

Geolog. Rundschau

11. 5. 6.

I. Aufsätze und Mitteilungen.

Über das Problem der Krusten- und Gebirgsbildung. Die Verlangsamung der Achsendrehung der Erde im Laufe der geologischen Zeiten als Ursache tektonischer Bewegungen.

Von **H. Quiring** (Berlin).

(Mit 6 Textfiguren.)

Inhalt.

Grenzen	194
1. Teil.	
Die bestehenden Theorien	197
Isostasie	197
a) Hemmungen des isostatischen Ausgleichs	198
b) Störungen des isostatischen Gleichgewichts	199
Unterströmungen und Volumschwankungen	200
Quellfalten	202
Gleitung	202
Trogefaltung und -zerrung	203
Kritik der Kontraktionstheorie	203
Die geophysikalischen Vorbedingungen der Kontraktion	204
a) Der Temperaturabfall	204
b) Die stärkere Zusammenziehung des Erdkerns gegenüber der Erdrinde	205
Die Bedeutung der Kontraktion für die Gebirgsbildung in archaischer Zeit	211
2. Teil.	
Kritik der Retardationstheorie	213
Grundlagen	215
a) Verlangsamung der Achsendrehung durch Gezeitenreibung	215
b) Das hydrostatische Gleichgewicht des Erdsphäroids	217
Die Bewegungsvorgänge im Erdinnern und in der Magmazonen:	
Die Vorgänge	
a) in der Oszillationsperiode	222
b) in der Komplikationsperiode	224
Beschleunigung der Achsendrehung am Ende der Komplikationsperiode	224
Die Bewegungsvorgänge in der Erdrinde:	
a) Absolute Hebung und Zerrung	226
b) Absolute Senkung und Faltung	227
Land und Meer	232

Tropfen, heut in Meereswogen sinkend,
Hebt die Welle morgen blinkend zum Licht.

Der geringen Kenntnis vom Zustande des Erdinnern und von den Bedingungen, unter denen sich die Erdrinde gebildet und umgestaltet hat, ist es zuzuschreiben, daß über die Ursachen, die den geotektonischen Erscheinungen zugrunde liegen, noch keine genügende Klarheit besteht. Eine jede der vielen aufgestellten Theorien, auch die auf den ersten Blick so einleuchtende Kontraktionstheorie, hat mehr oder weniger starken Widerspruch erfahren, keiner ist es bisher gelungen, das Problem der Krusten- und Gebirgsbildung einer allgemeinen Lösung entgegenzuführen.

Die nachstehenden Ausführungen sind, obwohl das Problem wegen der unzureichenden und unsicheren Grundlagen, von denen ausgegangen werden muß, kaum behandlungsfähig erscheint, als ein Versuch zu betrachten, unter Sichtung der bestehenden Theorien die Grenzen aufzuzeigen, die zeitlich und örtlich den gebirgsbildenden Vorgängen und Ursachen gesetzt sind. Es ist der Weg der ausgleichenden Behandlung, der beschritten wird und der uns ein gutes Stück dem Ziele, der Erkennung der Wahrheit, zu nähern geeignet ist. Es wird sich hierbei zeigen, daß in fast allen bisherigen Theorien gute und richtige Gedanken enthalten sind. Besondere Berücksichtigung wird die Theorie BÖHMS finden, die einen Zusammenhang zu erweisen unternommen hat zwischen der Abplattung der Erde und der Gebirgsbildung. Sie ist vor allem befähigt, einen Teil der sich ergebenden Fragen zu beantworten und einen Ersatz zu bieten für die bei dem heutigen Erhaltungszustand unseres Planeten in ihrer Geltung beträchtlich eingeschränkte Kontraktionshypothese.

Grenzen.

Alle tektonischen Bewegungen sind Anpassungsvorgänge, Glieder kinematischer Ketten, die kosmische und geophysikalische Ursachen mit den sichtbaren Erscheinungen verknüpfen. Es sind daher zu unterscheiden:

1. Die geotektonischen Erscheinungen;
2. die Zwischenvorgänge, die an deren Entstehung beteiligt sind;
3. die primären Kräfte kosmischen bzw. geophysikalischen Ursprungs.

Zur Erforschung des Bewegungsmechanismus sind die Prinzipien und Methoden der allgemeinen Mechanik der festen und flüssigen Körper heranzuziehen. Besondere Berücksichtigung verdienen die mechanischen Bedingungen, unter deren Herrschaft die Bewegungen zur Auslösung gelangen. Sie können einerseits hemmend, andererseits befördernd einwirken. Ihr Vorhandensein setzt den Vorgängen zeitliche und räumliche Grenzen.

Den Begriff der Entwicklung, der von Haus aus einen mehr oder weniger starken teleologischen Gedanken enthält, müssen wir auch aus

Betrachtungen tektonischen Geschehens ausschalten. Es gibt keine Gesetze fortlaufender Entwicklung, es gibt nur Prinzipien der Umformung. Phasen des Aufbaues eines Komplexes — auch eines Vorganges — stehen stets Phasen des Zerfalls gegenüber.

Als letzte Ursachen der Umformung der Erde und ihrer Oberfläche können allein primäre Kräfte in Rechnung gestellt werden. Sie ergeben sich ganz allgemein aus einer einfachen Überlegung:

Gestalt und Größe der Erde werden im wesentlichen bestimmt durch die Masse der Erde, Dichte- und Lagerungsverhältnisse im Innern, die Umdrehungsgeschwindigkeit, den Vorrat an kinetischer Energie (Wärme).

Nur aktive Störungen der durch diese Größen gegebenen Gleichung, z. B. Temperaturabfall, Einwirkungen anderer Weltkörper, kommen letzten Endes als Ursachen für umgestaltende Vorgänge in Frage. Sie werden im weiteren Verlauf der Darstellung als Grundursachen bezeichnet werden.

Bei dieser Begrenzung des Problems zeigt sich sofort, daß weder einfache mechanische Faktoren, wie etwa Spannung, Drehung, Pressung, Schwereausgleich, noch komplexe Vorgänge, wie Strömungen im Erdinnern, Volumschwankungen, Polverschiebungen usw. als Grundursachen gelten können. Zwar liegen auch sie im motorischen Gebiet, sind aber lediglich Zwischenglieder in der kinematischen, Grundursachen und Erscheinungen verknüpfenden Reihe. Die Kritik der bisherigen Theorien wird dies deutlich machen.

Der tektonische Bau der Erdrinde ist nicht einheitlich. Die Verteilung von Festland und Meer, die Anordnung der Vulkane, die zonare Lage der Faltengebirge, der örtliche Gegensatz zwischen Gebirgen aus Zerrung und Druck, die kontinentalen Hebungen und Senkungen und nicht zuletzt die mannigfaltige Geometrie und Wirkungsweise der tektonischen Flächen zeigen, daß in verschiedenen und andererseits wieder bestimmten Teilen der Erdrinde verschiedene tektonische Erscheinungen zur Ausbildung gelangt sind.

Diese Tatsache kann eine mehrfache Deutung finden:

Entweder ist die Grundursache einheitlich und es führen von ihr lediglich verschiedene Ketten von Zwischenvorgängen zu den Erscheinungen,

oder es sind mehrere Grundursachen vorhanden, von denen jede einzelne durch eine bestimmte Reihe von Zwischengliedern mit den Erscheinungen verknüpft ist,

oder es sind neben mehreren Grundursachen mehrere variable Reihen von Zwischengliedern vorhanden, so daß z. B. infolge von Konvergenz aus verschiedenen Grundursachen ähnliche tektonische Erscheinungen hervorgehen können.

Vorgreifend sei bemerkt, daß die dritte Deutungsmöglichkeit allein in Betracht kommt. Damit ist eine Frage beantwortet, die sich bei der

Stellung der vorliegenden Aufgabe sofort aufdrängen mußte: Kann es überhaupt eine allgemeine Lösung, eine allgemeingültige Theorie der Gebirgsbildung geben? Die Antwort muß »nein« lauten.

