stärksten in der Ostrichtung. Weiter nach Süden finden wir das ähnliche Bild. Die Resultierenden der Reibungskräfte in drei Teilen der Bodenfläche sind:

$$\mathcal{R}_1 = \int_{A' A'_1 C' C'_1} k df \quad \mathcal{R}_2 = \int_{C' C'_1 D' D'_1} k df, \quad \mathcal{R}_3 = \int_{D' D'_1 B' B'_1} k df$$

falls man mit k auf eine Flächeneinheit bezogene Reibungskraft bezeichnet. Die erste und dritte wirken in der Westrichtung, die zweite in der Ostrichtung. Nun wird, wie wir es angenommen haben, durch die Wirkung aller dieser Kräfte der Kontinent nach gewissen Verschiebungen in drei Strömungen sozusagen eingeklemmt.

Solange man voraussetzt, daß der Kontinent in unserem Schema ein idealer starrer Körper ist, kommt nur seine Bewegung auf dem flüssigen Planeten in Betracht. Will man aber auch Änderungen des Kontinents feststellen, muß man ihn als deformierbaren Körper betrachten. Diesen Fall kann man in folgender Weise behandeln. Auf eine sphärische Scheibe von angegebener Form wirken auf die Bodenfläche und den eingetauchten Teil der Mantelfläche die Druck- und Reibungskräfte nach den oben angeführten Gesetzen. Es soll das Spannungsfeld in der ganzen Scheibe bestimmt werden. Da auch dieses Problem schwer zu lösen ist, habe ich versucht, eine Vorstellung davon zu gewinnen, wie die Scheibe, d. h. der Urkontinent, zerrissen werden kann [11], S. 120. M. Lagally [19] hat eine Erklärung der bekannten Erscheinung, der Gletscherspalten, gefunden, indem er das Eis als eine mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegte zähe Flüssigkeit betrachtet und angenommen hat, daß die Rißrichtung dabei zur Richtung der Zugkraft senkrecht verläuft.

Um dem Fall des Zerfalls eines Urkontinents näher zu kommen, gehen wir von der folgenden Annahme aus: in der äußeren festen Schicht des Kontinents sollen infolge der zonalen Bewegungen in den unteren Schichten (über deren Aggregatzustand wollen wir weiter unten gewisse Voraussetzungen machen) Verschiebungen entstehen, die durch das Rotationsgesetz bedingt sind. Am stärksten würden also die Teile in der Nähe des Äquators ostwärts verschoben und in den lateralen Zonen westwärts, und zwar sollen die Verschiebungen gegen die Pole zunehmen. Aus dieser Bedingung lassen sich dann die Spannungen berechnen und schließlich die Kurven, längs welcher die Risse eventuell erfolgen können. Es ergibt sich auf diese Weise die Kurvenschar

$$\cos \varphi = C e^{-\psi} \tag{4}$$

wobei ψ geographische Länge und φ geographische Breite bezeichnet. Diese Kurven auf der Oberfläche der sphärischen Scheibe verlaufen symmetrisch in bezug auf den Äquator. Legen wir den nullten Meridian durch den Schnittpunkt f des Äquators mit dem Westrand des Kontinents, so wird $C = 1$ der durch diesen Punkt hindurchgehenden Kurve (Fig. 3)

$$\cos \varphi = e^{-\psi} \tag{5}$$

entsprechen. Ein Teil dieser Kurve ($gf e$) verläuft auf dem Kontinent $AA_1 B_1 B$. Weiter windet sie sich als eine Spirale um die Pole herum (Fig. 3). Die Risse können längs jeder der Kurven (4) entstehen. Birst der Urkontinent $AA_1 B_1 B$ längs der Kurve (5) oder einer ihr benachbarten, so wird er in drei Teile zerfallen: A , B und C . Die Spitzen der beiden ersten Teile liegen am Äquator, die Breite dieser Kontinente nimmt mit der geographischen Breite zu.

Nun wollen wir feststellen, wie sich nach der Hypothese der zonalen Rotation die weitere Bewegung der einzelnen Kontinente vollziehen wird. Der Kontinent A befindet sich nördlich, der Kontinent B südlich des Äquators. Falls die Geschwindigkeitsverteilung im Substratum ihren zonalen Charakter nicht verloren hat, wird sich im Verlauf der weiteren Bewegung A entgegen dem Sinne des Uhrzeigers, B im Sinne des Uhrzeigers drehen. Denn der dem

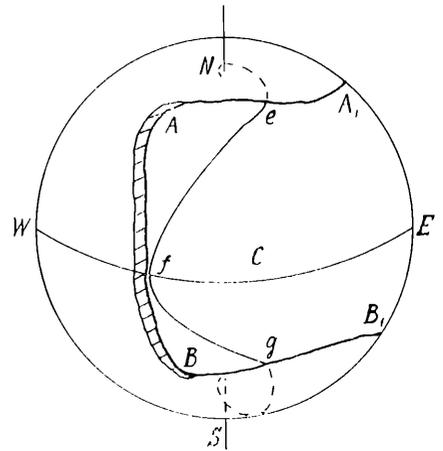
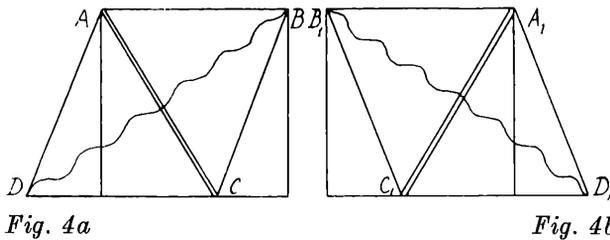


Fig. 3

Äquator näher liegende Teil wird von der äquatorialen Zone des Substratums in der Ost-richtung mitgenommen, dagegen der nördliche Teil von *A*, bzw. der südliche Teil von *B* wird durch die zurückbleibenden Schichten (aa_1c_1c und dd_1b_1b in der Fig. 2) festgehalten. Der Westrand wird dadurch, vom Westen gesehen, konkav gebogen. Nun hat aber der dritte Kontinent (*C*) den größeren Teil des Äquatorgürtels des Urkontinents behalten und infolgedessen werden auch die größeren Geschwindigkeiten in der Ostrichtung überwiegen, so daß er sich von den anderen Kontinenten zu entfernen beginnen wird. Es werden alle drei Kontinente gegen die den Polen näheren Schichten des zonalrotierenden Planeten in der Ost-richtung verschoben, bleiben aber hinter der äquatorialen Zone der Unterlage zurück.

Wir haben hier gewisse Schlüsse aus unserer Hypothese der zonalen Rotation eines Planeten unter einigen das Problem vereinfachenden Bedingungen gezogen, nämlich: 1. daß das Substratum eines Kontinents eine Flüssigkeit ist, 2. daß der Kontinent schwimmen kann und 3. daß er sich wie ein elastischer Körper verhält. In den Anwendungen dieser Ergebnisse auf den Fall der Erde, auf die wir weiter unten zurückkommen, werden, können wir diese Annahmen durch andere, dem wahren Zustand mehr entsprechende, ersetzen. Diese Vereinfachungen sollten uns nur die Beschreibung eines Vorganges erleichtern, der uns eine klare Vorstellung über die Möglichkeit der Entstehung der Kontinente und deren Ursache liefert.

Wir wollen hier noch die Wirkung der Gezeitenkräfte erwähnen, die auch ein Spannungsfeld in der Erdkruste hervorrufen können. Nach der Theorie von G. H. Darwin wird durch



die Gezeitenreibung ein quadratischer Teil der Kruste in einen Rhombus verzerrt, und zwar in der nördlichen Halbkugel in der in der Fig. 4a dargestellten Weise, da sich die Gezeitenwelle nach Westen verschiebt und die größte Wirkung am Äquator ausübt. Diese Kraft verursacht ein Spannungsfeld, das Risse und Faltungen in anderen Richtungen als

in unserem Schema verlaufenden Richtungen erzeugt. Die diagonalen Zugrisse (*AC*) würden in der Richtung NW—SW, dagegen im Falle der zonalen Rotation von der angenommenen Art in der Richtung NO—SO verlaufen. Die geschlängelte Linie *BD* (Fig. 4a, bzw. 4b) entspricht den Faltungen infolge der Gezeiten, bzw. der zonalen Rotation. Der Einfluß der letzteren ergibt das Spiegelbild von dem in der Fig. 4a dargestellten.

§ 5. Die Form und Verschiebungen der Kontinente.

Die Nord- und Südamerika ähnliche Form der Kontinente *A* und *B* (Fig. 3) veranlaßt uns, die Gleichung (5) als Gleichung des Atlantischen Ozeans zu bezeichnen, denn bei der Verschiebung des dritten Teiles (*C*) des Urkontinents kann sich aus dieser Spalte ein Ozeanbecken bilden. Bedenkt man, daß der Urkontinent nach unserer Auffassung ein aus mehreren Teilen zusammengesetzter Block von einer außerordentlich komplizierten Struktur war, in dem sich also das Spannungsfeld von dem oben angeführten einfachen theoretischen stark unterscheiden konnte, so muß man schon aus diesem ersten Ergebnis den Schluß ziehen, daß die Hypothese der zonalen Rotation der Erde eine richtige Erklärung der Entstehung der Großformen der Erdoberfläche zu liefern imstande ist.

Durch andere Risse wurden die übrigen Kontinente: Eurasien, Afrika, Australien und Antarktis voneinander getrennt. Ihre Konturen waren durch die Zusammensetzung alter Schilder bedingt. Diese Kontinente befanden sich in den sich mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten bewegendem Zonen, so daß der Abstand zwischen ihnen im Laufe der Zeit zunehmen konnte. Es ist dabei die Antarktis in der Polarzone zurückgeblieben und Australien gegenüber Afrika weiter nach Osten getrieben worden, da es nach der Abtrennung in die

Nähe des Äquators gelangt ist. Bei der zweiten Spalte und ihren Abzweigungen (Fig. 7 a) ist nur der südliche Teil eines theoretischen Risses vorhanden. Diese Spalte entspricht nur teilweise dem Verlauf der Kurven (4), nämlich in der Nähe des Äquators. Wir wissen aber nicht, inwiefern der zonale Charakter der Bewegung des Substratums zur Zeit der Bildung dieser Kontinente regelmäßig geblieben ist. Die Bewegung des Urkontinents in früheren Epochen könnte die einfache Gesetzmäßigkeit ziemlich stark geändert haben.

Aus den beiden angeführten Gründen, nämlich der Kompliziertheit des Aufbaues eines Urkontinents und der Störungen in dem flüssigen Teil eines Planeten kann man nicht erwarten, daß sich auf allen Planeten homologe Kontinente bilden werden.

Wenn die einzelnen Teile des Urkontinents sich getrennt haben, wird jeder von diesen Teilen sich mehr oder weniger selbständig bewegen können.

Aus der Lage der Kontinente können wir im Falle der Erde unmittelbar den Sinn ihrer Drehung auf der Erdoberfläche bestimmen, wie wir es schon im vorigen Paragraphen getan haben. Die Kontinente in der nördlichen Hemisphäre, d. h. Nordamerika und Eurasien, werden gezwungen, sich dem Sinne des Uhrzeigers entgegenzudrehen, da ihre südlichen Teile von der äquatorialen Zone des Substratums mitgenommen werden und sich schneller in der Ostrichtung bewegen müssen als die nördlichen. Umgekehrt muß bei Südamerika, Afrika und Australien eine Drehung im Sinne des Uhrzeigers eintreten. Nahe voneinanderliegende Kontinente — Eurasien und Afrika — müßten dabei nach der Bildung einer Spalte mit ihren Rändern im westlichen Teil der Spalte wieder in Berührung kommen.

Experimentelle Untersuchungen.

Dank dem Entgegenkommen des Herrn Prof. H. Benndorf war es dem Verfasser möglich, am Physikalischen Institut der Universität Graz die angeführten theoretischen Überlegungen durch folgende Versuche zu überprüfen.

Zum innigsten Dank ist der Verfasser dem Herrn Prof. H. Benndorf auch für die Anteilnahme an der Konstruktion des zu diesem Zwecke verwendeten Apparates verpflichtet.

In der Fig. 5 ist eine Skizze des Apparates gegeben. In dem an beiden Enden offenen Kasten *K* befinden sich nebeneinander 19 je 1 cm breite Leisten, die mit Hilfe von Drähten mit der Trommel *ABC* verbunden sind. An beiden Seiten sind je zwei Randleisten befestigt. Die Halbmesser der kreisförmigen Scheiben auf der Trommel nehmen von der Mitte *B* gegen die Enden (*A* und *C*) ab, und zwar derart, daß bei dem Gleiten der Leisten eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung erreicht wird.

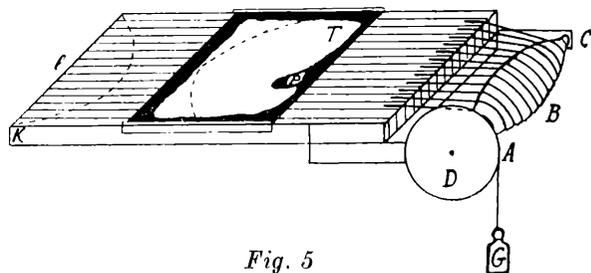


Fig. 5

Legt man die *x*-Achse längs der mittleren Leiste, so wird die Geschwindigkeit einer Leiste mit dem Quadrat ihres Abstandes von der Achse abnehmen. Auf dem mittleren Teil der Leisten befindet sich eine 3 bis 4 mm dicke Pechschicht, auf die eine andere, dünne Schicht aus einem festen Material aufgetragen wird. Als solches wurde Gips oder Teig, dessen oberste Schicht zum Trocknen gebracht wurde, verwendet. Die Trommel setzt man mit Hilfe der Rolle *R*, auf die ein Gewicht *G* von 2 bis 5 kg gehängt wird, in Bewegung. Um den Versuch in einer kürzeren Zeit machen zu können, wurde der mittlere Teil des Apparates in einen anderen Kasten eingebaut und in diesem auf einer Temperatur von 28 bis 30° C. erhalten.

Die in der Pechschicht infolge der zonalen Geschwindigkeitsverteilung herrschenden Spannungen rufen in der Gips- oder Teigplatte einen Spannungszustand hervor und es kommt zur Entstehung der Risse. Wäre die Gipsplatte homogen und überall gleich dick gewesen, so würden die Risse symmetrisch auf beiden Seiten der Mittellinie verlaufen. Dies ist aber

nicht der Fall, weil die Platte *T* nie vollkommen gleich dick ausgefallen war. Infolgedessen entstehen bei jedem Versuch andere Gebilde, die aber immer dem von der Theorie vorgesehenen Sinn entsprechen. Die Risse in dem oberen „nördlichen“ Teil verlaufen in der Richtung SW—NE, dagegen die in dem unteren „südlichen“ haben die Richtung NW—SE.