Dieselbe Mannigfaltigkeit, die wir bei den tektonischen Erscheinungen antreffen, finden wir im Gebiet der Bewegungsvorgänge. Die Vorgänge werden beeinflußt:

1. durch örtliche Widerstände, die im Bewegungsträger ruhen,
2. durch die Art und Stärke des Erregers.

Die örtlichen Verhältnisse des Bewegungsträgers allein bedingen schon eine unendliche Vielseitigkeit der einander kreuzenden, divergent und vielfach auch konvergent verlaufenden Vorgänge. Es ergibt sich hieraus die Unmöglichkeit, jemals alle Einzelheiten des Bewegungsbildes, geschweige denn des Bewegungsvorganges zu erfassen. Aber auch die Zahl der Grundursachen (Erreger) ist groß. Meist sind sie — es braucht nur an Meteoritenfall, Sonnenbestrahlung erinnert zu werden — von untergeordneter Bedeutung. Andererseits sind einige vorhanden, die für die allgemeine tektonische Gestaltung der Erdoberfläche besonders ausschlaggebend sind. Nur die letzteren können Gegenstand der nachstehenden Betrachtung sein. Es wird sich zeigen, daß auch von ihnen in jedem Falle eine gewisse Intensität und Dauer aufgebracht werden muß, um die örtlichen Widerstände (»Reizschwellen«) überschreiten zu können und damit gebirgsbildender Faktor zu werden.

Dem Wandel sind nicht nur alle Erscheinungen, sondern auch die den Erscheinungen zugrunde liegenden Ursachen unterworfen. Damit bestehen neben örtlichen Beschränkungen für bestimmte Arten von Bewegungsvorgängen auch zeitliche. Gestalt, Größe, Zustand der Erde ändern sich und damit die Bedingungen, unter denen sich die Bewegungen der Lithosphäre vollziehen. Gewiß spricht der Umstand, daß nach Bildung der Erdrinde Hunderte von Millionen Jahren verfließen sind, dafür, daß gewissen allgemeinen Ursachen der Gebirgsbildung für längere Zeitabschnitte überragende Bedeutung zukommen wird, niemals dürfen wir aber bei Aufstellung einer Arbeitshypothese die zeitliche Begrenzung außer acht lassen. Dies gilt auch für verwandte Gebiete. Um nur ein Beispiel zu erwähnen: die Theorie ALFRED WEGENERS' von den großen horizontalen Kontinentalverschiebungen kann z. B. zur Erklärung der möglichen Abspaltung Amerikas von der Alten Welt ohne weiteres herangezogen werden, insofern die Abspaltung und erste Anlage der atlantischen Hohlform in die Zeiten verlegt wird, als die salischen, bereits erstarrten Kontinente auf der noch größtenteils flüssigen simischen Masse schwammen, die, wie heute die Ozeane, sich glühend zwischen den Kontinenten ausbreitete. Nach völliger Erstarrung der Ozeanböden jedoch ist eine horizontale Kontinentalverschiebung von dem angegebenen Ausmaß als mechanisch unmöglich zu betrachten.

Zu den örtlich bedingten Gliedern von Zwischenvorgängen treten also

noch andere Reihen, die in augenblicklichen (zeitlich begrenzten) Spannungs- und Festigkeitszuständen des Bewegungsträgers ihre Begründung finden. Wie rasch sich solche Verhältnisse ändern, zeigt u. a. eine bemerkenswerte Erscheinung, die uns das Bewegungsbild des rheinisch-westfälischen Steinkohlengebirges bietet. Dort hat anscheinend der von Süden tangential wirkende Gebirgsdruck die Gesteinsmassen des Beckens in einem Zustand angetroffen, in dem der kritische Überschiebungsdruck niedriger war als der kritische Faltungsdruck, so daß die gleiche gebirgsbildende Kraft zuerst Überschiebungen unter Zertrümmerung hervorgerufen und später¹⁾ erst Falten erzeugt hat.

I. TEIL.

Die bestehenden Theorien.

Nur wenige Theorien sind bis zu den Grundursachen durchgeführt. Keine Theorie für sich allein konnte, wie dies nach den bisherigen Ausführungen zu erwarten ist, das Problem lösen. Nur eine Kombination wäre dazu befähigt gewesen.

Isostasie.

Auf der Erde ragen die Kontinente mit den sie umgebenden Schelfplateaus als gewaltige Steinsöckel etwa 4500 m über den verhältnismäßig ebenen Meeresboden auf.

Die schon seit vielen Jahren durchgeführten Schweremessungen im Bereich der Kontinente und auf ozeanischen Inseln haben ergeben, daß innerhalb der Kontinente, insbesondere in den Gebirgen, die Schwere im allgemeinen unternormal, in den Niederungen, die als von Sedimenten ausgefüllte Hohlformen zu betrachten sind, und über den Meeren übernormal ist. Wie HELMERT²⁾ auf Grund neuester geodätischer Untersuchungen zusammenfassend hervorgehoben hat, ist der Gegensatz der orographischen Gestaltung von Festland und Meer durch isostatische Kompensation bis auf wenige hundert Meter ausgeglichen. Demnach kann es als feststehend angesehen werden, daß die Kontinente im allgemeinen aus leichteren Massen — die früher zur Erklärung des Massendefektes im Bereich der Kontinente gemachte Annahme unterirdischer Hohlräume dürfte wohl kaum noch Verfechter finden — zusammengesetzt sind als die Böden der Ozeane. Die plastische Ausgleichszone, die den Auftrieb der Schollen vermittelt, liegt nach HELMERT³⁾ in 120 km

¹⁾ Von der Vorfaltung des Gebietes, die vor der Bildung der großen Überschiebungsflächen stattgefunden hat, kann in diesem Zusammenhange abgesehen werden.

²⁾ HELMERT, Die Erfahrungsgrundlagen der Lehre vom allgemeinen Gleichgewichtszustand der Massen der Erdkruste. Sitzungsbericht der Kgl. Preuß. Akad. d. Wissenschaften 1912. S. 308.

³⁾ HELMERT, Sitzungsbericht d. Kgl. Preuß. Akad. d. Wissenschaften 1909. S. 1192.

Tiefe¹⁾. Die von den Anhängern der Isostasie gemachten Voraussetzungen und aufgestellten Behauptungen sind demnach begründet. Damit kommt der Lehre vom isostatischen Gleichgewicht für die Rindenbildung, die Bewegungen der Lithosphäre und die Lage der großen Rindenschollen (Kontinentalsockel und Meeresböden) zur idealen Oberfläche des irdischen Rotationssphäroids besondere Bedeutung zu. Das Streben der Schollen, stets die Gleichgewichtslage anzunehmen, die sich bei einer völlig flüssigen Erde einstellen würde, muß ohne weiteres jeder Spekulation zugrunde gelegt werden.

Wird dies anerkannt, so kann sich die weitere Fragestellung nur in zwei Richtungen bewegen:

1. Welche Hemmungen wirken der sofortigen und vollständigen Herstellung des Gleichgewichts der Massen der Erde entgegen?

2. Welche aktiven Ursachen sind für die im Laufe der geologischen Zeiten eingetretenen Störungen des Gleichgewichts verantwortlich zu machen?

a) Hemmungen des isostatischen Ausgleichs.

Die Maria des Mondes, die uns als ebene, graue Flächen erscheinen, sind ausgedehnte Hohlformen, die im Mittel 3000 m unter den Terrae, den höher gelegenen Teilen der Mondoberfläche liegen. Während SUSS²⁾ sie für das Ergebnis großer Senkungen ansah, steht die neuere selenologische Forschung auf dem Standpunkt, daß wir sie als Bildungen betrachten müssen, die bereits bei der Erstarrung der Mondoberfläche angelegt worden sind. Man hält die Terrae für leichtere Schlackenbildungen (vergleichbar den salischen Gesteinen der Erde), die sich bei der Erstarrung des Mondes nach dem spezifischen Gewicht und Schmelzpunkt von den schweren Massen getrennt haben, zuerst fest geworden sind und längere Zeit sich zwischen den noch flüssigen schweren Massen der Maria mehr oder weniger frei bewegt haben. Machen wir uns diese Anschauungen zu eigen, so müssen wir für die Maria und Terrae zur Zeit der Erstarrung ein uneingeschränktes statisches Gleichgewicht voraussetzen. Ob bei fortschreitender Erstarrung des Mondes beträchtliche Änderungen des Gleichgewichts eingetreten sind, mag zunächst dahingestellt bleiben.

In der Zeit der ersten Bildung der Erdrinde müssen ähnliche Bedingungen, wie sie auf dem Monde vorausgesetzt werden, bestanden haben. Nur so sind die erheblichen Höhenunterschiede zwischen den Kontinentalsockeln und der Tiefe der ozeanischen Becken zu deuten. Es muß eine Zeit gegeben haben, in der die Massen sich völlig im Gleichgewicht befanden und Isostasie nicht nur die Lage der Großformen, sondern auch einzelner Teile der Oberfläche hemmungslos und unmittelbar bestimmte. Die zunehmende Erstarrung, das Hinabwachsen und

¹⁾ Vgl. auch HAYFORD, *The Figure of the Earth and isostasy from measurements in the United States*. Government Printing office. Washington 1909 u. 1910.

²⁾ SUSS, *Antlitz der Erde* III, 2. 1909. S. 683.

Zusammenwachsen der Kontinentalschollen und Meeresböden hat mehr und mehr die sofortige Wiederherstellung des durch irgendwelche Vorgänge gestörten Gleichgewichts verzögert. Das Auftreten von Reibungen und Spannungen wurde zu Hemmungen und Grenzen des isostatischen Ausgleichs, der mit immer größerem Abstände den Störungen nachhinkte. Nur so ist es zu erklären, daß in jüngeren Entwicklungsperioden der Erdoberfläche das Meer, das nach wie vor ohne Widerstreben hydrostatischen Kräften nachgab, die Kontinente überfluten konnte und andererseits ozeanische Tiefen zum Tageslicht aufstiegen.

Für die jüngeren Zeiten müssen wir einen Vergleich schließen zwischen der Annahme WALLACES und DANAS von der Beständigkeit der Kontinente und Ozeane, die in neuerer Zeit besonders von den amerikanischen Geologen verfochten wird¹⁾, und der Auffassung von SUSS, daß die großen Meeresböden Senkungsfelder sind. Die Wahrheit liegt in der Mitte: die Permanenz der Großformen ist keine absolute, sie wird durch säkulare Störungen des isostatischen Gleichgewichts verwischt und durch tektonische Bewegungen beeinflusst. Es wird noch darauf zurückzukommen sein.

b) Störungen des isostatischen Gleichgewichts.

Die Wiederherstellung des statischen Gleichgewichts tritt nur als Zwischenvorgang, als Reaktion auf. Eine Störung muß stets vorausgegangen sein. Niemals erzeugt isostatischer Ausgleich das Bewegungsbild aktiv²⁾, stets nur vermittelnd. Dies haben alle Isostatiker eingesehen und darum nach diesen aktiven Störungen gesucht. Mag man zu ihren Anschauungen, insbesondere der Annahme einer Einwirkung der Sedimentation und Abtragung, stehen wie man will, eines dürfte sicher sein: kaum zur Erzeugung der kontinentalen Hebung und Senkung, geschweige denn zur Hervorrufung von Falten- und Schollengebirgen dürften diese doch immerhin geringfügigen Störungen des Gleichgewichts ausreichen, zumal sie den Meeresboden so gut wie unberührt lassen und nur die Kontinente mit ihren Schelfen betreffen. Zugegeben werden kann allerdings, daß geringe Schwankungen von Einzelschollen, auch wohl die Auslösung von Verwerfungen durch größere und geringere exogene Belastung der Schollen hervorgerufen werden können, gebirgsbildende Spannungen dürften jedoch bei der jetzigen Mächtigkeit der Rinde kaum erzeugt werden, da hierzu die Intensität der Gleichgewichtsstörung zu gering ist.

Ein Beispiel mag angeführt werden. Die Faltengebirge haben sich fast ausnahmslos unmittelbar aus dem Meere erhoben, aus Geosyn-

¹⁾ U. a. von B. WILLIS, Principles of palaeogeography. Sci., Vol. 31 N. s. New York 1910.

²⁾ Die sekundäre Bedeutung des isostatischen Ausgleichs für die Gebirgsbildung hat insbesondere K. ANDRÉE (Über die Bedingungen der Gebirgsbildung. Berlin 1914. S. 50) hervorgehoben.

klinalen, die vorher dem Meeresspiegel gegenüber in fortdauernder Senkung begriffen waren und die aus diesem Grunde große Sedimentmassen in sich aufgenommen hatten. Kehren wir diese logische Reihe um und sagen: Die Tröge haben sich gesenkt, weil ständig in ihnen Sedimente angehäuft wurden¹⁾, so bleibt immer noch die Frage: wie war es möglich, daß die so stark belastete Geosynklinale später gewissermaßen emporschnellte und zum Faltengebirge wurde? Es ergibt sich ein Widerspruch, der durch die Theorie der Schwankung aus wechselnder Belastung nicht zu lösen ist. Die wirklich entscheidenden Störungen des Gleichgewichts müssen in anderen Vorgängen und Ursachen gesucht werden.

Diese alsbald erkannten Unzulänglichkeiten von DUTTONS Deutungsversuch haben eine weitere Ausgestaltung der Theorie der Isostasie notwendig gemacht, und zwar durch Verlegung des Störungsherdens in den tieferen Untergrund.

Unterströmungen und Volumschwankungen.

Schon v. RICHTHOFEN war versucht, die Gebirgsbildung durch Vorgänge im Erdinnern, Volumschwankungen, zu deuten. Er sagt in einer seiner vielen Abhandlungen²⁾ über vulkanische Fragen: Die Vorgänge unter der Erdrinde können nicht bloß in einer fortdauernden Kontraktion bestehen. Zahlreiche Tatsachen nötigen zu der Annahme, daß es Vorgänge gibt, welche der allgemeinen Volumverminderung entgegenwirken, und daß dieselben Prozesse dahin streben, eine allmähliche Ansammlung von Spannkraft nach außen unter der Erdrinde zu erzeugen:

In Anlehnung an AMPFERERS³⁾ »Unterströmungstheorie« und fußend auf TAMMANN'S⁴⁾ Untersuchungen hat K. ANDRÉE⁵⁾ die Ursachen sowohl der epirogenetischen Bewegungen als auch der Faltungs- und Zerrungserscheinungen in chemischen und physikalischen Veränderungen (Ausdehnung, Zusammenziehung, Strömung) in der plastischen Magmazone gesucht. Hierauf wird noch weiter unten eingegangen werden. Hier sei nur hervorgehoben, daß diese Annahmen von Bewegungen in der »plastischen Schicht« den tatsächlichen Verhältnissen Rechnung tragen, daß wir zu ihrer Anerkennung gezwungen sind, schon um einen

¹⁾ Tatsächlich besteht Konvergenz der Vorgänge. Die ursprüngliche Störung des Gleichgewichts läßt den Trog sinken. Dieses Niedergehen (s. u.) wird durch die ständige Anhäufung von Sedimenten verstärkt. Zwei verschiedene Vorgänge erzeugen eine ähnliche Erscheinung.

²⁾ v. RICHTHOFEN, Mitteilungen von der Westküste Nordamerikas: Die natürliche Gliederung und der innere Zusammenhang der vulkanischen Gesteine. Ztschr. d. deutschen geol. Ges. 1869. S. 10 und 11.

³⁾ O. AMPFERER, Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. Jahrbuch d. k. k. geol. Reichsanstalt 1906. S. 539—622.

⁴⁾ G. TAMMANN, Kristallisieren und Schmelzen. Leipzig 1903.

⁵⁾ K. ANDRÉE, Über die Bedingungen der Gebirgsbildung. Berlin 1914, S. 50.