In einer Reihe von Versuchen mit einer möglichst gleich dicken Platte *T* ist diese in einige Teile zerfallen (Fig. 6 a bis 6f), die eine gewisse Ähnlichkeit mit den Kontinenten auf-



Fig. 6

weisen. Sehr bemerkenswert ist in einigen Fällen die Übereinstimmung nicht nur in der Form, sondern auch in der Anzahl der „Kontinente“. Bei einigen Versuchen ergaben sich auch die Inselguirlanden an der „Ostküste Asiens“. Man kann die Frage stellen, warum man in dem unteren Teil 3 bis 4 größere Fragmente erhält, dagegen im oberen eine kleinere Anzahl. Dies wurde in folgenden Fällen beobachtet: Erstens, wenn in unteren Teil eine etwas größere Geschwindigkeit herrschte, was man auch z. B. der Fig. 6 b entnehmen kann: der nördliche Westrand ist weniger gekrümmt, da der obere Teil der Gipsplatte wahr-

scheinlich nicht so gut gehaftet und sich deswegen mehr als Ganzes verschoben hat. Eine andere Ursache dafür, daß die Zerspaltung des Urkontinents auf der Südhalbkugel der Erde anders erfolgt ist als auf der Nordhalbkugel, kann auch darin liegen, daß der Urkontinent nicht genau symmetrisch zum Äquator gelegen war, wie dies auch bei einigen Experimenten z. B. Fig. 6 c und 6 d eingetreten ist. Der nördliche Teil des Urkontinents ist breiter als

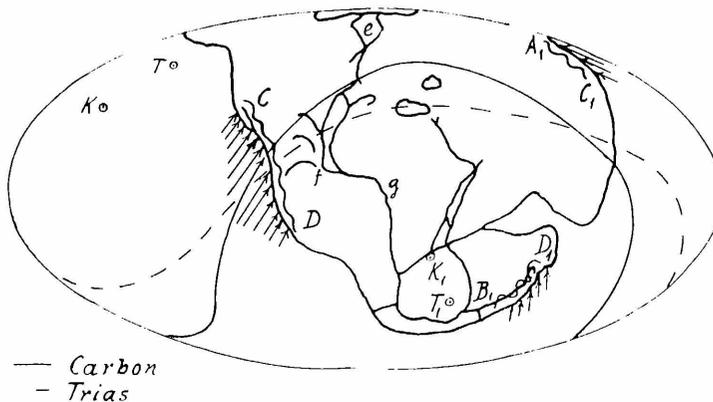


Fig. 7a

der südliche und dieser, der Wegenerschen Karte (Fig. 7a) gemäß, lag auch auf der südlichen Polarkappe zur Zeit des Zerfalls. Der dritte Grund, der auch eine große Rolle gespielt hat, ist die Inhomogenität des Urkontinents.

Um den letzten Umstand zu berücksichtigen, wurde eine Reihe von Versuchen vorgenommen, in denen die Plattendicke ungefähr der Existenz der uralten Schilder entsprechen sollte, und zwar war im „Urkontinent“ an den Stellen der kanadischen, russischen, sibirischen, chinesischen, indischen, brasilianischen, afrikanischen und australischen Tafeln die Dicke verstärkt. Die Ergebnisse sind in der Fig. 6 c und 6 d dargestellt.

Auch die Existenz des „Atlantischen Rückens“ konnte festgestellt werden. In einigen Versuchen ist durch zwei ungefähr parallel verlaufende Risse ein Streifen (Fig. 6 und 6c)

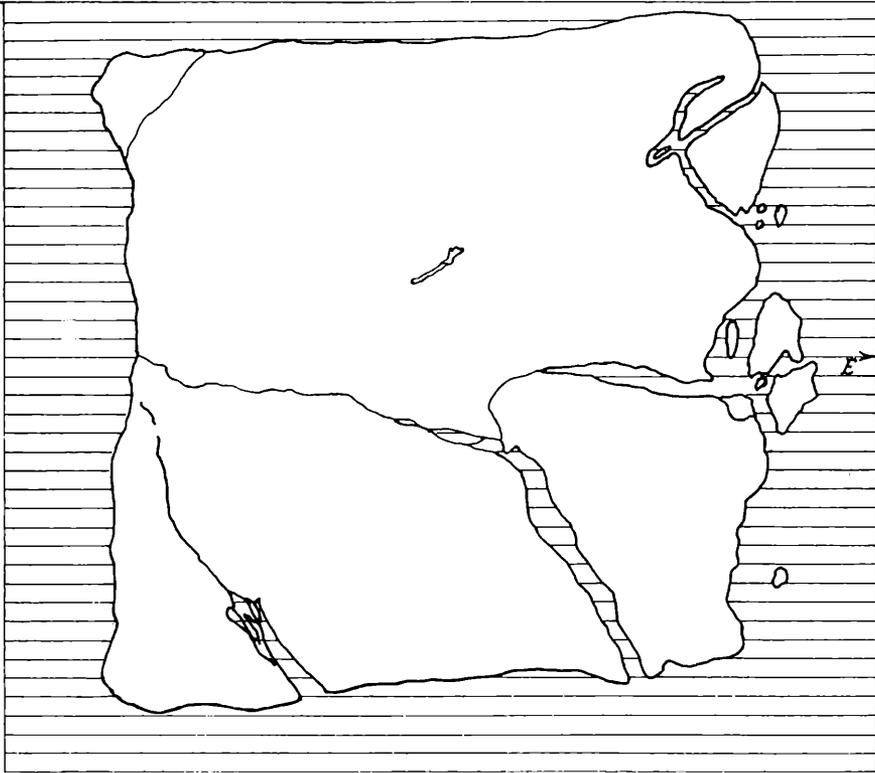


Fig. 6a

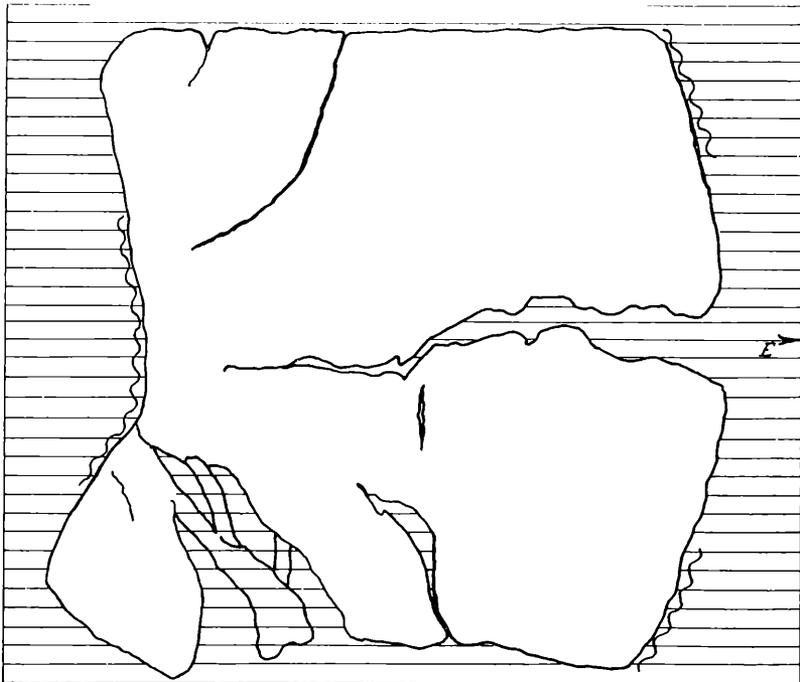


Fig. 6b ~~~~~ *Faltungen*

zwischen „Südamerika“ und „Afrika“, bzw. zwischen „Nordamerika“ und „Europa“ abgetrennt worden.

Nach der Abtrennung haben sich die einzelnen Teile der Gips- oder Teigplatte in dem Sinne gedreht, der oben bereits ausführlich auseinandergesetzt wurde. Infolge der Eigenschaften des zur Verfügung stehenden Materials mußte bei diesen Versuchen auf die naturtreue Reproduktion der Gebirgsbildung verzichtet werden. Auf diese Frage kommen wir noch bei der Besprechung der schönen Versuche von D. Griggs im nächsten Paragraphen zurück.

§ 6. Die Gebirgsbildung.

In der zweiten Grundfrage über die Gestalt der Erdoberfläche wollen wir zunächst auch wie im Falle der Entstehung der Kontinente uns das gesamte Kraftfeld denken, das aus der Hypothese der zonalen Rotation folgt und die Entstehung der Faltengebirge verursachen könnte. Unsere Überlegungen sollen sich nun nicht nur auf jene Form des Urkontinents beziehen, die im Falle der Erde vermutet wird, sondern auch auf die tatsächlich vorhandenen Kontinente. Aus der Fig. 7a entnehmen wir, daß die Ränder eines Kontinentalblockes nicht der Wirkung von überall gleichen Kräften ausgesetzt sein können. Liegt der Block auf allen drei Zonen (Fig. 2), so stellen wir sofort außer der Symmetrie in bezug auf den Äquator eine Asymmetrie in der Verteilung der Kräfte in der Meridianrichtung fest.

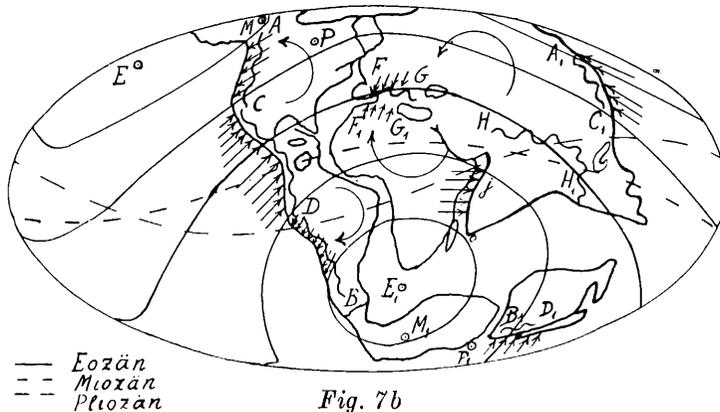


Fig. 7b

Das unter den äquatorialen Teil des Kontinentalblockes einströmende Substratum übt an seinem Westrand einen Druck in der Ostrichtung aus. Dieser kommt zu gleicher Zeit mit einer gegen das Erdinnere gerichteten Reibung zustande, so daß eine Bedingung zur Biegung, bzw. Faltung dieses Randteiles vorhanden ist. Die Existenz eines zum Mantel senkrechten Druckes, d. h. einer zur Erdoberfläche parallelen Kraft ist die erste notwendige Bedingung für die Bildung von Falten. Durch die Wirkung dieser Kräfte im mittleren Gebiete des Westrandes von Amerika kann man also die Entstehung dieses Teiles der Kordilleren erklären. Unserem Schema gemäß herrscht aber auf dem entgegengesetzten Rand der äquatorialen Zone ein anderer Zustand, denn das dort ausströmende Substratum ruft Zugkräfte hervor. Infolgedessen kann man die Entstehung der Inselketten oder größeren Inseln am Ostrand Asiens vermuten. Die Wirkung des Substratums in den zwei lateralen Zonen spielt sich aber in der umgekehrten Richtung ab. Am nordöstlichen Rand Asiens einströmendes Substratum sollte bei einer regelmäßigen Strömung unter dem nordwestlichen Rand von Amerika ausströmen und das im Süden unter die Ostküste Australiens einströmende erscheint dann westlich des südwestlichen Randes von Südamerika. Wir haben also für die Gebirgsbildung notwendige Bedingungen noch am NE- und SE-Rand des Urkontinents.

Nach der Zerspaltung des Kontinentalblockes wird das ganze Bild komplizierter und außer den oben angeführten Stellen der Erdoberfläche werden noch an einigen anderen für

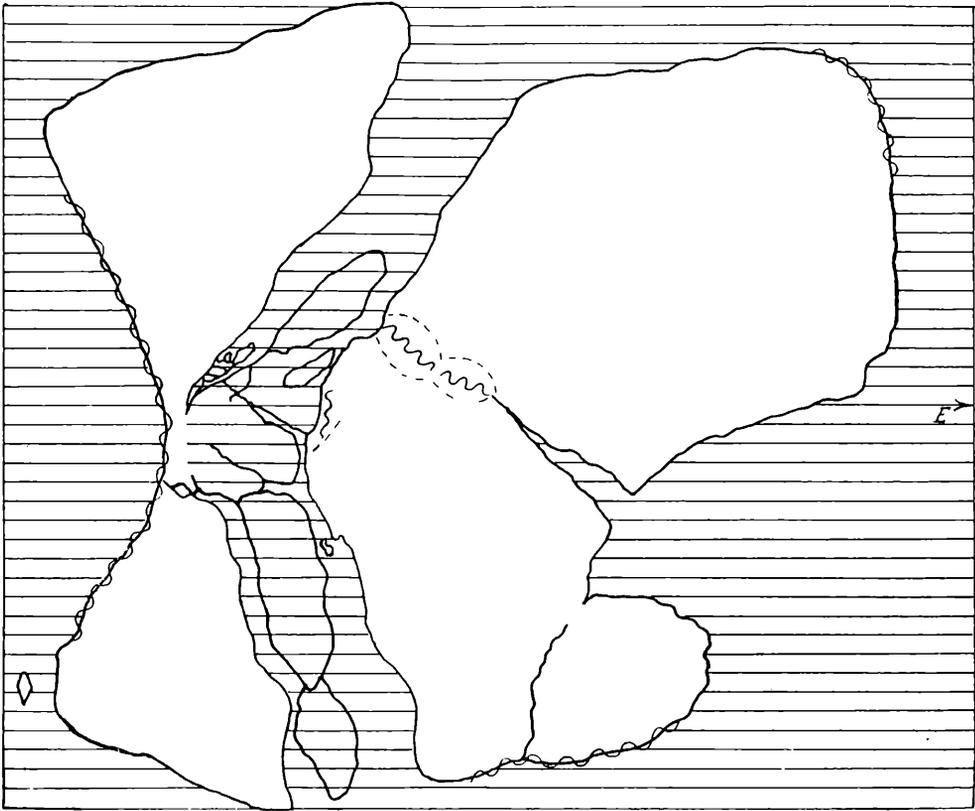


Fig. 6c ~~~~~ *Faltungen*



Fig. 6d ~~~~~ *Faltungen*

die Faltung günstige Bedingungen auftreten. Dies geschieht infolge der Bewegung einzelner Teile des Urkontinents. Bei der Drehung von Nord- und Südamerika werden weitere Gebiete längs der Pazifischen Küste in die Faltung einbegriffen, da in diesen Gebieten ein Gegendruck des Substratums entstehen wird (Fig. 7b). Aus derselben Figur, in der der Äquator im Miozän durch die ausgezogene Linie dargestellt ist, folgt, daß die ausgedehnte indische Halbinsel, die sich auf den am schnellsten bewegten Schichten des Substratums befand, in das Innere Asiens hineingeschoben werden konnte. Dafür spricht die Gestalt des Himalaya. Die Hypothese der zonalen Rotation gibt also eine unmittelbare Grundlage für die Wegenersche Voraussetzung über diese Art der Bildung des Himalaya.

Die Faltengebirge im westlichen Teil der Tethys weisen auf einen gegenseitigen Druck von Afrika und Europa, die sich im einander entgegengesetzten Sinn drehen. Dies würde auch mit der Tatsache im Einklang stehen, daß die tertiäre Kordillerenfaltung etwas früher erfolgt als die Alpenfaltung, weil die letzte erst nach Abtrennung Eurasiens und Afrikas von Amerika zustande kommen konnte. Das Gebiet der Tethys liegt entlang eines Gürtels in dem in früheren geologischen Epochen der Äquator verlaufen ist. In diesem Gürtel sollte die Unterströmung am stärksten die unteren Schichten des Urkontinents zerstören und damit eine günstige Anfangsbedingung zur Bildung einer Geosynklinale schaffen. Bei unseren Versuchen wurde immer außer den schräg verlaufenden Rissen ein Riß der Mittellinie entlang festgestellt (Fig. 6). Auf diese Weise gelingt es aber nicht, die Entstehung einer jeden der bekannten Geosynklinale zu erklären. Es kann aber auch der zweite Standpunkt über die Entstehung der Tethys im Rahmen der Hypothese der zonalen Rotation seinen Platz finden. Es entspricht vielleicht besser den Tatsachen, wenn die Geosynklinale als diejenigen Stellen, bzw. Streifen des Urkontinents aufgefaßt werden, die sich später zwischen den uralten festen Schollen oder längs ihrer Ränder gebildet haben. Hat sich der Urkontinent auf den beiden Seiten des Äquators entwickelt, was durchaus plausibel erscheint, so wäre es möglich, daß auch der äquatoriale Streifen oder zumindest ein Teil desselben einen später entstandenen Gürtel auf der Erdkruste darstellt, der nicht die Mächtigkeit und Festigkeit der Schilde besitzt. Dazu war er noch der Wirkung von zwei entgegengesetzten Drehmomenten an seinem Ostende ausgesetzt.