Spielraum zu schaffen für die radialen Bewegungen der in die plastische Magmaschicht eintauchenden Rindenschollen. Aber auch wenn diese Volumschwankungen in der plastischen Schicht den Schollen den hydrostatischen Auftrieb mitteilen, stets wird sich die Frage erheben: wo liegen die aktiven Kräfte, wodurch werden diese den Volumschwankungen und Strömungen zugrunde gelegten Kristallisationsvorgänge, Druck- und Wärmeschwankungen hervorgebracht¹⁾? Hierauf gibt uns ANDRÉE keine Antwort. Dies ist um so befremdlicher, als er, um die Kontraktionstheorie zu stürzen, eine Temperaturänderung infolge säkularer Abkühlung wenn auch nicht ablehnt, so doch als sehr fraglich bezeichnet²⁾. Dagegen hat TAMMANN³⁾ in Anwendung seiner Hypothese des »maximalen Schmelzpunktes« auf astrophysikalische Probleme für Volumschwankungen durch Kristallisation Änderungen in der Temperatur, also Abkühlung im Sinne der Nebularhypothese verantwortlich gemacht, ohne jedoch besondere irdische Erscheinungen in den Bereich seiner Untersuchungen zu ziehen. Da aber, wie weiter unten noch gezeigt werden soll, die von der Oberfläche ausgehende Erstarrung die Zone des maximalen Schmelzpunktes TAMMANNs noch nicht erreicht haben dürfte, sind wir nicht berechtigt, von Volumvermehrung durch Kristallisation, hervorgerufen durch den säkularen Temperaturabfall, zu sprechen.

Jedenfalls kann den Volumschwankungen und Strömungen in der plastischen Magmaschicht ebenso wie der Isostasie nur eine vermittelnde Rolle zuerkannt werden. Das Problem der Bewegungen der Lithosphäre erscheint auch durch die »Unterströmungstheorie« nicht im Kern erfaßt, sondern nur verschoben.

Dasselbe gilt auch bezüglich der aktiven Rolle, die vielfach⁴⁾ für die vulkanischen Magmen (Magmaherde) angenommen worden ist. Eine oft wesentliche Mitwirkung des Magmas bei Entstehung tektonischer Erscheinungen ist durch zahlreiche Beobachtungen bestätigt. Über die Art der bewegenden primären Kräfte besteht jedoch keine Einigkeit⁵⁾. Erst die Versuche TAMMANNs haben auch in diese Fragen eine gewisse Klärung gebracht.

¹⁾ Auch radioaktive Vorgänge, die übrigens in größeren Tiefen sehr abgeschwächt sein dürften (vgl. F. v. WOLFF, Die vulkanische Kraft und die radioaktiven Vorgänge in der Erde. Ztschr. d. D. geol. Ges. 1908. Abh. S. 431 ff.), erzeugen keine wechselnden Bewegungen.

²⁾ ANDRÉE, a. a. O., S. 11, 12 und 44.

³⁾ TAMMANN, Über die Änderungen des Aggregatzustandes bei der Abkühlung eines Weltkörpers. Verh. der Permanenten Seismischen Kommission der Kais. Akad. der Wissenschaften. St. Petersburg 1903. S. 321—328.

⁴⁾ U. a. von STÜBEL, Ein Wort über den Sitz der vulkanischen Kräfte in der Gegenwart. Leipzig 1901. — Ders., Über die genetische Verschiedenheit vulkanischer Berge. Leipzig 1903. — BRANCA, Neue Beweise für die Unabhängigkeit der Vulkane von präexistierenden Spalten. N. J. f. Min. 1898. I. S. 175.

⁵⁾ Vgl. die Kritik DOELTERS, Über die Frage der Ausdehnung der Silikate beim Erstarrten. Ztschr. d. Deutsch. geol. Ges. 1907. Monatsber. S. 217.

Quellfalten.

Folgerichtiger und bis zu den letzten Voraussetzungen durchgeführt erscheint die von J. DANA begründete und von M. READE¹⁾ vertretene thermische oder Expansionstheorie. Sie knüpft an die bereits erwähnte Tatsache an, daß die Faltengebirge aus Trögen sich erhoben haben, die gewaltige Sedimentmassen vor der Gebirgsentstehung gewissermaßen verschluckt hatten. Der »Quellfaltentheorie«, wie sie kurz bezeichnet werden kann, ist begründet widersprochen worden²⁾. Einwandfreie irdische Beispiele für Quellfalten, von Fältelung aus Quellung abgesehen, sind bisher nicht beigebracht worden. Zur Deutung anderer tektonischer Erscheinungen, wie z. B. der Schollengebirge und der kontinentalen Bewegungen, kommt die Theorie nicht in Betracht. Immerhin kann sie zur Erklärung örtliche Faltungerscheinungen herangezogen werden, doch scheint ihre örtliche Bedeutung noch geringer zu sein, als sie z. B. der Theorie des Auftriebes der Salzstöcke für die Tektonik von Sondergebieten zuzuerkennen ist.

Gleitung.

Die Bildung von Falten und die Verschiebung von Schollen gegeneinander infolge Abgleitens auf schiefer Ebene unter Einwirkung der Schwerkraft sind sehr häufig auftretende tektonische Vorgänge. Für das Bewegungsbild der Faltengebirge³⁾ wie der Schollengebirge — Entstehung der Böschungssprünge⁴⁾ — ist die Gleitung von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Mit der neueren Auffassung hat allerdings die alte Gleitungstheorie REYERS⁵⁾, die eine untermeerische Gleitung voraussetzte, nur den Namen, kaum den Ausgangspunkt gemeinsam. Allerdings müssen wir auch Faltungen infolge »subaquatischer Rutschung« als möglich anerkennen. Einzelne Erscheinungen sprechen außerdem dafür, daß derartige Vorgänge tektonische Lageveränderungen erzeugt haben.

Können wir somit der Faltung und Schollenverschiebung aus Gleitung einen wesentlichen Anteil an der Entstehung tektonischer Erscheinungen zubilligen, so vermissen wir andererseits auch bei der Gleitungstheorie den Nachweis der primären Kräfte, die zur Hebung des Gebirges, zur

¹⁾ M. READE, *The origin of mountain ranges*. London 1886.

²⁾ E. KAYSER, *Lehrbuch der Allgemeinen Geologie*. 5. Auflage. Stuttgart 1918. S. 972.

³⁾ O. AMPFERER, Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. *Jahrb. d. k. k. Geol. Reichsanstalt* 1906. S. 530ff. — H. SCHARDT, Die modernen Anschauungen über den Bau und die Entstehung des Alpengebirges. *Verh. d. Schweizer Naturf. Ges.* 1906. S. 308—346. — A. PENCK, Die Entstehung der Alpen. *Ztschr. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin* 1908. S. 5—17. — R. LEPSIUS, Über das Verhältnis der Decken zur Metamorphose der Gesteine in den Alpen. *Notizblatt d. Ver. für Erdkunde zu Darmstadt* 1912. S. 16.

⁴⁾ H. QUIRING, Die Entstehung der Schollengebirge. *Ztschr. d. Deutsch. geol. Ges.* 1913. *Abh.* S. 418ff.

⁵⁾ ED. REYER, *Theoretische Geologie* 1888. S. 409.

Neigung der Gleitfläche bzw. zur Schaffung des Raumes geführt haben, der die Gleitung oder Schollenverschiebung gestattete. Auch die Gleitungstheorie erfaßt nur einen der vielen möglichen Zwischenvorgänge, keine Grundursache.

Trogfaltung und -zerrung.