Bisher haben wir im wesentlichen dargelegt, wie aus der Hypothese der zonalen Rotation der Erde ein mechanisches Schema der im Tertiär stattgefundenen Orogenese gewonnen werden kann. Diesem Schema gemäß müßten die Tangentialkräfte in der Erdkruste an den Stellen gewesen sein, an welchen sich tatsächlich die Faltungen im Tertiär gebildet haben. Am Westrand von Amerika, am Ostrand Australiens und am Nordostrand Asiens mußte aber der Druck auf der Mantelfläche der Kontinente selbstverständlich auch in der Zeit vor dem Zerfall des Urkontinents herrschen, so daß in diesen Gebieten die Faltung noch früher beginnen konnte. Hier war die Faltung die Folge des Druckes der Unterlage gegen den Sialblock, falls wir mit Wegener den Urkontinent als einen solchen betrachten. An anderen Stellen im Inneren des Urkontinents hat aber der gegenseitige Druck zwischen zwei Sialschollen dieselbe Rolle gespielt. Die gleichen Ursachen, nämlich die Verschiebung gegen das Substratum, bzw. der Druck zwischen den einzelnen Schollen mußte auch in den früheren geologischen Epochen wirken und so die Faltung der älteren Gebirgsketten verursachen. Für diese ein Kraftfeld anzugeben, ist aber vielleicht noch verfrüht, denn es fehlt uns eine vollständige und sichere Karte der alten Formationen. Nach E. Suess sind die Kaledoniden, die Spitzbergen, Skandinavien und Großbritannien zusammensetzen, sowie die Sahariden die ältesten Faltungen. Diese Gebirge erstrecken sich längs eines Meridians. In anderen Darstellungen findet man die Behauptung, daß die älteren Faltungen in gewissen großen Bögen verlaufen sind. Auf Grund dieser Angaben ist es aber noch schwer, sich eine Vorstellung über die entsprechende Kräfteverteilung zu machen. Anders ist der Fall der herzynischen Gebirge (vgl. z. B. Umbgrove [33]).

Die zunehmende Anzahl der vorgeschlagenen Gebirgsbildungstheorien zeigt, daß die früher formulierten nicht imstande gewesen sind, die Erklärung des Vorganges der Gebirgs-

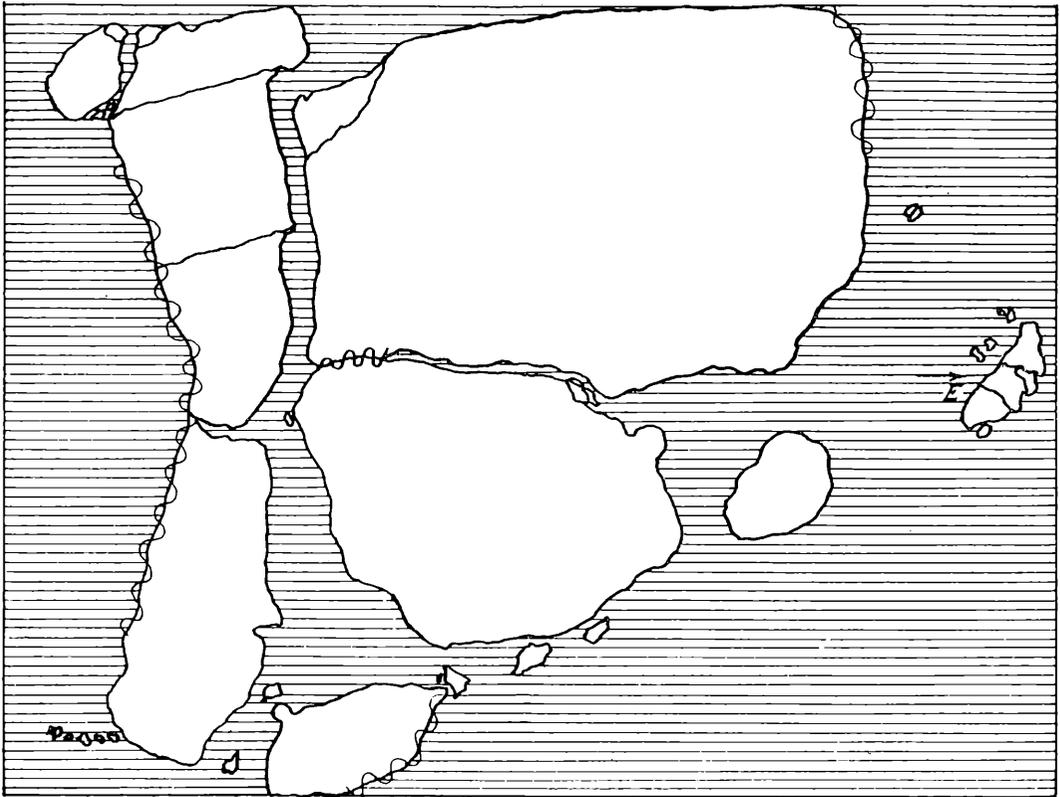


Fig. 6e ~~~~~ Faltungen

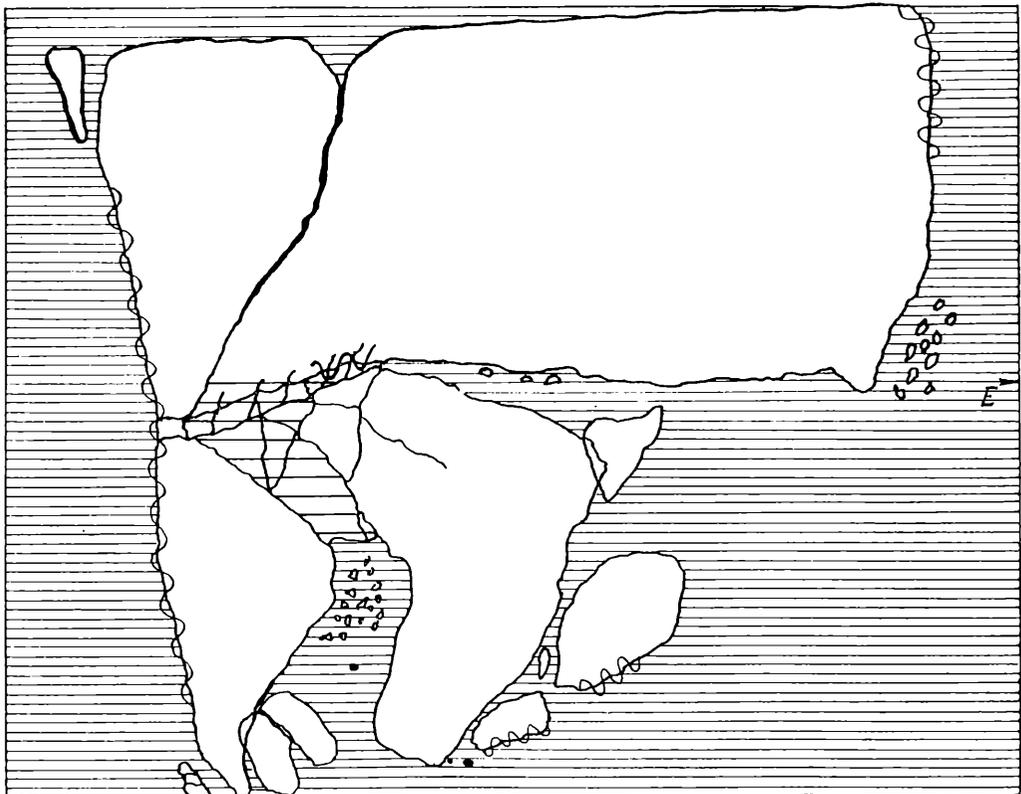


Fig. 6f ~~~~~ Faltungen

bildung auf eine sichere Basis zu stellen. Bei der Analyse dieser Frage muß man in erster Linie den folgenden Tatsachen Rechnung tragen: der Entwicklung des gesamten Gebirgssystems der Erde im Laufe der Erdgeschichte, der Gesetzmäßigkeit der Verteilung der wichtigsten Faltengebirge auf der Erdoberfläche und schließlich der Natur und Größe der orogenen Kräfte.

Die Gesetzmäßigkeiten der Gebirgsbildung wurden das Ziel zahlreicher geologischer Forschungen und sind in verschiedenen Formen ausgesprochen. Von diesen Gesetzmäßigkeiten wollen wir hier einige allgemeine erwähnen (vgl. H. Stille [31]).

1. Die Gebirgsbildung fand in einigen durch größere Ruhepausen getrennten Phasen von relativ kurzer Dauer statt.

2. Im Laufe einer Phase verlief der Vorgang gleichzeitig an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche.

3. Man unterscheidet folgende Phasen: drei kaledonische (Cambrium-Devon), vier varistische oder herzynische (Carbon-Perm) und 18 bis 20 jüngere, von denen sich die Hälfte im Mesozoikum, hauptsächlich in der Kreide, die übrigen im Tertiär entwickelt haben.

4. Das Abklingen der Gebirgsbildung war im Mesozoikum selten beendet.

5. Die Orogenese sowie die Epirogenese ist immer durch die Wirkung der gleichen Ursache hervorgerufen, nämlich durch den seitlichen Druck.

6. Die Isostasie kann nicht als Hauptursache dieser Vorgänge betrachtet werden.

Es scheint, daß sich das gewonnene mechanische Modell allen diesen allgemeinen Forderungen anpassen läßt. Die Periodizität der Gebirgsbildung wird verständlich, wenn auch vielleicht nur in gewissen Fällen. Denn für die Faltung ist notwendig, daß der Druck auf der Mantelfläche eine gewisse Grenze überschreitet, und dies kann dann geschehen, wenn z. B. der Urkontinent durch die Strömungen eingeklemmt wird. Ist es dann zu den Rissen im Urkontinent gekommen, so beginnen sich die einzelnen Teile zu bewegen, wodurch in einigen Gebieten die Spannungen vermindert werden können und die Gebirgsbildung an den betroffenen Stellen aufhören wird, weil ein Teil der Spannungsenergie sich in die über den ganzen Kontinent verteilte kinetische Energie verwandeln wird. Es folgt also eine Periode der relativen Ruhe.

Die Natur der orogenen Kräfte folgt unmittelbar aus der Hypothese der zonalen Rotation. Was aber die Größenordnung dieser Kräfte betrifft, so bleibt die Frage noch offen. Die an kleinen Gesteinsproben ermittelte Festigkeit des Granits variiert zwischen den Grenzen 2000 bis 3000 kg/cm^2 . Aus den Versuchen in Laboratorien läßt sich aber noch nichts sicheres über die Eigenschaften der Gesteine im Inneren der Erdkruste schließen, insbesondere über die Zustände, die im Laufe der Entwicklung dort geherrscht haben. Darüber, daß sich diese Zustände geändert haben, kann man kaum zweifeln. Auch in der Gegenwart können mit der Änderung des Temperaturgradienten, des Druckes in verschiedenen Schichten der Erdkruste Bedingungen auftreten, die ganz verschieden von denjenigen in Laboratorien sind. Die Abschätzung der Festigkeit auf Grund der Abweichungen von der Isostasie oder der Fließbewegungen, die z. B. in Skandinavien nach der Befreiung von dem Gewicht der Eiskappe entstanden sind, führt nicht zu übereinstimmenden Ergebnissen. Die auf Grund dieser Schätzungen gefundenen Werte der Festigkeit der obersten Schicht der Erdkruste liegen zwischen 100 und 2000 kg/cm^2 . Diese Werte ermöglichen aber schon, die aus einigen Theorien folgenden Kräfte auszuschließen, weil ihre Größenordnung bedeutend unter den obigen Grenzen liegt. Auf diese Weise ist festgestellt, daß für die Erklärung der Gebirgsbildung die Gezeitenkräfte, die Polflucht- und die Corioliskraft nicht in Betracht kommen können. Auf einem experimentalen Wege kann die Größenordnung der von der Hypothese der zonalen Rotation verlangten Kräfte nicht mit einiger Sicherheit bestimmt werden. Auf diese Frage kommen wir noch später zurück und wollen nur noch die Versuche von D. Griggs [5] besprechen.

In seiner Theorie der Gebirgsbildung betrachtet Griggs als Ursache dieses Vorganges die subkrustalen Konvektionsströmungen, die zyklisch verlaufen sollen. Zur Unterstützung

seiner Voraussetzung hat er ein dynamisches Modell gebaut, dem ein besonderer Wert zuzuschreiben ist, weil er auf Grund der Dimensionsanalyse erdacht ist, so daß er am besten den geologischen Bedingungen entspricht. Bei seinem kleinen Modell wurde als flüssiges Substratum Glyzerin und als Kruste eine Schicht eines Gemisches von Zylinderöl mit Sägemehl verwendet, im zweiten größeren Modell wurden diese Substanzen durch ein sehr viskoses Wasserglas und das Gemisch von schwerem Öl und Sand ersetzt. Drehen sich beide Trommeln (*c*) in einem Gefäß in entgegengesetzter Richtung, so entsteht in der Kruste eine Deformation von der in der Fig. 8a angegebenen Art. Im Falle der einseitigen Strömung,

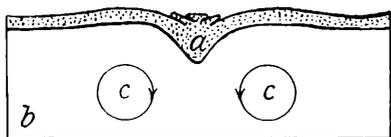


Fig. 8a

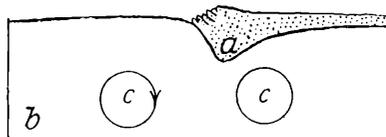


Fig. 8b

a = plastische Kruste, b = flüssige Unterlage, c = Trommeln.

die durch die Drehung nur einer Trommel (Fig. 8b) hervorgerufen ist, wird ein Teil der Kruste weggekehrt und am Rande des dicker gewordenen zweiten Teiles bilden sich dann Falten. Unter diesen breitet sich dann die Kruste auch in die Tiefe aus. Diese Versuche können also die Wirkung der Unterströmungen gut illustrieren, so daß man sich klar vorstellen kann, wie die Gebirgsbildung an einem Kontinentalrand verwirklicht ist. Die wichtige Rolle solcher Strömungen in den oberen Schichten der Erdkruste ist damit festgestellt, wie es neuerdings auch Heiskanen [9] betont hat. Wie ich gezeigt habe [11], folgt aus der Hypothese der zonalen Rotation unmittelbar, daß bei der notwendig eintretenden Bildung des Urkontinents durch die Strömungen des Substratums ein Teil der Simaoberfläche von Sialblöcken befreit wird. Selbstverständlich kann man nicht aus den Versuchen von Griggs etwas über die Ursache oder Art der Unterströmungen im Falle der Erde schließen, sondern lediglich über ihre Bedeutung bei den Vorgängen, die sich in den Oberflächenschichten abgespielt haben.

§ 7. Die Torsion der Erdkruste.

Die bis jetzt erörterten Fragen beziehen sich nur auf einen Teil der Entwicklung der Erde. Um unsere Vorstellungen über diese Entwicklung vollständig zu machen, müssen womöglich alle Ergebnisse der verschiedenen Wissenschaften in einem Bilde vereinigt werden. Denn beachtet man das nicht, so besteht die Gefahr, daß man durch eine Reihe verschiedener Theorien einzelner Erscheinungen nur teilweise Erklärungen gewinnt und, wenn diese auch manchmal annehmbar erscheinen, so wird doch in ihnen zu oft die Hauptrolle einem sekundären Faktor zugeschrieben. Dies ist z. B. das Schicksal einiger von den Hypothesen über die Gebirgsbildung. Die richtige Auffassung dieses Vorganges in der Erdkruste muß aber aus dem Gesamtbild der Bewegung und Deformation des Erdkörpers folgen.

Aus einem solchen Bewegungsmechanismus müssen zunächst folgende Tatsachen im Zusammenhang erklärt werden können:

1. Die Figur der Erde, die sich von einer der Gleichgewichtsfiguren rotierenden flüssigen Masse wenig unterscheidet.
2. Die Existenz bestimmter Gesetzmäßigkeiten in den Großformen der Erdkruste. Außer der Form und der Lage der Kontinente sollen auch die sogenannten geographischen Homologien berücksichtigt werden.
3. Die Bildung und Verteilung der wichtigsten Faltengebirge.
4. Die säkularen Polwanderungen auf der Erdoberfläche, welche dem paleoklimatischen Material gemäß stattgefunden haben.

5. Die Stellung der Rotationsachse der Erde zur Ekliptik.
6. Die Transgressionen und Regressionen.
7. Die Lage der Magnetpole.

Auch die Rolle, welche die Abkühlung der Erde und die Folgen der sich daraus ergebenden Kontraktion sowie die Radioaktivität spielen, muß dabei geklärt werden. Die genannten Erscheinungen umfassen Zeitintervalle von der Größenordnung der geologischen Zeitalter. Faßt man aber auch kleinere Zeitintervalle ins Auge, so kommen noch andere Erscheinungen in Betracht, z. B. die Präzession, die Polschwankungen, die periodischen Kontinentenverschiebungen, die Periodizität der Erdbeben oder der Vulkantätigkeit usw.

Bekanntlich können nicht alle diese Vorgänge auf die Wirkung einer Ursache zurückgeführt werden. Infolgedessen müssen wir versuchen festzustellen, in welchen Erscheinungen und in welchem Maße die zonale Rotation einen Einfluß ausüben könnte. Die Überlegungen in den vorigen Paragraphen beruhen auf vereinfachten Vorstellungen über den Zustand und die Bewegung verschiedener Krustenteile, insbesondere aber über deren Aggregatzustand. Um einen weiteren Schritt machen zu können, der uns der Lösung der aufgestellten Aufgabe näher bringt, müssen wir unser Schema dem wirklichen Zustand mehr anpassen. Es ist vielleicht unmöglich, den Aggregatzustand der äußeren Erdschichten als fest, zähflüssig oder plastisch zu bezeichnen. Ein zähflüssiger oder ein „fluidaler“ Körper, wie wir weiter sagen wollen, verhält sich gegen kurz andauernde Kräfte wie ein fester, gegen lang andauernde wie ein flüssiger. Inwiefern dieser Definition die Eigenschaften aller Schichten der Erdkruste entsprechen, läßt sich nicht unmittelbar feststellen. Man kann aber vermuten, daß die oberste Schicht, insbesondere vielleicht des Sialblockes mehr die Eigenschaften eines festen Körpers aufweist und daß mit zunehmender Tiefe infolge der wachsenden Temperatur eine gewisse Fluidalität auftritt. Wir wollen also annehmen, daß nicht nur die Unterlage, sondern auch die unteren Schichten des Sials fluidal sein können. Demzufolge wird wahrscheinlich der Urkontinent nicht in vollkommen abgetrennte Teile zerfallen, sondern es werden feste Schollen entstehen, die auf der mehr fluidalen Sialschicht liegen. Die von dem unterströmenden Sima mitgeschleppte unterste Schicht des Sials wird diese Bewegung auf die höher liegenden übertragen, bzw. in diesen Schichten Spannungen hervorrufen. Nach dem Zerfall der oberen festen Rinde werden also die unten liegenden Schichten wie eine plastische Masse auseinandergezogen, so daß zwischen zwei Kontinenten der Boden des Ozeanbeckens ganz oder teilweise aus Sial bestehen

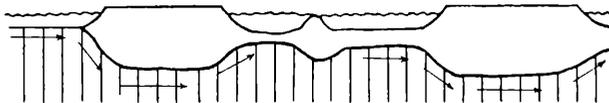


Fig. 9

kann (Fig. 9). Es können auch auf dieser plastischen Unterlage größere oder kleinere Teile der festen Rinde bleiben und von ihrer Höhe hängt es ab, ob sie als Inseln oder nur als Hebungen über dem Ozeanboden erscheinen. Ist z. B. ein langer Streifen am Rande eines Kontinents abgespalten, so wird er zu einem Rücken im Ozean oder, falls seine Gipfel über das Meeresniveau hervorragen, zu einer Inselkette, die durch das Meer vom Festland abgetrennt ist. Um eine Vorstellung über diese Vorgänge zu gewinnen, braucht man keine besonderen Laboratoriumsversuche. Dies ist jedem zugänglich, der eine plastische Masse, z. B. einen Teig, mit einer abgetrockneten oberen Schicht, auszudehnen versucht. Durch den Zug werden sich solche feste kleinere Teile von den größeren und voneinander entfernen.

Mit dieser Annahme gelangen wir auf Grund der Hypothese der zonalen Rotation zur folgenden Darstellung der Vorgänge in der Erdkruste nach der Entstehung eines Urkontinents. Das Substratum, Sima oder Magma genannt, hat noch aus früheren Zeitaltern eine Fluidalität behalten, und die in ihm stattfindenden Strömungen gehorchen einem Gesetz der

zonalen Verteilung der Winkelgeschwindigkeiten. Das Rotationsgesetz brauchen wir nur insofern zu spezialisieren, daß wir annehmen, die Winkelgeschwindigkeit in den äußeren Schichten nehme vom Äquator zum Pol ab, wie es z. B. bei der Sonne, dem Jupiter und Saturn noch gegenwärtig der Fall ist. Infolge der zonalen Rotation des Substratums entsteht auf der eingetauchten Fläche des Urkontinents ein Kraftfeld, das aus Druck und Reibungskräften zusammengesetzt ist. Die räumliche Verteilung dieser Kräfte ist in den Fig. 2 und 7 gegeben. Die durch diese Kräfte hervorgerufenen Spannungen im Urkontinent verursachen im Falle der Erde zwei Vorgänge. Erstens kommt die Gebirgsbildung an der Westküste Amerikas, an der Ostküste Australiens und Nordostküste Asiens zustande, vielleicht auch an anderen schwächeren Stellen des Urkontinents, und zwar in der Meridianrichtung. Zweitens beginnt bei zunehmenden Spannungen der Zerfall der festen Sialschicht, die den oberen Teil des Urkontinents bildet. Nehmen wir ein dem FAYESCHEN ähnliches Gesetz an, so werden im westlichen Teil des Urkontinents zwei Teile abgespalten, die der Form nach Nord- und Südamerika ähnlich sind. Das am Ostrand ausströmende Sima reißt kleinere Teile des Urkontinents ab, die als Inselgürländer oder Gruppen weiter ostwärts in den Pazifischen Ozean verschoben werden. Durch andere Risse trennen sich die übrigen Kontinente voneinander. Nun werden durch die Simaströmungen die unteren plastischen Sialschichten auseinandergezogen, so daß diese sich, die festen Kontinentalschollen tragend, ausdehnen und die Ozeanbecken des Atlantik und Indik bilden werden. Dabei entfernt sich Afrika und Eurasien von Amerika gegen Osten, Australien mit dem ganzen Inselnystem von Ostindien usw. verlagert sich noch schneller ebenfalls in der Ostrichtung. Die Antarktis bleibt aber auf der Polarkappe. Durch die Kontinentverschiebungen und durch die eventuelle Verlagerung der gesamten Erdkruste wurden zwar die Simaströmungen sicher gestört, aber ihren zonalen Charakter brauchten sie doch nicht verloren zu haben, so daß wir beim ersten Schritt in unserer Untersuchung diese Störungen vernachlässigen können. Das ganze Bild entspricht also einer Torsion der Erdkruste, bei welcher die äquatoriale Zone am stärksten gedreht wurde. Die dabei in verschiedenem Sinn erfolgten Drehungen der einzelnen Kontinente haben im Tertiär weitere Gebirgsbildung verursacht.

Wie oben erwähnt, muß jede Hypothese über den Bewegungsmechanismus der Erdkruste nicht nur die gegenwärtige Morphologie der Erdoberfläche erklären, sondern auch ihre Evolution, und wir haben schon gesehen, welche von den dazu gehörigen Fragen die Hypothese der zonalen Rotation in der obigen Formulierung zu beantworten erlaubt. Wir können noch folgendes hinzufügen: bei einer regelmäßigen zonalen Geschwindigkeitsverteilung von der ins Auge gefaßten Art wird sich die Drehung der getrennten Krustenteile in der südlichen Halbkugel im Sinne des Uhrzeigers, in der nördlichen aber im entgegengesetzten Sinne vollziehen. Dadurch konnte die Westküste Amerikas gegen Ost gekrümmt werden, was auch tatsächlich der Fall ist, und da die Kordilleren nach SUEß, HAAG und KOBER einen stark um die Antillen gekrümmten Bogen darstellen, so steht auch dies im besten Einklang mit unserem Bewegungsmechanismus der Erdkruste. Es zeigt außerdem der Bogen von Kap Horn bis zum Grahamland, daß die Südspitze von Südamerika nach Westen gegenüber den Südantillen verschoben ist, was auch unserem Schema gemäß sein soll. Es folgen der bereits angeführten Regel über den Sinn der Drehungen auf der Erdoberfläche auch mehrere andere Objekte, z. B. Madagaskar, die langgestreckten Halbinseln, die Lage Arabiens zwischen Afrika und Asien und die Richtungen von Inselgürländern, die sich in der Nordhalbkugel hauptsächlich in der Richtung NE—SW und in der Südhalbkugel in der Richtung SE—NW erstrecken. Ein Blick auf den Globus genügt, um die Richtigkeit dieser Schlüsse festzustellen. Die Bildung der Kurilen sowie der anderen Inselketten am Ostrand Asiens steht also im Einklang mit der Vermutung von F. v. RICHTHOFEN, daß diese Inseln einen Beweis für die Existenz einer in den Pazifik gerichteten Zugkraft liefern.

Die auf Grund der Hypothese der zonalen Rotation der Erde geschilderten Vorgänge bilden nur einen Teil des Bewegungsmechanismus. Bevor wir aber diesen erweitern werden,

damit er auch die anderen der oben erwähnten Erscheinungen umfassen kann, wollen wir uns mit der Frage der in der Erdkruste wirkenden Kräfte näher befassen. Wir haben in unserem Schema die Eigenschaften des Substratums und der unteren Sialschichten mit dem Wort „fluidal“ bezeichnet, nur um die Fähigkeit der Stoffe in der Erdkruste zu kennzeichnen, in einer Art der Fließbewegung begriffen zu sein. Diese Eigenschaft müssen gewisse Krustenteile nach allen Theorien der Gebirgsbildung besitzen. Nun liegt aber die große Schwierigkeit darin, daß wir noch nicht imstande sind, dieser physikalischen Eigenschaft (Fluidalität) mit unseren Definitionen verschiedener Aggregatzustände näher zu kommen. Jene Forscher, die auf Grund der Versuche mit Gesteinen in Laboratorien etwas über das Verhalten der Stoffe im Inneren der Erdkruste schließen wollen, kommen zu keinen übereinstimmenden Ergebnissen. Da die Eigenschaften der reellen Körper von den fundamentalen Definitionen eines elastischen oder plastischen Körpers oder einer zähen Flüssigkeit abweichen, werden neue Begriffe, wie „firmoviscosity“ (Jeffreys), pseudoviskoser Körper (Griggs), „elasticoviscosity“ (Michelson), auch eine innere Reibung, die die Abweichung vom Hookeschen Gesetz charakterisiert (Gutenberg [8]), eingeführt. Die experimentellen Bestimmungen der Eigenschaften beziehen sich selbstverständlich nur auf die Bestandteile der obersten Schicht der Erdkruste, die Übertragung auf die inneren Schichten bringt eine weitere Unsicherheit hinein. Auch in den Zahlenangaben besteht keine Übereinstimmung. Es beträgt z. B. nach Gutenberg [8], S. 380, die Festigkeit der Oberflächenschicht 10^9 dyn./cm^2 , muß dann aber in der Tiefe 30 bis 40 km auf 10^7 dyn./cm^2 sinken, weil im entgegengesetzten Falle die Isostasie nicht erklärt werden kann; die innere Reibung hat den Wert $10^9 \text{ dyn.sec/cm}^2$ und steigt mit zunehmender Tiefe; die Konstante der Viskosität in der oberen Schicht ist von der Ordnung $10^{22} \text{ dyn.sec/cm}^2$ (nach Jeffreys, $3 \cdot 10^{25}$), im Kern aber von viel kleinerer (10^9).

Welcher Art das Fließen sein kann, ist aber für die allgemeine Theorie der Verschiebungen der Erdkrustenteile eine Frage von sekundärer Bedeutung. Die Vorgänge, wie z. B. die noch andauernde postglaziale Hebung Fennoskandiens, beweisen eine gewisse Fluidalität des Materials. Diese Fluidalität hat sich im Laufe der Zeit geändert und muß mit der Tiefe zunehmen. Man kann nicht auf Grund von Laboratoriumsversuchen die Möglichkeit der großen Verlagerungen der Krustenteile feststellen, sondern muß umgekehrt aus den tatsächlich in der Erdkruste stattgefundenen Vorgängen auf die dazu erforderlichen Eigenschaften des Materials schließen. Wir beschränken uns in dieser Frage noch mit einem Hinweis auf eine Theorie der Faltungs- und Schieferungsvorgänge, in der das Material der Erdkruste als ein elastisches mit einer Fließgrenze aufgefaßt ist (S. Kienow [14]).