Die Frage nach den Ursachen der Faltenbildung und der Schollenverschiebung aus Pressung und Zerrung wird man künftig nicht erörtern, ohne der bemerkenswerten Untersuchungen zu gedenken, die LEHMANN¹⁾ neuerdings mitgeteilt hat. Durch genaue markscheiderische Messungen hat er gefunden, daß sich bei der Pingenbildung über bergbaulichen Hohlräumen an der Erdoberfläche und bis zu einer gewissen Tiefe beträchtliche horizontale Druck- und Zugspannungen äußern. Die Anwendung seiner Ergebnisse auf das tektonische Bild des rheinisch-westfälischen Steinkohlengebirges²⁾ hat derartig verblüffende Ähnlichkeiten zwischen den Erscheinungen der Pingenbildung und einem geologisch-tektonischen Bewegungsbild ergeben, daß man versucht ist zu sagen: Die Geosynklinalen (Tröge) sinken über weichender Unterlage ein; während der Senkung entstehen auf den Trogrändern neben geringen Hebungen Zerr- und Böschungssprünge (Staffelbrüche), die dem Trogrand im allgemeinen parallel laufen; innerhalb des Troges treten intensive Druckspannungen auf, die längere Zeit latent bleiben, kulminieren und dann episodisch zur Faltung und Überschiebung führen; Intensität der Faltung und Zerrung nimmt mit der Tiefe ab. Diese den Ergebnissen LEHMANNs entsprechenden Schlußfolgerungen sind geeignet, neues Licht auf viele geologische Vorgänge und Erscheinungen zu werfen. Aber auch LEHMANNs Theorie erörtert nicht die Grundursachen. Seine Voraussetzungen sind wie bei AMPFERER und Anderen Bewegungen im tiefen Untergrunde.

Auf weitere örtliche Vorgänge einzugehen, die Faltungen, Stauungen, Schleppungen, Niveauschwankungen usw. erzeugen können, würde zu weit führen. Wie schon gesagt, sind die Zwischenvorgänge mit allen ihren Durchkreuzungen und Komplikationen unendlich mannigfaltig. Sie sind auch in Einzelbetrachtungen nicht restlos zu erfassen.

Kritik der Kontraktionstheorie.

Der eingehendsten Prüfung bedarf Gültigkeit und Begrenzung der Kontraktionstheorie, des einzigen Deutungsversuches, der bis zur Erfassung einer Grundursache, der Verringerung des Vorrats der Erde an kinetischer Energie durch Strahlung in den Weltenraum, vordringt.

¹⁾ K. LEHMANN, Bewegungsvorgänge bei der Bildung von Pingen und Trögen. Glückauf, Essen 1919, S. 933ff.

²⁾ K. LEHMANN, Das rheinisch-westfälische Steinkohlengebirge als Ergebnis tektonischer Vorgänge in geologischen Trögen. Glückauf, Essen 1920, Nr. 15. Vgl. auch H. QUIRING, Über Gebirgsentstehung aus Geosynklinalen. Eine Besprechung. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, 1920.

Für viele tektonische Erscheinungen war sie eine brauchbare Arbeitshypothese; namentlich zur Erklärung der Entstehung der Faltengebirge. Die ausgezeichnete kurze Erläuterung, die DANA¹⁾ für die erste Umsetzung der sich aus der Schrumpfung des Erdkerns herleitenden Bewegungsvorgänge gegeben hat: »die zentripetale Kraft der nachsinkenden Erdkruste setzt sich in tangentialer Spannung um« und der Satz von SUSS²⁾: »die sichtbaren Dislokationen in dem Felsgerüste der Erde sind das Ergebnis von Bewegungen, welche aus der Verringerung des Volumens unseres Planeten hervorgehen«, haben bis zur heutigen Zeit der Kontraktionstheorie vor allen anderen den Vorrang verschafft. Selbst Geophysiker, die wohl zuerst die Schwäche der Theorie erkannt haben, betrachten diese von den tektonischen Erscheinungen ausgehende Theorie als die einleuchtendste Erklärungsart der Gebirgsbildung.

Bei der Beurteilung der Theorie bedürfen zwei Beziehungen der Erörterung:

1. Die geophysikalischen Vorbedingungen,
2. die zeitliche Begrenzung.

Daß sich zahlreiche tektonische Vorgänge, wie kontinentale Hebungen, Schollenbewegungen unter tangentialer Zerrung, ferner vulkanische Erscheinungen nicht ohne weiteres durch die Schrumpfung des Erdkerns erklären lassen, kann im Hinblick auf die eingangs geäußerte Anschauung, daß es keine allgemeine und zeitlich unbegrenzte Grundursache der Gebirgsbildung gibt, nicht wundernehmen. Es wird sich im zweiten Teile der Arbeit Gelegenheit bieten, auf einige dieser Fragen zurückzukommen. Dort wird auch der von AMPFERER gemachte Einwand gegen die Theorie, daß sich die aus zentripetalem Zug ergebende Gewölbedruckspannung auf große Entfernungen nicht fortpflanzen könne, einer Kritik unterzogen werden.

Die geophysikalischen Vorbedingungen der Kontraktion.

Die Grundlagen der Kontraktionstheorie sind:

1. Der Temperaturabfall im Laufe der geologischen Zeiten.
2. Die geringere Zusammenziehung der Erdrinde gegenüber der stärkeren Kontraktion des Erdkerns.

a) Der Temperaturabfall.

Im Gegensatz zum kalten Weltenraum besitzt die Erde eine beträchtliche Eigenwärme, die von der Oberfläche, deren mittlere Temperatur auf der Nordhalbkugel zu 15,5°, auf der Südhalbkugel zu 13,6° C berechnet wird, aus in annähernd stetiger Progression zunehmend, im Innern der Erde auf mehrere tausend Grad anwächst.

¹⁾ J. D. DANA, Origin of Mountains. American Journal of Sc. and A. New Haven 1873.

²⁾ E. SUSS, Das Antlitz der Erde. I. Wien 1883. S. 143.

Die Wärme der Erdoberfläche entspringt zum weitaus größten Teile der Sonnenbestrahlung. Bei Nichteinwirkung der Sonnenwärme würde die Temperatur der Erdoberfläche bereits weit unter den Gefrierpunkt gesunken sein. Über die Herkunft der Innenwärme sind sich die Geophysiker nicht einig. Zum Teil dürfte sie ihren Ursprung in der beim Übergang vom gasförmigen zum flüssigen und vom flüssigen zum festen Zustande freigewordenen Verdampfungs- bzw. Schmelzwärme haben.

Der Unterschied zwischen Innenwärme und Oberflächenwärme bedingt, daß die Innenwärme ständig bestimmte Wärmemengen durch Leitung und Strahlung an die Erdoberfläche und unter deren Vermittlung an die Lufthülle und den Weltenraum abgibt. Wenn dieser Wärmeverlust auch durch radioaktive Umsetzungen¹⁾ oder andere Momente²⁾ verzögert wird, so zeigt uns doch der Vergleich der derzeitigen Wärmekapazität der Sonne und der in der Umformung noch nicht so weit vorgeschrittenen Planeten Jupiter und Saturn mit derjenigen der kleinen Planeten und Monde, daß die Erde bis zu ihrer oberflächlichen Erstarrung und auch weiterhin ständig Wärme verloren haben muß. Der allgemeine Temperaturabfall wird auch durch geologische Erfahrungen — die im Paläozoikum und Känozoikum beobachteten und bisher ungeklärten Schwankungen können an dieser Gesamterscheinung nichts ändern — belegt³⁾.

Die erste Vorbedingung der Kontraktionstheorie kann als gesichert gelten⁴⁾. Sie hat nur eine zeitliche Begrenzung, die jedoch für unsere Aufgabe vernachlässigt werden kann.

b) Die stärkere Zusammenziehung des Erdkerns gegenüber der Erdrinde.

Die Beurteilung der zweiten Vorbedingung der Kontraktionstheorie macht die Beantwortung dreier Fragen notwendig. Für das verschiedene Maß der Zusammenziehung können drei Gründe verantwortlich gemacht werden:

1. eine verschiedene stoffliche Zusammensetzung der Erdrinde und des Erdkerns,
2. verschiedener Aggregatzustand,
3. verschiedener Temperaturabfall.

¹⁾ Vgl. F. v. WOLFF, Die vulkanische Kraft und die radioaktiven Vorgänge in der Erde. Ztschr. d. Deutsch. geol. Ges. Abh. 1908. S. 431 ff.

²⁾ Die Innenwärme wird z. B. auch durch die Gebirgsbildung beeinflusst, so daß der Temperaturabfall periodische Unterbrechungen erfährt. (Vgl. S. 223 u. 224.)

³⁾ Vgl. E. KAYSER, Allgemeine Geologie. 5. Auflage. Stuttgart 1918. S. 89.

⁴⁾ Nach H. HERGESELL (Die Abkühlung der Erde und die gebirgsbildenden Kräfte. GERLANDS Beiträge zur Geophysik. Stuttgart 1894. S. 181) würde die Abkühlung der Erde um 42° C., heutige Verhältnisse vorausgesetzt, einer Zeit von 100 Millionen Jahren entsprechen. Hätten sich Erdinneres und Erdrinde gleichmäßig um 42° abgekühlt, so wäre die dadurch bedingte Radiusverkürzung auf 2,68 km zu veranschlagen.

Stoffliche Zusammensetzung.

Für die derzeitigen Vorstellungen von der stofflichen Beschaffenheit des Erdinnern sind die Ergebnisse maßgebend, zu denen die Untersuchungen WIECHERTS und seiner Schüler über die Fortpflanzungsart von Erdbenenwellen geführt haben. Danach besteht die äußere Schale, der 1200 km mächtige Mantel der Erde, aus Gesteinen von der Dichte 2,6 bis 3,4. Jenseits der in 1200 km Tiefe liegenden ersten »Unstetigkeitsfläche« soll eine aus dichteren Massen (Dichte 6 bis 7,2) bestehende mittlere Zone und jenseits einer zweiten Unstetigkeitsfläche in 2900 km Tiefe der 7000 km dicke Metallkern liegen, dessen spez. Gewicht zu 8 bis 9,2 berechnet wird¹⁾.

Nehmen wir die Mächtigkeit der von tektonischen Störungen betroffenen festen Erdrinde zu 30 km an, bestehend in der Hauptsache aus Sedimentgesteinen, kristallinen Schiefen und Eruptivgesteinen von der mittleren Dichte 2,6 bis 3,0, so liegt ihre lineare Wärmeausdehnungszahl zwischen 0,000008 (Kalkstein) und 0,000014 (Tonschiefer). Wird zunächst von der elastischen Zwischenschicht abgesehen — s. weiter unten — und das tiefere Erdinnere als zähflüssig oder doch — in Ansehung der abnormen Druckverhältnisse — als dem festen Aggregatzustande gleich erachtet, so können wir für das Erdinnere eine lineare Ausdehnungszahl von 0,000015 (Eisen bei höherer Temperatur) und 0,000013 (Nickel) voraussetzen. Die stofflich verschiedene Zusammensetzung gibt uns somit keine genügende Handhabe zu Schlüssen, die eine geringere Zusammenziehung der Erdrinde gegenüber dem Erdkern wahrscheinlich machen. Vielmehr ist die gegenteilige Anschauung berechtigt, da wir annehmen müssen, daß die gewaltigen Druckverhältnisse innerhalb des Metallkerns die für normalen Druck gültige Ausdehnungszahl beträchtlich verkleinern.

Aggregatzustand der Magmaschicht.

Verwickelter wird die Beurteilung, wenn wir die Möglichkeit ins Auge fassen, daß sich das Erdinnere in einem anderen Aggregatzustand befindet als die Erdrinde. Die Frage ist von großer Bedeutung, denn mit der Entscheidung über den Aggregatzustand der plastischen Zwischenschicht (Ausgleichszone HELMERTS) steht und fällt die geophysikalische Grundlage der Kontraktionshypothese. Weniger aus dem Grunde, weil die Ausdehnungszahlen für den flüssigen bzw. den festen Aggregatzustand verschieden sind — die Verschiedenheit ist in Ansehung der gewaltigen Druckverhältnisse im Erdinnern so gering, daß sie als unwesentlich betrachtet werden kann —, als vielmehr aus dem Grunde, weil nach den Erfahrungen, die mit den meisten irdischen Stoffen gemacht worden sind, — TAMMANN will nur Wasser und Wismut

¹⁾ W. KLUSMANN, Über das Innere der Erde. GERLANDS Beitr. zur Geophysik 1915. Bd. 14.

als Ausnahme gelten lassen — der Übergang vom flüssigen zum festen Zustand mit nicht unbeträchtlicher Volumverminderung (Schwinden)¹⁾ verknüpft ist, die sehr wohl beim ständigen Tieferrücken der Erstarrungszone eine erhebliche Kontraktion des Erdinnern gegenüber der Erdschale zur Folge haben kann.

Es sind folgende Fragen zur Entscheidung zu bringen:

- a) Ist die plastische Unterlage der Erdrinde fest oder flüssig?
- b) Wie groß ist unter den gewaltigen Drucken in der Tiefe das Schwinden des Magmas beim Übergang vom flüssigen zum festen Zustand?

Über die Mächtigkeit der festen Kruste und die obere Grenze der plastischen Zone bestehen verschiedene Ansichten. Von vornherein dürfte es sicher sein, daß die Mächtigkeit der Kruste nicht überall gleich ist. Örtliche Abkühlungsverhältnisse, vulkanische Herde werden sie erheblich beeinflussen. Die verschiedenen gefundenen geothermischen Tiefenstufen unterstützen diese Anschauung. Wie sich aus der weiter unten gegebenen Berechnung ergibt, dürften die Annahmen von WIECHERT, HELMERT und ARRHENIUS, welche die plastische Unterlage in 20 bis 120 km Tiefe verlegen, den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen.

Die Streitfrage über den Aggregatzustand der plastischen Zone dürfte durch die Untersuchungen TAMMANNs einer Klärung entgegengeführt und zugunsten des zähflüssigen Zustandes entschieden sein.

Für die Abhängigkeit des Schmelzpunktes von Silikatschmelzlösungen vom Druck gilt nämlich die Gleichung

$$\frac{dT}{dp} = 10,333 \cdot \frac{T(v_1 - v_2)}{E \cdot R},$$

worin T = Temperatur im Schmelzpunkt (abs.), p = Druck, $E = 425$, R = latente Schmelzwärme. $v_1 - v_2$ ist der Unterschied der spezifischen Volumina des Körpers in flüssigem und festem Zustande. $\frac{dT}{dp}$ ist die Änderung des Schmelzpunktes je Atmosphäre Druckerhöhung.²⁾

TAMMANN³⁾ hat nun nachgewiesen, daß für Verbindungen ebenso wie für Mineralien $v_1 - v_2$ bei gewöhnlichem und bei mäßig hohem Druck positiv ist, das heißt, daß im Schmelzpunkt der flüssige Körper

¹⁾ BABUS (The Fusion Constants of Igneous Rock. Phil. Mag. London 1893) hat für einen Diabas das räumliche Schwindmaß bei normalen Druckverhältnissen zu 3,9% bestimmt. R. A. DALY (The Mechanics of Igneous Intrusion. Amer. Journ. of Sc. XV und XVI. 1903) und DOELTER (Beziehungen zwischen Schmelzpunkt und chemischer Zusammensetzung der Mineralien. Tscherm. Min.-petr. Mitt. Bd. 22. 1903) haben für andere Gesteine ähnliche Werte gefunden.

²⁾ Vgl. J. H. L. VOGT, Die Silikatschmelzlösungen mit besonderer Rücksicht auf die Mineralbildung und die Schmelzpunkterniedrigung. II. Christiania 1904. S. 208.

³⁾ TAMMANN, Kristallisieren und Schmelzen. Leipzig 1903.

einen größeren Raum einnimmt als der feste, daß dagegen bei steigendem Druck $v_1 - v_2$ immer kleiner wird,

bei sehr hohem Druck gleich 0,

bei noch höherem Druck negativ wird.

Hieraus folgt, daß in einem Druck-Temperatur-Diagramm die Umwandlungskurve eines Minerals bei wachsendem Druck zuerst geradlinig, dann asymptotisch bis zum maximalen Schmelzpunkt ansteigt. Bei noch höherem Druck senkt sich die Kurve wieder.