Von größerer Bedeutung für unsere Überlegungen ist die Abschätzung der Größenordnung der von uns als Ursache bezeichneten Kräfte, d. h. des Boden- und Manteldruckes und der Reibung an dem in das Substratum eingetauchten Teil eines Kontinents. Auf die Möglichkeit, daß der hydrostatische Druck in der Erdkruste bei der Gebirgsbildung eine Rolle spielt, hat neuerdings A. Prey hingewiesen [26]. Zu diesem Zweck nimmt er nach der Airyschen Theorie der Isostasie einen Kontinent als eine elastische oder plastische im Substratum schwimmende Scholle an und behandelt die Frage als ein ebenes Problem. Beträgt die Dicke der Platte 33 km, so wird der Bodendruck 10.000 Atmosphären erreichen. Der Seitendruck nimmt dabei linear mit der Tiefe bis zu diesem Wert zu. Nimmt man noch die Existenz eines Ozeans bis zum oberen Band der Scholle an, so hängt im oberen Teil der Seitendruck nur von der Wasserschicht ab, tiefer auch von der Dicke der Schicht des Substratums. Durch diese Ungleichmäßigkeit des Druckes längs der Seitenflächen kommen große Scherungskräfte zustande. Die für eine elastische Scholle gewonnene Lösung der Differentialgleichungen wendet Prey auf eine plastische an. Dann ergibt sich, daß z. B. im Falle einer plastischen Sialscholle von 1000 km im Geviert, von einer Dicke von 33 km und von einem Viskositätskoeffizienten von der Größenordnung $10^{23} \text{ dyn.sec/cm}^2$ in der Mitte eine Erhebung, eine Insel von etwa 960 m Seehöhe und 385 km Radius entstehen kann. Nun ergibt diese

Lösung für größere Schollen und längere Zeiträume so große Zahlenwerte, daß die Deformation der Platte nicht mehr einer isostatischen Lagerung der Massen entsprechen würde. Die vereinfachte Problemstellung von Prey kann natürlich zu keiner Erklärung der Gesetzmäßigkeiten der Gebirgsbildung führen. Ihre Bedeutung liegt aber darin, daß man schon im hydrostatischen Druck des Substratums eine genügend große Kraft erkennt, deren Wirkung eine Verformung gewisser Krustenteile in dem erforderlichen Maße hervorrufen kann. Auf Grund dieser Ergebnisse können wir schließen, daß im Falle der zonalen Rotation an gewissen Teilen der Seitenflächen der Kontinente der hydrodynamische Druck, der den hydrostatischen übertrifft, tatsächlich eine Größenordnung erreicht, bei der in einigen Geosynklinalen, und zwar in den sich längs der Kontinentenränder erstreckenden, die Faltung stattfinden kann. Der hydrostatische Druck auf den Seitenflächen darf aber nicht als die einzig vorhandene Kraft angesehen werden, weil man sonst in diesem Falle die Entstehung der Faltungen parallel aller Kontinentenränder erwarten müßte, falls diese Ränder über dem Substratum liegen. Solche Falten sind aber nur an einigen Stellen vorhanden. Außerdem ist die Bildung des Himalaya sowie anderer Gebirge längs der Tethys auf eine andere Ursache zurückzuführen, wie bereits erörtert wurde.

Was aber die zweite, unserem Schema gemäß an der Trennfläche des Kontinents und des Substratums wirkende Kraft betrifft, so handelt es sich in Wirklichkeit nicht um die Reibung zwischen dem festen Sial und dem flüssigen Sima. Wir müssen den Vorgang so auffassen, daß die mehr fluidale unterströmende Schicht des Substratums an der untersten Sialschicht haftet. Diese, auch fluidale, Schicht wird also an dem zonalen Bewegungszustand teilnehmen und ihn in die oberen übertragen. Es muß im Zusammenhang mit dieser Auffassung noch ein Umstand klargemacht werden. Die Fluidalität der äußeren Schichten und einzelner Teile der Kontinente, bzw. des Substratums hat sich im Laufe der Zeit ständig geändert. Es war daher möglich, daß das Substratum früher viel fluidaler als der Kontinentalblock war. Dann würde es der Bodenfläche entlang fließen, ohne die anliegende Sialschicht merklich mitzunehmen. Mit der Abnahme der Fluidalität, d. h. Zunahme der inneren Reibung würde eine stärkere Scherkraft an der Trennfläche auftreten. Dann und erst dann würden die untersten Sialschichten in solchem Maße mitgezogen werden, daß auch die Fluidalität der Sialscholle zutage getreten wäre. Ein solches Verhalten läßt sich bei den Versuchen mit Pech als Substratum leicht feststellen. Falls das Pech genug erwärmt ist und leicht fließen kann, wird es unter der Gipsplatte fließen, ohne diese zu zerreißen. Erst dann, wenn seine Temperatur auf einen bestimmten Wert sinkt, entstehen die Risse.

Beim Unterströmen spielt also die Fluidalität des Substratums eine große Rolle. Griggs [5], S. 623, schätzt die beim pseudoviskosen Fließen der Gesteine an einem Kontinentrand hervorgerufene Druckkraft auf 750 kg/cm^2 . Diese Kraft würde von der Größenordnung der oben angeführten Festigkeitsgrenze sein.

Für eine genaue Bestimmung der Größenordnung der in der Erdkruste wirkenden Kräfte haben wir, wie erwähnt, nur wenige Anhaltspunkte. Wir können aber versuchen, diese Größenordnung wie folgt zu bestimmen. Für außerordentlich kleine Geschwindigkeiten und sehr zähe Flüssigkeiten ist der Gesamtwiderstand eines bewegten Körpers durch die Formel

$$W = \gamma \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

(L. Prandtl und O. Tietjens [23], S. 110) gegeben, wobei F die gesamte Spannfläche, ρ die Dichte der Flüssigkeit und v die relative Geschwindigkeit bedeutet und Proportionalitätsfaktor γ für diesen Fall der Reynoldsen Zahl ($R = \frac{v \cdot l}{\nu}$) umgekehrt proportional ist. Dabei

ist l die sogenannte charakteristische Länge und ν die kinematische Zähigkeit ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$).

Setzen wir probeweise $\gamma = \frac{\nu}{v \cdot l} = \frac{1}{R}$, dann wird der Widerstand pro Flächeneinheit ($\frac{W}{F}$) von

darin, daß er alle Erscheinungen, die sich mit diesen Vorgängen in Zusammenhang bringen lassen, im Rahmen einer Theorie zu erklären versucht hat. Zunächst, wenn man die Existenz eines Urkontinents voraussetzt, sind offenbar die geographischen Homologien erklärt. Der Zerfall des Urkontinents hat nach Wegener in der Kreidezeit durch die Bildung der Atlantischen Spalte begonnen, die sich vom Süden nach Norden ausbreitete. Dies sollte sich noch im Tertiär, sogar im Quartär fortgesetzt haben und durch andere Spalten wurden Afrika, Australien und Antarktis abgetrennt. Die Kontinente müssen sich, der Wegenerschen Theorie gemäß, nach Westen verschieben, und zwar Amerika am schnellsten. Die Bewegung von Amerika sollte dann die Bildung der Kordillere erklären, denn diese Faltung sollte durch den vom ruhenden Sima auf den fortschreitenden Sialblock ausgeübten Stirnwiderstand hervorgerufen werden. Andererseits sollten die Kontinente, der Wirkung der sogenannten Polfluchtkraft folgend, eine Tendenz erlangt haben, sich dem Äquator zu nähern. Zur Unterstützung dieser Auffassung sowie der Annahme der großen Polwanderungen hat Wegener mehrere Tatsachen aus den Gebieten der Geophysik, Geologie, Geodäsie und Paläoklimatologie angeführt. Wir können nicht beurteilen, in welchem Maß alle diese Erscheinungen zugunsten seiner Auffassung sprechen und beschränken uns nur auf die den Mechanismus selbst betreffenden Fragen. Zu diesen gehören auch die Polwanderungen und die Transgressionen und die Regressionen.

Nach der Krustenverschiebungshypothese von Reichgauer sollte sich die feste Rinde als Ganzes über den Erdkern in beliebigen Richtungen verschieben. Setzt man voraus, daß infolge der Existenz der kontinentalen und ozeanischen Krustenteile, d. h. infolge einer unsymmetrischen Massenverteilung die Anziehungs- und Zentrifugalkräfte ein resultierendes Drehmoment, das nicht mit der Drehachse der Erde kollinear ist, erzeugen und daß der Reibungswiderstand an der inneren Fläche der Kruste durch die Wirkung dieses Drehmoments überwunden werden kann, so folgt auch die Möglichkeit einer solchen Verschiebung. Dazu muß also die an die Kruste grenzende Schicht des Substratums einen entsprechenden kleinen Grad der Zähigkeit besitzen. Solche große Verschiebungen werden nicht nur dann eintreten können, wenn die Kruste von innen durch eine Kugelfläche begrenzt oder deformierbar ist, wie manchmal behauptet wird, sondern immer, wenn der Kern fluidal ist. Hat die innere Fläche der Kruste eine unregelmäßige Form, so werden bei einer Gesamtkrustenverschiebung auch die in die Unregelmäßigkeiten dieser Fläche vorgedrungenen Teile der flüssigen Masse mitgezogen. In der Frage der Polwanderungen hat Wegener ein großes Gewicht auf die Kontinentalverschiebungen gelegt und zur Erklärung der Transgressionen die Deformation des ganzen Erdkörpers angenommen. Die auf Grund geologischer Angaben für verschiedene Zeitalter rekonstruierten Lagen der Pole und des Äquators (Fig. 7) lassen sich nach Wegener am besten erklären, falls man sich ein aus den gegenwärtigen Kontinenten zusammengesetztes Urkontinent denkt. Dadurch vereinfacht sich z. B. die Frage der permokarbonischen Vereisung, die im entgegengesetzten Fall eine unwahrscheinlich große südliche Polarkappe gebildet haben sollte. Werden alle Kontinente der südlichen Halbkugel zusammengeschoben, so werden auch die Dimensionen dieser Polarkappe mit den in den anderen Zeitaltern angenommenen übereinstimmen.

Wie erwähnt, wurde die Wegenersche Theorie von verschiedenen Seiten einer Kritik unterworfen und wir müssen auf eine Reihe von Einwänden Rücksicht nehmen. Von den Zusammenstellungen dieser Einwände ziehen wir hauptsächlich diejenigen von F. Nölke [21] und J. Ruud [28] in Betracht.

1. Die Wegenersche Annahme einer paläozoischen Pangäa scheint nicht genügend begründet zu sein, da gegen seine empirische Beweisführung Einwände erhoben werden können.

Die Entstehung eines Urkontinents ist aber im Falle der zonalen Rotation der Erde keine vom mechanischen Standpunkt willkürliche Annahme, sondern eine natürliche Konsequenz, die außerdem durch mehrere andere Erscheinungen unterstützt werden kann. Dieser Einwand betrifft also nicht den oben dargelegten Mechanismus der Krustenbildung auf einem

Planeten. Ob die Bildung eines Urkontinents auf der Erde tatsächlich stattgefunden hat, muß auf Grund aller bekannten Tatsachen entschieden werden.

2. Trotz aller Versuche ist es nicht gelungen, die Kräfte zu finden, welche die Vorgänge in der Erdkruste im Sinne der Wegenerschen Auffassung erklären könnten. Erstens hat er in seiner Theorie keine Kräfte angegeben, welche die Zerspaltung des Urkontinents hätten verursachen können. Zweitens, die vermutete „Westdrift“ der Kontinentalschollen sollte durch die Gezeitenkräfte hervorgerufen werden. Diese Kräfte wirken bekanntlich in der Westrichtung, besitzen aber einen viel zu kleinen Betrag, um die Verschiebung zu verursachen ($4 \times 10^{-5} \text{ kg/cm}^2$. Vgl. mit oben angeführten). Da außerdem ihre Resultierende um so größer wird, je größer der äquatoriale Teil eines Kontinents ist, so folgt, daß die Alte Welt Amerika allmählich hätte einholen müssen (falls die beiden von früher her sich in einem gewissen Abstand befunden haben). Infolgedessen sind die Gezeitenkräfte nicht imstande, Amerika eine größere Westdrift zu erteilen. Die Rolle der Unterströmungen irgendwelcher Natur, die herangezogen worden sind, um die Westdrift Amerikas zu erklären, z. B. der durch die Anomalien im Rotationsellipsoid hervorgerufenen Unterströmungen, ist in keiner bestimmten Form erklärt worden. Auch die Theorie der Präzession hat in dieser Frage zu keinem positiven Ergebnis geführt. Schließlich hat die sogenannte Polfluchtkraft, wie erwähnt, einen viel zu kleinen Betrag. Abgesehen davon, daß man bezweifeln kann, daß durch ihre Wirkung einzelne Teile der festen Erdkruste tatsächlich relative Lagenänderungen erleiden können, darf man nicht außer acht lassen, daß die Ableitung dieser Kraft auf stark vereinfachten Annahmen beruht. Die Existenz der Polfluchtkraft wird aus der Tatsache gefolgert, daß der Schwerpunkt eines schwimmenden Kontinents über demjenigen des verdrängten Sima liegen muß. Man berücksichtigt dabei aber nicht, daß, wenn eine isostatische Lagerung der Massen auf einer Seite des Erdkörpers eingetreten ist, auch auf der entgegengesetzten Deformationen stattfinden müssen. Unter Umständen könnte vielleicht die Polfluchtkraft sogar ihre Richtung ändern, denn es wurde nie bewiesen, daß bei kleinen Abweichungen von der Kugelsymmetrie die Niveaulächen an allen Stellen gegen den Äquator divergent sein werden. Die aus der isostatischen Massenlagerung folgende Resultierende für die ganze Erdfläche kann aber bei dem Vorgang der Krustenverschiebung eine Rolle spielen.

Durch die Hypothese der zonalen Rotation ist die Frage der Kräfte in dem Bewegungsmechanismus der Erdkruste geklärt. Das oben ins Auge gefaßte Kraftfeld ist imstande, den durch die Gestalt und Verteilung der Großformen der Erdoberfläche bestimmten Gesetzmäßigkeiten Rechnung zu tragen, was wir schon ausführlich auseinandergesetzt haben.

3. Auch zur Gebirgsbildung erforderliche Kräfte fehlen eigentlich in der Wegenerschen Theorie. Der Stirnwiderstand des Sima an der Westküste von Amerika kommt aus zwei Gründen nicht in Frage. Erstens sollten die festen Sialblöcke sich in dem zähen Sima den Weg bahnen, wobei das Sima dem kleinsten Druck nachgibt und seitlich ausweicht; die Falten aber sollen nicht im Sima, sondern sich, entgegen der Erwartung, in dem festeren Sial bilden. Zweitens muß die Frage gestellt werden, warum keine den Kordilleren ähnliche Faltungen an den Rändern der anderen Kontinente vorhanden sind, falls sie auch wie Eisberge schwimmen. Die Faltungen an dem Ostrande Australiens zeigen, daß dieser Kontinent nicht an der allgemeinen Westdrift teilgenommen hat. Zusätzlich wird bemerkt, daß die ältere pazifische Simaschicht dem Vordringen Amerikas einen größeren Widerstand geleistet haben mußte als die jüngere atlantische. Dies bezieht sich besonders auf die Westküste von Afrika, wo keine Gebirgsketten in meridionaler Richtung entstanden sind. Hieraus würde es wieder folgen, daß sich Amerika langsamer gegen Westen als die Alte Welt verschoben hat.

Wie im § 6 festgestellt worden ist, entfallen alle diese Einwände, sobald man sich die Vorgänge nach dem Mechanismus der zonalen Rotation vorstellt.

4. Wegener ist auch vorgeworfen worden, daß er tektogenetisch gleiche tertiäre Gebirge, wie Kordilleren, Himalaya und Alpen, sich durch drei verschiedene Ursachen entstanden denkt.

Dieser Einwand erledigt sich von selbst, wenn man unsere Theorie berücksichtigt. Der zur Gebirgsbildung nötige horizontale Druck verdankt seine Herkunft tatsächlich drei verschiedenen Umständen: 1. dem Einströmen des Substratums an der Westküste Amerikas und der darauf folgenden Drehung seiner beiden Teile; 2. dem Hineinpressen des indischen Schildes durch die rascher strömende äquatoriale Zone des Simas und 3. der entgegengesetzten Drehung Afrikas und Eurasiens.

5. Warum die Westküste der Alten Welt oder von Grönland nicht in Falten zusammengestaucht ist, folgt unmittelbar aus unserem Schema. Während Amerika durch den Druck des unterströmenden Simas oder später durch die Drehung an dem Westrand gefaltet werden muß, verschiebt sich die Alte Welt gegen Osten ohne Druck an der Westseite und überhaupt ohne irgendwelchen Widerstand in dem oberen Teil ihrer Mantelfläche (der Nordostrand vielleicht ausgeschlossen), da die sich zwischen der Alten Welt und Amerika, bzw. Australien ausdehnende Sialdecke des Ozeanbodens keinen Druck ausübt.

6. Ein gewisser Widerspruch in der Wegenerschen Auffassung, nach der das Sima in der Atlantischen Spalte emporgewölbt ist und nach beiden Seiten auseinanderfließt, obwohl anderseits das Schwimmen der Kontinente auf dem ruhenden Sima sich vollziehen muß, da man anders das Zurückbleiben der Inseln im Atlantischen Ozean nicht verstehen kann, gibt F. Nölke den Anlaß, folgenden Schluß zu ziehen. Die Erdteile der Alten Welt wären nach Osten gewandert und die ostasiatischen Inselgürlanden wären nicht durch Zerrung, sondern durch Stauchung entstanden. Wie sich die Ostbewegung Eurasiens mit einer Zerrung an ihrem Ostrand auf Grund der Hypothese der zonalen Rotation in Einklang bringen läßt, haben wir bereits dargelegt.

7. Die Gebirge in Westamerika sind das Ergebnis einer Reihe von langen und komplizierten Prozessen, die teilweise noch in Perm stattgefunden haben mußten. Die von Wegener angeführten Ursachen mußten aber im Tertiär wirksam gewesen sein, denn die Atlantische Spalte fängt erst an sich in der Kreidezeit zu bilden. Unserem Schema gemäß wirkt der Druck des unterströmenden Sima auf den Urkontinent im Laufe der ganzen Erdgeschichte, so daß gewisse Faltungen am Westrand Amerikas schon in den ersten geologischen Zeitaltern entstanden sein könnten.

Daß die letzte Kordillerenfaltung etwas früher erfolgt ist als die Alpenfaltung steht auch im Einklang mit der Hypothese der zonalen Rotation.

Es wird weiter behauptet, daß die Gebirgsbildung nach Wegener ein kontinuierlicher Vorgang sein mußte, da es beständig wirkende Kräfte sind, die die Erdteile zu verschieben vermochten. Warum aber die orogenen Kräfte nur in gewissen geologischen Zeitaltern wirksam waren, folgt unmittelbar aus dem oben dargelegten Bewegungsmechanismus, der für einzelne Stellen (Geosynklinalen) das gleichzeitige Zusammentreffen verschiedener Bedingungen fordert. Dadurch sind aber selbstverständlich die Phasen in einem Zeitalter nicht erklärt. Die Gebirgsbildung an einer Stelle in kürzeren, aufeinanderfolgenden Zeitintervallen verlangt also, wie erwähnt, noch eine Erklärung. Man könnte (vgl. Griggs [5]), annehmen, daß nach jeder Phase eine Entspannung erfolgt und dann wieder durch die fortschreitende Bewegung des Substratums eine Zunahme der Spannungen im Kontinent entsteht. Es kommen also die Eigenschaften des Materials, d. h. die Art des Fließens, das bei den Gesteinen in Paroxysmen erfolgen soll, in Betracht.

8. Zu dem Einwand allgemeiner Art, daß mit Ausnahme von Südamerika keine geographischen Homologien vollständig sind, läßt sich bekanntlich nur bemerken, daß eine vollkommene Ähnlichkeit bei der Kompliziertheit der Vorgänge und hunderte Millionen von Jahren umfassenden Zeitintervallen kaum zu erwarten ist. Desto mehr überzeugend ist z. B. die Gestalt und Lage Arabiens zwischen Afrika und Asien, da man in diesem Gebiet einen deutlichen Hinweis auf die Drehung der beiden großen Kontinente im entgegengesetzten Sinne besitzt.

9. Eine genauere Übereinstimmung der Küsten der zusammengeschobenen Alten und Neuen Welt kann vermutlich nicht erreicht werden, denn man muß einen gewissen Spielraum für den Atlantischen Rücken freilassen. Gegen die Wegenersche Vorstellung des Schwimmens der Kontinentalschollen hat Gutenberg noch einen Einwand erhoben, der sich auf die geringere Fortpflanzungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen unter dem Atlantik stützt. Aus dieser Geschwindigkeit folgt nämlich, daß der Boden des Atlantischen Ozeans eher von einer Sialschicht gebildet ist. Der 20.300 *km* lange Atlantische Rücken beginnt mit Island, halbiert den Abstand zwischen der Alten und Neuen Welt und läuft parallel mit der südatlantischen Küste von Afrika. Nach Ansicht von Kümme[18] entsprach der Rücken zu einer bestimmten Zeit dem Umriß der Neuen Welt. Daly und Molen-graff nehmen an, daß die Bruchränder Afrikas und Amerikas am Orte des Atlantischen Rückens zusammenhängen. Er sollte dann einen Saum verlorener Brocken von Festlands-material darstellen, was aber Kümme[18] als unwahrscheinlich betrachtet. Seine Erklärung besteht darin, daß der Rücken, der kein durch Faltung entstandenes Gebirge sein kann, aus von Kontinenten gelieferten Sedimenten aufgebaut war. Trotz der seismologischen Angaben kehrt Kümme[18] zur ursprünglichen Wegenerschen Auffassung des Schwimmens der Kontinente zurück.

Der auf Grund der Hypothese der zonalen Rotation aufgestellte Bewegungsmechanismus läßt sich beiden Fällen anpassen. Sie wird nicht von der Tatsache, daß der Boden des Atlantischen Ozeans nicht ganz, sondern nur teilweise mit Sial bedeckt ist, betroffen. Wie aber die Experimente an unserem Modell zeigen (§ 5), ist es durchaus möglich, daß auf einer auseinandergezogenen unteren Schicht ein fester Streifen, der vorher vom Kontinentrand abgetrennt war, stehen bleibt.

10. Es ist schon darauf hingewiesen worden, daß es weder theoretische noch experimentelle Gründe zur Annahme eines sehr kleinen Fließwiderstandes der Oberflächenmassen bei langsamen Bewegungen gibt. Durch diese Annahme wird auch das Auftreten des Stirnwiderstandes bei den Kontinentenverschiebungen betroffen. Die permanente Existenz der Gebirge bei einer isostatischen Lagerung der Massen beweist, daß diese während langer Zeiten keine großen Deformationen erfahren haben könnten, sogar im Falle der Wirkung großer Kräfte. Diese Überlegung gilt selbstverständlich für jede Theorie der Gebirgsbildung. In unserem Schema entfällt aber die Frage eines Stirnwiderstandes, denn die Kontinente sind von den unteren Sialschichten, bzw. von dem anliegenden Substratum getragen und die für die Faltung erforderlichen horizontalen Drucke übt entweder die Strömung des Substratums oder die Kontinenteile selber aufeinander aus. Wie oben erwähnt, kann dieser Druck der Größenordnung nach den durch das Gewicht der Gebirge hervorgerufenen weit übertreffen. Die Voraussetzung eines kleinen Fließwiderstandes ist überhaupt für unsere Hypothese überflüssig.

11. Eines der wichtigsten Argumente Wegeners für die Existenz eines Urkontinents, nämlich die permokarbonische Vereisung, haben einige Forscher (Salomon-Calvi, Born, Koßmat, Nölke) von einem anderen Standpunkt zu erklären versucht. Für jede Theorie spielt dieses Argument keine entscheidende Rolle, so daß, wenn es fortgelassen wird, die zahlreichen anderen Vorgänge doch zugunsten unseres Schemas sprechen würden. Es ist ein Vorteil, wenn man keine zusätzliche Hypothesen einführt und den Wegenerschen Standpunkt annimmt. Im entgegengesetzten Fall aber verliert man eine natürliche Erklärung.

12. Die Frage der Polwanderungen und diesbezügliche Einwände wollen wir später analysieren.

Alle zugunsten der Wegenerschen Theorie sprechenden Tatsachen aus dem Gebiet der Geologie, Tier- oder Pflanzengeographie usw. widersprechen in keiner Weise der neuen Auffassung des Bewegungsmechanismus der Erdkruste. Was die zeitliche Reihung der Vorgänge in der Kruste anbelangt, so muß diese ausschließlich auf Grund der geologischen Angaben durchgeführt werden.

Die Kontinentverschiebung soll nach Wegener auch in der Gegenwart andauern, wofür er einen Beweis aus den Längenmessungen von Grönland zu erhalten geglaubt hat. Die Ergebnisse dieser Messungen sind aber nicht eindeutig, so daß man aus ihnen noch nicht mit Sicherheit das Verhalten der Erdkruste feststellen kann. Aus den Untersuchungen von Stoyko [32] folgt eine Periodizität in den Längendifferenzen, die sich vermutlich durch elastische Schwingungen des ganzen Erdkörpers erklären läßt. Aus neuen 20jährigen Beobachtungen läßt sich aber auch eine säkulare Änderung der Längendifferenzen und zwar Washington—Paris: 36 *cm*/Jahr, Paris—Tokyo: 171 *cm*/Jahr (Stoyko [32]) ableiten. Dieser Frage müssen offenbar noch langjährige Beobachtungen gewidmet werden, und zwar mit einem planmäßig verteilten Netz von Stationen auf der ganzen Erdoberfläche. Aber auch wenn gegenwärtig keine säkularen Verschiebungen der Krustenteile existieren sollten, so kann dieser Umstand natürlich nicht als ein Argument gegen die Gültigkeit der oben dargelegten Vorstellung über die Entwicklung der Erdkruste angesehen werden.

Um einige von den Schwierigkeiten, auf die die Wegenersche Auffassung gestoßen ist, zu beseitigen, hat B. Gutenberg [6] die sogenannte Fließtheorie vorgeschlagen. Wie erwähnt, hat ihm die Struktur des Atlantischen Ozeanbodens den Anlaß gegeben, die Vorstellung des Driftens der Kontinente fallen zu lassen und durch eine Hypothese zu ersetzen, nach der die ursprüngliche Sialmasse, der Urkontinent auf der Erdoberfläche auseinanderfließt. Es ist wahrscheinlich, daß diese Vorstellung über das Verhalten der unteren Sialschichten einen weiteren Schritt in der Auffassung der Vorgänge in der Erdkruste bedeutet. Die Frage der Kräfte, die ein Auseinanderfließen des Urkontinents hervorrufen könnten, läßt aber Gutenberg offen [7], da es seit seiner ersten Abhandlung, in welcher radial wirkende Fließkräfte vorausgesetzt wurden, keinen Grund dafür zu finden gelungen ist. Von dem Gedanken von W. Green, daß die Bildung der Großformen der Erdkruste zu jener Zeit stattgefunden hat, wo diese noch plastisch war, dem Gedanken also, der in der Fließtheorie seine weitere Entwicklung erhielt, haben wir schon bei der letzten Formulierung des Bewegungsmechanismus Rechnung getragen. In der Gutenbergschen Fließtheorie ist wie in der Wegenerschen die isostatische Massenlagerung vorausgesetzt worden und diese Theorie hat alle Vorteile, die die Wegenersche Annahme eines Urkontinents liefert, beibehalten. Die rein kinematische Darstellung der Vorgänge nach dieser Theorie gibt aber keine Möglichkeit, die bekannten Gesetzmäßigkeiten der Gebirgsbildung klarzumachen.

Von den verschiedenen Hypothesen, die zur Erklärung der geologischen Verhältnisse aufgestellt werden können, hat neuerdings Vening-Meinesz [34] jene als beste bezeichnet, gemäß welcher in den plastischen tieferen Schichten Strömungen vorhanden sind. Die Entstehung solcher Strömungen versucht er durch Temperaturunterschiede zu begründen.

Wir wollen jetzt den Standpunkt der Unterströmungstheorien mit dem unseren in Zusammenhang bringen. Unserer Auffassung gemäß erfolgen die Unterströmungen im Substratum nach dem Gesetz der zonalen Rotation, womit ein vom mechanischen Standpunkt vollkommen bestimmter Bewegungszustand definiert ist. Die früher ausschließlich zur Erklärung der Orogenese aufgestellten Unterströmungstheorien leiden alle an der Unbestimmtheit, denn in keiner von diesen läßt sich mit Sicherheit ein Grund dafür feststellen, daß die Strömungen tatsächlich in den Teilen der Erdkruste entstehen müssen, wo sie gewünscht werden. Infolgedessen ändern sich in dieser Gruppe von Theorien die Vorstellungen über die Strömungsgebilde, stets aber ohne eine den Tatsachen entsprechende Formulierung des Strömungsgesetzes. Unterströmungen sollen nach O. Fischer, O. Ampferer und R. Schwinner [29] als thermische Konvektionsströmungen im Magma auftreten. Will man die Bildung der Faltungsgebirge mit diesen in Verbindung bringen, so muß man annehmen, daß die am Rande eines Kontinents absteigende Strömung den Küstenstreifen staut und faltet. Damit ist aber nach Schwinner l. c. S. 146 die Gebirgsbildung noch nicht beendet, denn es folgt eine nachträgliche Hebung der gefalteten Schichten, wofür z. B. der Aufbau der Alpen spricht. Der ganze Kreislauf der Strömungen würde sich dabei in den

das Auftreten der orogenen und anderen Vorgänge in der Erdkruste, ist aber allein nicht imstande, irgendwelche Gesetzmäßigkeiten vorherzusagen.

Wir wollen uns schließlich noch mit der Frage des Zusammenhanges der Großformen der Erdoberfläche mit der Theorie der Mondablösung befassen. Diese von mehreren Geologen und Geophysikern bevorzugte Erklärung der Entstehung der Kontinente und Ozeane betrachtet z. B. auch K. Wegener [39] als die am besten zur Unterstützung der A. Wegenerschen Theorie geeignete. Die Entstehung des Erdmondes stellt aber noch ein ungelöstes Problem dar. Da sich in dieser Frage keine strenge mathematische Analyse durchführen läßt, bleibt noch jede Mondtheorie einer sicheren Grundlage entzogen. Die Behauptungen, daß das System Erde-Mond als solches entstanden ist sowie auch, daß sich der Mond später von der Erde losgelöst hat, können nur als bloße Hypothesen ausgesprochen werden. Als Liapounoff und Poincaré die Existenz der sich wenig von den Maclaurinschen und Jacobischen Ellipsoiden unterscheidenden Gleichgewichtsfiguren einer rotierenden homogenen flüssigen Masse bewiesen haben, wurde einer von diesen Figuren eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Nach der ersten Berechnung der Gestalt dieser sogenannten Poincaréschen birnenförmigen Figur sollte es eine Abschnürung geben und wenn vorausgesetzt wird, daß diese Abschnürung im Laufe der Zeit immer enger wird, so könnten zwei getrennte Massen entstehen. Es wird aber unmöglich mit dieser Begründung eine derartige Evolution eines Himmelskörpers anzunehmen, denn diese Poincarésche Figur ist nicht einer Birne, sondern einem Ei ähnlich. P. Humbert [10] hat bewiesen, daß ein Meridian dieser Figur keine Wendepunkte besitzt, so daß von irgendwelcher Abschnürung keine Rede sein kann, sogar dann, wenn sich die Figur nicht nur unendlich wenig von einem Ellipsoid unterscheidet. Es muß also für die eiförmige oder ovoide Gleichgewichtsfigur die irreführende Bezeichnung „birnenförmige“ endgültig verlassen werden. Andererseits ist diese Figur, wie es Liapounoff festgestellt hat, eine instabile und somit ist nicht nur eine Evolution, sondern auch ihre Existenz in Wirklichkeit unwahrscheinlich. Man darf also nicht die Mondablösung mit der Theorie der Gleichgewichtsfiguren begründen. Wenn auch mit wachsendem Drehimpuls ein Jacobisches Ellipsoid zerfiele, so bleibt es vollkommen ungeklärt, wie das geschieht und ob ein dem Erde-Mond-System ähnliches entstehen kann. Allerdings hat schon Poincaré gewarnt, irgendwelche Schlüsse über einen heterogenen Planeten aus den Ergebnissen der Theorie der homogenen Gleichgewichtsfiguren zu ziehen. Um der Lösung des Problems der Mondablösung näherzukommen, hat Darwin die Vermutung ausgesprochen, daß der Zerfall der ursprünglichen Erdmasse in zwei Teile durch die Gezeiten hervorgerufen sein könnte. Man nimmt nun an, daß, falls die Periode der Eigenschwingungen der flüssigen Erde gleich derjenigen der infolge der Anziehung der Sonne verlaufenden Gezeiten wäre, durch die Resonanz so eine riesige Gezeitenwelle entstehen müßte, daß die Erde in zwei Teile zerfallen würde. Mathematisch kann auch dieser Vorgang nicht einmal in einer ganz primitiven Annäherung untersucht werden. Ob dabei die noch flüssige Masse in zwei oder mehrere Teile zerfallen würde, bleibt unklar, abgesehen noch davon, daß das gegenwärtige Rotationsmoment des Systems Erde-Mond viel kleiner ist als das für den Zerfall erforderliche.