Nach einer Mitteilung von TAMMANN an DOELTER¹⁾ ist der Druck, bei welchem der maximale Schmelzpunkt liegt, auf 40 000 Atm. zu schätzen, 150 km Tiefe entsprechend (bei Annahme einer mittleren Dichte von 3,7).

Die von BARUS²⁾ für Diabas berechnete Erhöhung des Schmelzpunktes je Atm. Druckerhöhung

$$\frac{dT}{dp} = 0,025 \text{ (bei relativ niedrigem Druck)}$$

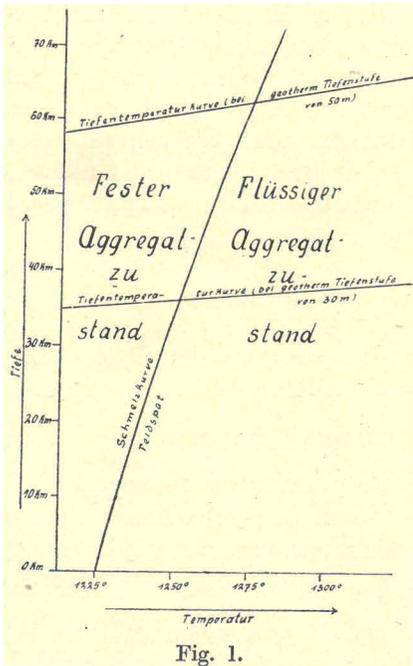


Fig. 1.

ist von VOGT auf 0,005 reduziert worden. Die von ARRHENIUS, DALY, DOELTER u.a. unter Zugrundelegung der Konstante BARUS' gezogenen Schlüsse über die Mächtigkeit der Erdrinde und die obere Grenze der Magmaschicht bedürfen demnach einiger Änderungen.

In dem beistehenden Diagramm (Fig. 1) sind die Umwandlungskurve des Feldspats oder Augits (normaler Schmelzpunkt 1200) für die Tiefen von 0 bis 70 km, ferner die sich aus einer geothermischen Tiefenstufe von 30 bzw. 50 m ergebende Tiefentemperaturkurven eingetragen.

Der Schnittpunkt gibt die Tiefe bzw. Temperatur an, bei der das bezeichnete Silikat in flüssigen Zustand übergeht. Er liegt bei Annahme einer geothermischen

Tiefenstufe von 30 m bei 37 km Tiefe, bei Annahme einer Tiefenstufe von 50 m bei 65 km.

Da der Schmelzpunkt der am Aufbau der Erdrinde wesentlich

¹⁾ DOELTER, Zur Physik des Vulkanismus. Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. Wien, Math.-naturw. Kl. Bd. 112, Abt. I. 1903.

²⁾ BARUS, The Fusion Constants of Igneous Rock. Phil. Mag. London. Ser. 5. XXXV. 1893, und U. S. Geol. Surv. 1893. Bull. 103.

beteiligten Silikate zwischen 1100° und 1300° liegt, so muß, wenn man die geothermische Tiefenstufe zu 50 m annimmt, in 70 bis 80 km Tiefe trotz des dort herrschenden großen Druckes von etwa 20 000 Atmosphäre der größte Teil der Gesteine sich in feurig-flüssigem Zustande befinden. Die Mächtigkeit der Übergangszone dürfte auf 30 bis 40 km (zwischen 900° und 1800° C.) zu veranschlagen sein.

In Anbetracht des hohen Druckes kann das Magma sich nur in zähflüssigem, stark zusammengedrücktem Zustande befinden.

Mit diesen Berechnungen und Anschauungen der Mineralogen und Geophysiker stehen die neuesten Untersuchungen der Geodäten in guter Übereinstimmung. Bei Behandlung der Frage nach dem Starrheitsgrade der Erdrinde und des Erdinnern gegenüber der Anziehung durch Sonne und Mond kommt SCHWEYDAR¹⁾ zu dem Ergebnis, daß »die Annahme einer ungefähr 600 km dicken, zähflüssigen Schicht, deren Zähigkeitskoeffizient von der Ordnung 10^{13} bis 10^{14} ²⁾ ist, unterhalb einer etwa 120 km dicken Erdrinde mit den Beobachtungen im Einklang steht«. »Mit Sicherheit kann geschlossen werden, daß unterhalb der Erdrinde sich eine leichtflüssige, z. B. mit geschmolzenen Metallen vergleichbare Schicht von auch nur geringer Mächtigkeit nicht befindet.«

In diesen wohlbegründeten Feststellungen — über die Zähflüssigkeit bzw. die molekulare Elastizität der Zwischenschicht und des Erdinnern sind sich alle Forscher einig — haben wir einen Ausgangspunkt erlangt für die Beantwortung der Frage nach dem Maß der Zusammenziehung beim Übergang vom flüssigen zum festen Zustand, der als Vorbedingung für die Gültigkeit der Kontraktionstheorie zu betrachten ist. Die Frage läßt sich in Anlehnung an die obige Berechnung der Lage der Magmazone auf die Formel bringen: wie groß ist die Differenz $v_1 - v_2$ bei Drucken von 15 000 bis 30 000 Atm., d. h. in Tiefen von 50 bis 120 km? Da bei Drucken von 40 000 Atm. bereits der maximale Schmelzpunkt für die Silikate liegt, bei dem $v_1 - v_2 = 0$ ist, so können wir ohne weiteres schließen, daß die Differenz sehr klein sein wird, demnach also von einem »Schwinden in dem für normale Druckverhältnisse beobachteten Ausmaß« (räumlich 0,02 bis 0,04) nicht gesprochen werden kann. Lediglich eine kontinuierliche Zusammenziehung, wie oben für feste Körper angegeben, dürfte anzuerkennen sein.

Der Aggregatzustand des Erdkerns.

Zu dem Ergebnis, daß die Differenz der Kontraktion der äußeren und inneren Erdschale zur Erklärung der Gebirgsfaltung nicht ausreicht,

¹⁾ W. SCHWEYDAR, Untersuchungen über die Gezeiten der festen Erde und die hypothetische Magmaschicht. Veröffentl. d. Kgl. Pr. Geodät. Instituts. N. F. Nr. 54. Potsdam 1912.

²⁾ Kolophonium (R. REIGER, Über innere Reibung plastischer und fester Körper. Diss. Erlangen 1901) 10^{12} (46° C) bis 10^{15} (20° C), Stahl (BARUS, Phil. Mag. 1850) 10^{16} bis 10^{18} .

ist auch ZÖPFRITZ¹⁾ gelangt. Um die Kontraktionstheorie zu stützen, vertritt er die Anschauung, daß nur ein gasförmiges Erdinnere einen genügend großen Ausdehnungskoeffizienten voraussetze, um den Unterschied in der Kontraktion zu ermöglichen.

Dieser Einwurf nötigt zu einer kurzen Behandlung der Frage des Aggregatzustandes des Erdkernes. Ob er fest oder zähflüssig²⁾ ist, dürfte nach der obigen Erörterung für das vorliegende Problem belanglos sein.

Nach dem Vorgange von ZÖPFRITZ und RITTER³⁾ haben in neuerer Zeit ARRHENIUS und S. GÜNTHER die Anschauung von dem gasförmigen Aggregatzustand des Erdinnern vertreten. Sie nehmen an, daß die zähflüssige Zwischenzone in bestimmter Tiefe (ARRHENIUS nimmt 300 km an) von der Zone der Gase abgelöst würde. Diese Anschauung gründet sich auf die mechanische Wärmetheorie, nach der Gase oberhalb der kritischen Temperatur sich nicht mehr verflüssigen lassen.

Gegen diese Auffassung sprechen zunächst die Ergebnisse der Versuche TAMMANN'S, die es wahrscheinlich gemacht haben, daß bei genügendem Druck alle Stoffe in flüssigen bzw. festen Zustand übergehen. Die Streitfrage, die so lange bestand und die auch zu der Hypothese des gasförmigen Erdinnern geführt hat, ob bei zunehmendem Druck und bei zunehmender Temperatur der potentiellen oder der kinetischen Energie die Entscheidung über den Aggregatzustand zufällt, kann demnach als zugunsten des Druckes (wenigstens vorläufig) zur Erledigung gebracht gelten.