Trotz aller dieser theoretischen Schwierigkeiten wird dieser Hypothese besonders in der geologischen Literatur eine große Wahrscheinlichkeit zugeschrieben. Nach O. Fischer und W. Pickering ist es sogar möglich, in der Erdkruste die Stelle nachzuweisen, von der die Mondmasse sich losgelöst hat. Wenn man Amerika mit Afrika und Europa zusammenschiebt, so ergibt sich ein Ozeanbecken, und die Masse des hier fehlenden Rindenstückes von der Dicke 73.6 km (nach der Korrektur von H. Ebert [3]) würde der Mondmasse gleichkommen. Man geht aber noch einen Schritt weiter und nimmt an, daß die abgetrennte Masse ein Teil der schon erstarrten Kruste war (vgl. W. Bowie [2]); die übrig gebliebenen Kontinentalschollen sollten so dick und fest sein, daß sie imstande waren, diese Katastrophe zu überleben. Wir erwähnen nur einen Einwand gegen diese Auffassung. Der geschilderte Vorgang ist wenig wahrscheinlich, nicht nur aus dem Grunde, daß er sich nicht mit der Theorie

aufgestellten Bewegungsmechanismus der Kruste die Drehachse des Kerns mit der Achse der inneren zonalen Strömungen zu identifizieren. Wäre die Erdkruste starr und von innen durch eine Rotationsfläche begrenzt und befolgten die inneren Strömungen nach das Rotationsgesetz $w = w(s^2)$, so könnten diese Strömungen keine Polwanderungen verursachen. Die Reibung an der inneren Krustenfläche hätte nur die Periode der sich um dieselbe Achse umdrehenden Erdkruste beeinflußt. Dieser ideale Fall muß von vornherein ausgeschlossen werden, da auch andere Faktoren ins Spiel treten. Als die Polschwankungen entdeckt wurden, hat man mehrere Mechanismen untersucht, darunter auch die Bewegung eines starren Körpers, der mit Flüssigkeiten gefüllte Hohlräume besitzt. Man hat mit Rücksicht auf die Periodizität der Polschwankungen in erster Linie die periodischen Lösungen dieses Problems gesucht. Daß in einem Körper, in dessen Inneren zyklische Bewegungen stattfinden, auch beträchtliche Achsenverlagerungen auftreten können, hat V. Volterra [36] bewiesen.

Das Problem der Polwanderungen auf der Erdoberfläche infolge der Achsenverlagerung im ganzen Erdkörper wurde auch von einem anderen Standpunkt behandelt. G. H. Darwin hat versucht, die Erde als einen sich sehr langsam und wenig deformierbaren Körper, in dem die Drehachse nicht mit einer Hauptträgheitsachse zusammenfällt, aufzufassen. Dies wäre der Fall, wenn in der oberen Schicht ein größerer Massentransport, wie z. B. die Entstehung oder Hebung eines Kontinents, Bildung einer Eiskappe usw., stattfände. Mit Hilfe der Annahme der stetigen Anpassung der Erde an jene Gleichgewichtsfigur, die durch eine neue Lage der Drehachse bestimmt sein würde, hat Darwin den Schluß ziehen können, daß in den geologischen Zeiten eine säkulare Achsenverlagerung im Erdkörper möglich war.

Es kommt noch eine dritte Art der Polverlagerungen in Betracht, die infolge der Kontinentverschiebungen auftritt. Da es sich in diesem Fall nicht um eine Gesamtkrustendrehung handelt, müssen im allgemeinen die Polverlagerungen für jeden Kontinent verschieden ausfallen. Wegener nimmt eine westwärts gerichtete Wanderung, die durch die Gezeitenkräfte und Präzession hervorgerufen werden soll, und eine unter der Wirkung der Polfluchtkraft zum Äquator gerichtete Bewegung der Krustenteile an. Die Möglichkeit einer Gesamtkrustendrehung um eine von der Rotationsachse der Erde verschiedene Achse lehnt er ab und bevorzugt die allgemeinen Äußerungen von Lord Kelvin, Schiaparelli und Rudzki über die Wahrscheinlichkeit von großen Achsenverlagerungen im Erdkörper. Alle Polwanderungen, die durch partielle Kontinentverschiebungen entstehen sollten, sind noch nicht von der Größe und Richtung der von der Paläoklimatologie geforderten. Nach Köppen und Wegener lag der Nordpol der Erde im Karbon im Pazifischen Ozean (geographische Breite 30° N, Länge 150° W) und hat sich nachher über den Pazifik, den nordwestlichen Teil Amerikas gegen die gegenwärtige Lage bewegt. Im Tertiär war die Bewegung schneller und komplizierter als in anderen Zeitaltern. Nach Kreichgauer beginnt die Bahnkurve des Nordpols sogar in der Antarktis und verläuft über den Pazifischen Ozean in der meridionalen Richtung, so daß die Gesamtdrehung der Erdkruste, wenn man noch die Zeitalter vor Karbon ins Auge faßt, fast 180° beträgt.

Man muß also nicht in den Kontinentverschiebungen, sondern in der Achsenverlagerung und in einer Krustenbewegung, die durch einen anderen Umstand verursacht sein kann, die Lösung der Frage der Polwanderungen suchen. Das genau formulierte Problem der Achsenverlagerung würde lauten: inwiefern kann sich die Drehachse eines dem deformierbaren materiellen System äquivalenten starren Körpers in diesem System und im Raume verlagern? Dabei ist noch zu beachten, daß der äquivalente starre Körper nur für jeden einzelnen Moment definiert ist, also sich auch mit der Zeit ändert. Dieses Problem ist noch nicht gelöst.

Der Bestimmung der Polwanderungen sind neuerdings die Untersuchungen von M. Milankovitch [20] gewidmet. Zur Feststellung der Polbahn nimmt Milankovitch die gegenwärtige Massenverteilung in der Erdkruste und die Lage des Nordpols im Karbon an (20° N, 168° W). Da nach Milankovitch diese Lage einem labilen Gleichgewicht der

Erdkruste entsprochen hat, bewegte sich der Nordpol über die nordwestliche Spitze Amerikas zur gegenwärtigen Lage und wird sich mit ständig abnehmender Geschwindigkeit dem Endpunkt der Polbahnkurve nähern, der nicht weit von der Petschoramündung entfernt ist ($65^{\circ} 16' N$, $49^{\circ} 34' O$).

Diese auf Grund einer statischen Betrachtung gewonnenen Ergebnisse wurden durch die Untersuchungen von A. Bilimovitch [1] über die Bewegung einer starren sphärischen Schale, die auf einem ebenso starren Kern gleiten kann, unterstützt. Es zeigt sich die Tendenz dieser Schale, sich am Anfang der Bewegung in dem von Milankovitch vorgesehenen Sinne zu verschieben. Unter anderen Voraussetzungen gelangt aber A. Prey [24] zu einem Ergebnis, das im Gegensatz zu demjenigen von Milankovitch steht. Es ergeben sich auch in diesem Falle große Polverschiebungen, aber in der umgekehrten Richtung und von einer kurzen Periode (9000 Jahre). Der wichtigste Unterschied liegt darin, daß die Lösung von Milankovitch eine aperiodische ist. Die von Milankovitch als eine ungestört bezeichnete Bahn gibt die Ergebnisse der Untersuchungen von Köppen und Wegener wieder bis auf die Abweichungen im Permokarbon und Tertiär. In den Zeiten des stark aktiven Orogens sind Schlingen in der geologisch festgestellten Bahn vorhanden (W. Köppen [17]). Man kann die Berechnung der Polbahnkurve auch auf Grund der Wegenerschen Karte mit einem Urkontinent durchführen (vgl. W. Jardeitzky [11]). Es zeigt sich dann kein wesentlicher Unterschied im Verlauf der Polbahn, trotz einer anderen Massenverteilung. Daraus können wir schließen, daß die Kontinentverschiebungen nicht die Hauptrolle in den Polwanderungen spielen konnten. Sie haben wahrscheinlich nur einige nicht allzu große Störungen hervorgerufen. Man beobachtet sogar in der Gegenwart momentane Änderungen der Polbewegung, die mit den infolge der Erdbeben auftretenden Änderungen der Deviationsmomente verknüpft zu sein scheinen. Im Vergleich mit der Gebirgsbildung oder Kontinentverschiebung können die jetzt wirkenden Ursachen nur einen ganz geringen Einfluß auf die Polbewegungen haben.

Aus diesen Darlegungen folgt, daß die Frage der Polwanderungen noch als ein dynamisches Problem in Angriff genommen werden muß. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen aber schon, daß der zonale Charakter der inneren Bewegungen im Erdkörper, der die Verschiebungen einiger Krustenteile verursachen konnte, nur eine sekundäre Rolle in der Bewegung der ganzen Erdkruste hätte spielen können. In den ersten Zeitaltern konnte der Einfluß der zonalen Rotation stärker zum Ausdruck kommen. Die Reibung und der Druck an der benetzten Fläche könnten ein Drehmoment mit einer beträchtlichen Komponente in der Äquatorebene erzeugen. Der Grund der Gesamtkrustendrehung soll doch hauptsächlich darin liegen, daß infolge einer asymmetrischen Verteilung der isostatisch lagernden Massen in der Erdkruste ein Drehmoment entsteht, das eine Komponente in der Äquatorebene besitzt. Ihrer Wirkung zufolge gleitet die Erdkruste über den Kern dann, wenn der Aggregatzustand der Unterlage eine solche Bewegung zuläßt. Da aber eine Fluidalität des Substratums in einer bestimmten Tiefe zu erwarten ist, so ist dieser Vorgang auch sehr wahrscheinlich. Die Frage, wie sich dabei die Drehachse des der ganzen Erde äquivalenten starren Körpers im Erdkörper selbst verlagern wird, benötigt aber, wie erwähnt, noch eine eingehende Betrachtung.

Die Lagenänderungen der noch verhältnismäßig dünnen Erdkruste in bezug auf das fluidale Substratum hätten einen beträchtlichen Einfluß auf die Gebirgsbildung haben können. Durch die Verschiebung des Urkontinents, bzw. einzelner Urkontinente, die mit der Gesamtdrehung der Kruste erfolgt ist, würde seine relative Lage in bezug auf verschiedene Zonen des Substratums geändert. Dadurch konnten in neuen Gebieten für eine Faltung günstige Bedingungen auftreten. Betrachten wir z. B. die Wanderung des Schnittpunktes des Äquators mit der Westküste Amerikas (Fig. 7b), so können wir den Schluß ziehen, daß die Gebirgsbildung längs dieser Küste in den entsprechenden Zeitaltern weiter gegen Süden fortgesetzt werden mußte.

§ 10. Die Transgressionen und Regressionen.

Bei allen Vorgängen, von denen die Bildung der Großformen der Erdoberfläche verursacht wurde, haben wir bisher keine Rücksicht auf die Hydrosphäre genommen. Ihre Existenz hat die Möglichkeit gegeben, eine neue Art von Änderungen des Antlitzes der Erde hervorzubringen. Außer den Geosynklinalen und den Nachbargebieten der Erdoberfläche, in welchen durch die Faltung und die gleichzeitig erfolgte Hebung diese Krustenteile sich über den Meeresspiegel emporgehoben haben, und außer den auseinandergezogenen Teilen zwischen denen sich die Meeresbecken gebildet haben, stellt die Geologie die Existenz von großen, in verschiedenen Zeitaltern unter- oder aufgetauchten anderen Gebieten fest, die über alle Kontinente verteilt sind. Es ist ohne weiteres anzunehmen, daß im Laufe der Bildung und Bewegung des Urkontinents sowie bei dem Zerfall und der Verschiebung einzelner Kontinente lokale Deformationen stattgefunden haben, denen zufolge gewisse Krustenteile überflutet werden konnten. Ob diese Hebungen und Senkungen irgendwelchen Gesetzmäßigkeiten unterliegen, läßt sich noch nicht klar erkennen.

Durch die Existenz der Flachmeere ist der Umriß des Urkontinents im Sinne einer zusammenhängenden Sialscholle nicht geändert worden. Infolgedessen brauchen die entsprechenden Änderungen der geographischen Karte im Laufe der geologischen Zeitalter bei der Betrachtung des Kontinentzerfalls nicht berücksichtigt zu werden. Eine wesentliche Rolle würden wahrscheinlich nur solche Räume zwischen einzelnen Schollen, aus welchen der Urkontinent zusammengesetzt war, spielen, die so tief wie die gegenwärtigen Ozeanbecken sind. Denn an solchen schwächeren Stellen des Urkontinents wurde die Entstehung einer Geosynklinale oder eines Risses eher zu erwarten sein.

Einen Grund für die systematische Umorientierung der Meeresflächen bietet aber die Verschiebung des Urkontinents oder der ganzen Erdkruste, denn bei der ellipsoidalen Erdgestalt müssen sich die Schollen in der neuen Lage der Gleichgewichtsfigur anpassen. Dieser Anpassungsprozeß muß sich in beiden Fällen abspielen: bei dem Gleiten der Erdkruste auf dem Kern sowie auch bei der Achsenverlagerung. Infolge der großen Zähigkeit des Krustenmaterials wird die Kruste in ihrer Anpassung gegen die schnelle Anpassung der Hydrosphäre zurückbleiben und da die Differenz des polaren und des äquatorialen Radius 21 *km* beträgt, so werden neue untergetauchte, bzw. aufgetauchte Gebiete entstehen. Über die Möglichkeit solcher Deformationen der Erdoberfläche und daraus folgenden Transgressionen und Regressionen kann kaum ein Zweifel bestehen. Ob diese aber tatsächlich stattgefunden haben, in welchem Maß und in welchen Gebieten, läßt sich nur auf Grund der geologischen Forschung feststellen.

Nach Darwin, Reibisch, Kreichgauer, Köppen u. a. müßte die Regression immer vor dem Pol und die Transgression hinter ihm auftreten, da die Meeresoberfläche mit der dem neuen Pol zugehörigen Ellipsoidfläche zusammenfallen würde. Diese aber liegt vor dem Pol unter der früheren Niveaulfläche, dagegen hinter dem Pol über dieser. Diese Regel sollte nach Wegener für zwei Epochen, Alt-Devon bis Alt-Karbon und Unter-Karbon bis Ober-Perm als bestätigt gelten. Aus den Karten geht aber dieser Schluß nicht so deutlich hervor und es ist schwer, diese Frage der Erdgeschichte auch nur als annähernd klargelegt anzusehen. Vielleicht werden die zukünftigen Untersuchungen darüber mehr Licht bringen und die genauen Karten für jedes Zeitalter bestimmte Schlüsse über die Art und Gesetzmäßigkeiten dieser Deformationen der Erdkruste ermöglichen. Der Hypothese der zonalen Rotation scheint hier nur eine untergeordnete oder sogar keine Rolle zugeschrieben werden zu können. Es läßt sich nur vermuten, daß durch eine Torsion des Erdkörpers an irgendwelchen Stellen der Erdoberfläche günstige Bedingungen für eine Transgression oder Regression auftreten könnten.

Mangels bestimmter, für die Eingliederung dieses Vorganges in den Bewegungsmechanismus erforderlichen Gesetzmäßigkeiten muß die allgemeine Analyse der Epirogenese unter-

bleiben. Die von den Geologen vermutete Tatsache, daß die Epirogenese und Orogenese durch qualitativ gleiche, quantitativ verschiedene Ursachen hervorgerufen sind, steht in keinem Widerspruch zum dargelegten Bewegungsmechanismus. Vielleicht läßt sich die Epirogenese teilweise auch auf die Wirkung des hydrostatischen Druckes auf die Kontinental-schollen, die in der oben zitierten Untersuchung von A. Prey [26] zur Erklärung der Gebirgsbildung berechnet wurde, zurückführen.

§ 11. Der Endzustand. Zusammenhang mit anderen Erscheinungen.

Um den Bewegungszustand der Erde in verschiedenen geologischen Zeitaltern erklären zu können, hat man folgende materielle Systeme ins Auge gefaßt:

1. einen flüssigen, starren, festen oder auch einen plastischen Körper,
2. einen mit einer starren Kruste umhüllten flüssigen Kern,
3. einen starren Körper, der mit Flüssigkeiten gefüllte Hohlräume besitzt,
4. einen starren Kern, der von einer starren Kruste durch eine flüssige Schicht getrennt ist,
5. einen starren Kern mit einer flüssigen Hülle.

Mit Hilfe dieser Modelle sollten auch die Beobachtungen der letzten Jahrhunderte auf eine sichere Basis gestellt werden. Wie erwähnt, wurden in erster Linie periodische Lösungen in Betracht gezogen, weil man auch gewisse periodische Erscheinungen erklären wollte. Faßt man aber die ganze Erdgeschichte ins Auge, d. h. die nahezu zwei Milliarden Jahre umfassenden geologischen Zeitalter, so rücken die aperiodischen Lösungen in den Vordergrund. Diese treten dann sicher auf, wenn zähe Flüssigkeiten, bzw. plastische Körper einen Teil des materiellen Systems bilden oder im allgemeinen, wenn man dissipative Systeme betrachtet.

Man verdankt Joukowski [13] einen Satz, in dem die Bedingungen für das Auftreten eines bestimmten Endzustandes festgestellt sind: werden einem materiellen System, das aus einem starren Körper und einer zähen Flüssigkeit in seinem Inneren zusammengesetzt ist, beliebige Anfangsgeschwindigkeiten erteilt, so strebt dieses System einem Endzustand zu, in welchem eine von seinen Hauptträgheitsachsen die Richtung des Anfangsdrehimpulses haben wird; das System wird dann um diese Achse wie ein starrer Körper mit einer Winkelgeschwindigkeit rotieren, die dem Quotienten des Anfangsdrehimpulses und des Trägheitsmomentes um die Rotationsachse gleich ist.

In diesem Satz sieht Joukowski die Möglichkeit, die Tatsache zu erklären, daß alle Planeten um ihre Hauptträgheitsachsen rotieren. Der für ein spezielles System ausgesprochene Satz von Joukowski läßt sich aber für beliebige dissipative Systeme beweisen [11]. Die kinetische Energie eines isolierten Systems, in dem die innere Reibung wirkt, nimmt ständig mit der Zeit ab. Falls der Anfangsimpuls von Null verschieden ist, erreicht diese Funktion dann einen Grenzwert, wenn alle inneren Bewegungen erloschen sind. In diesem Fall kann das System wie ein starrer Körper, und zwar nur um eine von den Hauptträgheitsachsen rotieren. Es handelt sich hier selbstverständlich um ein isoliertes System, da die Wirkung äußerer Kräfte diesen Vorgang grundsätzlich ändern kann.

Diese Überlegungen gelten auch für eine zonale Rotation, weil diese nur einen Spezialfall der inneren Bewegungen in einem System darstellt. Eine zonale Rotation kann in jedem von den am Anfang des Paragraphen angeführten Modelle stattfinden, in welchen innere Bewegungen vorkommen können.

Insofern die äußeren und die inneren Einflüsse (wie z. B. die Radioaktivität) das nicht verhindern, strebt auch die Erde einem Grenzzustand zu, den sie aber noch nicht erreicht hat. Einen Beweis dafür liefern einige Erscheinungen, darunter auch die Polschwankungen.

Wir haben in unserem Schema die zonale Rotation als eine Art von stationären Bewegungen behandelt. Es kann aber noch eine Schwingung des ganzen Erdkörpers in Betracht gezogen werden [11]. Die Analyse der Schwingungen eines flüssigen Sphäroids zeigt, daß die Hauptschwingung durch eine Kugelfunktion zweiter Ordnung dargestellt wird, die in den

Breiten $+ 35^{\circ} 15' 33''$ gleich Null ist. Längs dieser Parallelen verlaufen also die Knotenlinien, und falls die Schwingung zustande kommt, muß sich das Festland auf der einen Seite heben, dagegen auf der anderen Seite der Knotenlinie senken. Wie schon von verschiedenen Seiten hingewiesen wurde, verläuft diese Parallele in der Nähe der Gebiete der häufigsten und stärksten Erdbeben (Japan, San Francisco, Lissabon, Sizilien und Persien). Damit ist allerdings noch nicht die Ursache aller Erdbeben festgestellt. Bis jetzt konnte aus der Statistik der Erdbeben keine bestimmte Periode abgeleitet werden. Auch in einer zweiten Erscheinung, in welcher sich der Einfluß der Schwingungen des Erdkörpers vermuten läßt, nämlich in der Vulkantätigkeit, sind wir noch nicht imstande, auf eine bestimmte Periodizität zu schließen. Es ist nur festgestellt, daß einer Reihe an Eruptionen reichen Jahren eine Zeit schwacher Vulkantätigkeit folgt.

Die Existenz der Schwingungen des Erdkörpers wäre auch ein Beweis dafür, daß die Erde ihren Endzustand nicht erreicht hat.

Die kleinen Störungen, die durch die Wirkung der anderen Körper des Sonnensystems hervorgerufen werden, haben wir in dem Bewegungsmechanismus der zonal rotierenden Erde nicht berücksichtigt. Für die Vorgänge in der Erdkruste wäre es überflüssig, diesen Störungen vom Anfang an Rechnung zu tragen, da die Hypothese der zonalen Rotation in ihrer einfachsten Form ein in den Hauptzügen zutreffendes Bild der Entwicklung der Großformen der Erdoberfläche ergab. Diese Störungen waren wahrscheinlich nicht so stark, um im Laufe von einigen geologischen Zeitaltern den zonalen Charakter der Bewegungen wesentlich ändern zu können.

Wir wollen noch zur Frage der Verlagerungen der Drehachse der Erde im Räume folgendes bemerken. Eine strenge Behandlung dieser Frage läßt sich nicht durchführen, da man die Methoden der Himmelsmechanik auf die langen, einige geologische Zeitalter umfassenden Zeitintervalle nicht anwenden kann. Unsere Kenntnisse über die Verhältnisse in der weiten Vergangenheit sind außerdem so mangelhaft, daß man keinen sicheren Schluß ziehen darf. Einen gewissen Hinweis ergibt die Darwinsche Untersuchung der Bewegung eines deformierbaren Körpers, auf Grund welcher sich die Möglichkeit einer äußerst langsamen Änderung der Ekliptikschiefe vermuten läßt.

Man könnte im Zusammenhang mit der Entwicklung des ganzen Sonnensystems denken, daß die wahrscheinlichste Anfangslage der Achse der zonal rotierenden Erde senkrecht zur Ekliptik war. Als aber die Mächtigkeit der Erdkruste zugenommen hat und infolge des Gleitens der Kruste die weiteren Schichten mitgenommen wurden, mußte die Drehachse des äquivalenten starren Körpers ihre Wanderung beginnen. Nicht nur die Deformation selbst, sondern auch die äußeren Wirkungen haben eine Achsenverlagerung im Raume erzwungen. Es gibt Tatsachen, die vielleicht mit dieser Verlagerung in Verbindung stehen.

Nach Köppen und Wegener wanderte der Nordpol im Tertiär über den nordwestlichen Teil von Amerika. Andererseits fällt die magnetische Erdachse nicht mit der gegenwärtigen Drehachse zusammen. Die Koordinaten des magnetischen Nordpols waren z. B. im Jahre 1922: $\varphi = 70^{\circ} 50' N$, $\psi = 96^{\circ} W$, oder des südlichen im Jahre 1912: $\varphi = 71^{\circ} 10' S$, $\psi = 150^{\circ} 45' O$. Die Lage der beiden ändert sich bekanntlich mit der Zeit. Man kennt eigentlich weder die Ursachen des Erdmagnetismus noch einen Grund der Wanderungen der magnetischen Pole. Nach einer der Theorien soll aber der Erdmagnetismus durch gewisse Strömungen im Erdinnern verursacht werden.

Die gegenwärtige Ekliptikschiefe beträgt $23^{\circ} 27'$. Falls man die Drehachse der Erde um diesen Winkel im Raume dreht und senkrecht zur Ekliptik stellt, dann die Erdkruste so verschiebt, daß Nordamerika der Wegenerschen Theorie gemäß einen Teil der Polarkappe im Tertiär bildet, so stellt man fest, daß alle drei Pole, und zwar der Ekliptikpol, der Weltpol und der magnetische Pol sehr nahe beieinander liegen. Wir haben schon einmal [11] die Frage gestellt: ist diese Koinzidenz bloß ein Zufall oder war das tatsächlich die Lage der Erde und der Achse der in ihrem Innern zonal rotierenden Massen im Tertiär?

Schriftenverzeichnis.

1. A. Bilimovitch, Sur la rotation de la Terre qui est assimilée à un système avec six degrés de liberté. Glas de l'Ac. R. Serbe, 80, 155. Beograd 1934 u. a. Abh.
2. W. Bowie, Crustal changes due to Moon's formation. Gerl. B. 25, 137 (1930).
3. H. Ebert, Der Ursprung des Mondes und das Vulkanproblem nach W. Pickering Gerl. B. kl. Mitt., 1 (1910).
4. R. Emden, Zum Rotationsgesetz der photosphärischen Schichten. Zs. f. Ap., 12, 233 (1936).
5. D. Griggs, A Theory of Mountain-building. Amer. J. of Sc., 237, 611 (1939).
6. B. Gutenberg, Die Veränderung der Erdkruste durch Fließbewegungen der Kontinentalscholle. Gerl. B. 16, 239 (1927) und 18, 281 (1927).
7. B. Gutenberg, Structure of the Earth's crust and the spreading of the continents. Bull of the Geol. Soc. of Amer., 47, 1587 (1936).
8. B. Gutenberg, Viscosity, Strength and Internal Friction in the Interior of the Earth. Physics of the Earth, VII, 361 (1939).
9. W. Heiskanen, Über die Struktur und Figur der Erde. Gerl. B., 57, 132 (1941).
10. P. Humbert, Sur les surfaces de Poincaré (Thèse, 1918); C. R. 170, 13. Paris.
11. W. Jardeztzky, Recherches mathématiques sur l'évolution de la terre. Edit. sp. de l'Ac. R. Serbe, CVII. Belgrade 1935 u. a. Abh.
12. H. Jeffreys, The Earth. Cambridge 1924.
13. N. Joukowski, Sur le mouvement d'un solide qui à des cavités remplies par un liquide homogène (en russe) Journ. soc. phys. chim. St. Petersb., XVII, 1, 81 (1885).
14. S. Kienow, Grundzüge einer Theorie der Faltungs- und Schieferungsvorgänge. Fortschr. d. Geol. u. Paläontol., 14, H. 46.
15. G. Kirsch, Geomechanik. Leipzig 1938.
16. L. Kober, Die Orogentheorie. Berlin 1933.
17. W. Köppen, Die Wanderung des Nordpols seit der Steinkohlenzeit. Met. ZS., 57, 106 (1940).
18. F. Kümmel, Zur Geologie des Atlantischen Ozeans. N. Jahrb. f. Min., Geol. und Paleont., 84, 24 (1940).
19. M. Lagally, Spaltenbildung in zähflüssigen Körpern. Verh. d. 3. Intern. Kongr. f. techn. Mech. Stockholm, II., 203 (1930).
20. M. Milankovitch, Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Edit. sp. de l'Ac. R. Serbe, CXXXII (1941) u. a. Abh.
21. Fr. Nöike, Geotektonische Hypothesen. Berlin 1924.
22. Ch. Pekeris, Thermal convection in the interior of the Earth. Geoph. Suppl. M. N. R. A. S., III., 343 (1936).
23. L. Prandtl und O. Tietjens, Hydro- und Aeromechanik. B. II., Berlin 1931.
24. A. Prey, Über Polschwankungen und Polwanderung. Gerl. B., 56, 155 (1940).
25. A. Prey, Über Flutreibung und Kontinentalverschiebung. Gerl. B., 15, 401 (1926).
26. A. Prey, Über die Möglichkeit der Gebirgsbildung durch den hydrostatischen Druck. Wien Sitzungsber. IIa, 151, 293 (1942).
27. W. Prinz, Sur les similitudes que présentent les cartes terrestre et planétaires. Annuaire de l'Obs. R. de Bruxelles, p. 304 (1891).
28. J. Ruud, Tektonisches Hauptproblem im Lichte neuerer Materialforschung. Gerl. B., 52, 123 (1938).
29. R. Schwinner, Der Begriff der Konvektionsströmung in der Mechanik der Erde. Gerl. B., 53, 119 (1942).
30. K. Sotome, Determination of the solar rotation free from the refraction effect. Proc. Imp. Acad. Tokyo, 3, 317 (1927).
31. H. Stille, Grundfragen der vergleichenden Tektonik. Berlin 1924.
32. N. Stoyko, Sur les variations séculaires et périodiques des longitudes. C. R., 214, 558. Paris 1942.
33. I. H. F. Umbgrove, The Pulse of the Earth. The Hague 1942.
34. F. A. Vening Meinesz, Gleichgewichtsströmungen in der Erde. Ingenieur. Haag 55, A 94, zit. nach d. Ref. Zbl. f. Geophysik, VI., 317 (1940).
35. F. A. Vening Meinesz, Die Theorie von Wegener. Kon. Ned. A. G. 1939, zit. nach d. Ref. in Zbl. f. Geoph., IV., 349 (1939).
36. V. Volterra, Sur la théorie des variations des latitudes. Acta Math., 22, 201
37. J. Wasiutynski, Studies in Hydrodynamics and structure of stars and planets. Astrophysica norvegica. Vol. 4, Oslo 1946.
38. A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 1929, Braunschweig.
39. K. Wegener, Die Ursache der Bewegung der Kontinente. Gerl. B. 59. 241 (1943).
40. J. Wilsing, On the law the Sun's Rotation. Aph. J., III., 247 (1896).

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Denkschriften der Akademie der Wissenschaften.Math.Natw.Kl.
Frueher: Denkschr.der Kaiserlichen Akad. der Wissenschaften. Fortgesetzt:
Denkschr.oest.Akad.Wiss.Mathem.Naturw.Klasse.](#)

Jahr/Year: 1951

Band/Volume: [108](#)

Autor(en)/Author(s): Jardetzky Wenceslas

Artikel/Article: [III. Abhandlung: Bewegungsmechanismus der Erdkruste. \(Mit 18
Textfiguren\). 1-38](#)