Aber auch wenn wir die Möglichkeit eines gasförmigen Kernes zugeben, so zeigt uns schon die hohe Dichte des Erdinnern, daß unter Berücksichtigung des über 40 000 Atm. betragenden Druckes wir den überkritischen Gasen lediglich die Eigenschaften fester Körper zubilligen dürfen. In der Tat unterscheidet sich die Auffassung ARRHENIUS⁴⁾ von derjenigen anderer Geophysiker, die ein festes Erdinnere annehmen, nur theoretisch, hebt er doch hervor, daß das Erdinnere eine äußerst zähflüssige Masse bilde, die etwa die Eigenschaften von Asphalt bei niedrigerer Temperatur, von Pech, Siegellack oder Glas besitze. Die Starrheit der Erde vergleicht er mit derjenigen des Stahles. Damit entfällt die Möglichkeit, etwa unter Zugrundelegung der Gesetze von GAY-LUSSAC und MARIOTTE für das gasförmige Erdinnere einen größeren Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturänderung annehmen zu können als für einen amorph-glasigen festen Körper.

1) ZÖPFRITZ, Verh. des deutschen Geographentages 1881.

2) Der für das Innere der Erde angenommene feste Zustand (s. u.) ist nicht als stabil zu betrachten, da nach den Untersuchungen TAMMANN'S sehr hoher Druck den festen Zustand nicht begünstigt.

3) RITTER, Wiedemanns Annalen 1878. S. 422.

4) ARRHENIUS, Lehrbuch der kosmischen Physik. Leipzig 1903. I. S. 283.

Stärkerer Temperaturabfall des Erdkerns gegenüber der Erdrinde.

Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß die Erdoberfläche seit der Bildung der ersten Sedimente einen geringeren Temperaturabfall erlitten hat als die tieferen Teile der Gesteinschale. Hierfür spricht die bereits erwähnte Tatsache, daß ohne die Sonnenbestrahlung die Temperatur der obersten Schichten der Erdrinde bereits weit unter den Gefrierpunkt gesunken wäre. Es fragt sich nun, ob diese Verzögerung der Abkühlung der Oberfläche als gebirgsbildender Faktor herangezogen werden kann.

Nehmen wir an, daß seit dem Flüssigwerden des Wassers die Oberfläche der Erde sich um 85° , der Erdkern dagegen um 140° abgekühlt habe, so erhalten wir bei Annahme eines linearen Ausdehnungskoeffizienten von 0,00001 eine Differenz in der radialen Zusammenziehung von $350 \text{ m} = 0,005\%$, eine Größe, deren Kleinheit anzeigt, daß diesem verschiedenen Temperaturabfall eine wesentliche Bedeutung für die Gebirgsbildung nicht zukommen kann. Sie würde nicht genügen, die Gesteine der Erdoberfläche auch nur um $0,01$ Grad aus ihrer horizontalen Lage zu bringen. Bei Konzentrierung der Faltung auf eine beschränkte, etwa 100 km breite, die Erde auf einem Kreise umspannende Zone, würde das berechnete Maß der Kontraktion eine Neigung der Schichten um $0,6$ Grad erzeugen können.

Die Bedeutung der Kontraktion für die Gebirgsbildung in archaischer Zeit.

Wir haben gesehen, daß alle durch physikalische, seismische, geodätische Feststellungen und Berechnungen gewonnenen Erkenntnisse über das Erdinnere dahin zusammenlaufen, daß eine leichtflüssige Magmazone oder ein leichtflüssiger Erdkern nicht vorhanden sein können. Elastizität, Dichte, Druckverhältnisse sprechen vielmehr dafür, daß wir den Stoffen in größeren Tiefen mit gewissen Einschränkungen ähnliche Eigenschaften zuerkennen müssen, wie sie die feste Erdschale besitzt. Damit ist die wichtigste Vorbedingung für die Gültigkeit der Kontraktionstheorie, die von ihr vorausgesetzte stärkere Zusammenziehung des Erdkerns gegenüber der Erdschale, nicht gegeben.

Können wir also mit Gewißheit sagen, daß im heutigen Entwicklungszustand der Erde die Schrumpfung des Erdkerns für die Gebirgsbildung von untergeordneter Bedeutung ist, so gewinnen wir ein etwas anderes Ergebnis, wenn wir die Beurteilung auf frühere Bildungsperioden der Erdrinde ausdehnen.

Der Hauptgrund für das heutige Fehlen einer leichtflüssigen Magmazone ist darin zu suchen, daß die Erstarrung der Erdrinde bereits bis in Tiefen vorgedrungen ist, wo die Drucke so groß geworden sind, daß infolge der starken Kompression Zähflüssigkeit herrschen muß. Verlegen wir jedoch die Magmazone in geringere Tiefen, so erhalten wir die Mög-

Der säkulare Abfall der Erdtemperatur als Ursache tektonischer Bewegungen.

Phase	Temperatur der Erdoberfläche. — Hülle	Zustand der Magmazone		Motorische Vorgänge in der Erdrinde und in der Magmazone	Tektonische Erscheinungen in der Erdrinde
		in 10 bis 30 km Tiefe	in 30 bis 120 km Tiefe		
I.	6000°—1300° weißglühend — Größtenteils dissoziierte Gase	Dünnflüssig	Durch Druck zähflüssig	—	—
II.	1300°—900° weißglühend, später rotglühend — Kohlenoxyd, Wasserdampf usw.	Dünnflüssig	Durch Druck zähflüssig	Langsames Erstarren der Rinde. Zusammenziehung des dünnflüssigen Magmas	Erste Krustenbildung Leichtere Schlackenmassen (Continentalblöcke) auf schwererer, noch flüssiger Unterlage schwimmend
III.	900°—700° dunkelrotglühend — Luft, Wasserdampf, Kohlensäure	Dünnflüssig, später oberste Teile zähflüssig	Durch Druck zähflüssig	Nach völliger Erstarrung raschere Temperaturabnahme d. Erdoberfläche. Wärmeabfall i. d. Magmazone geringer. Daher Entstehung tangentialer Zugspannungen in der Erdrinde	Erste Spaltenbildung an der Oberfläche. Erste Anlage d. Schwächezonen (Geosynklinalen)
IV.	700°—50° — Luft, Wasserdampf und Wasser, Kohlensäure	Oben zähflüssig, unten dünnflüssig. Später oben fest, unten zähflüssig	Durch Druck zähflüssig	Wärmegrad der Erdoberfläche nähert sich langsam der durch die Sonnenbestrahlung gegebenen Temperatur. Temperaturabfall von Oberfläche und Magmazone etwa gleich. Später Abfall an der Oberfläche geringer. Magmazone von oben her zähflüssig u. fest werdend. Durch den Übergang vom dünnflüssigen zum zähflüssigen bzw. festen Zustand stärkere Zusammenziehung der Magmazone. Entstehung von tangentialen Druckspannungen in der Erdkruste	Allgemeine Runzelung der Erdoberfläche. Bildung der archaischen Falten
V.	50°—0° — Luft, Wasser, Kohlensäure mehr u. mehr zurücktretend	Fest	Durch Druck zähflüssig, später von obenher durch Temperaturabfall fest werdend	Wärmegrad der Erdoberfläche nur geringfügig verändert. Magmazone geht langsam fortschreitend vom zähflüssigen zum festen Zustand über. Der verschiedene Temperaturabfall von Rinde und Magmazone hat nur eine um wenig stärkere Zusammenziehung des Erdinnern gegenüber dem Erdkern zur Folge. Die hierdurch erzeugten tangentialen Druckspannungen in der Erdrinde sind gering	Einfluß der Kontraktion auf die Faltenbildung von unwesentlicher Bedeutung

lichkeit, in Anbetracht des geringeren Druckes (etwa zwischen 3000 und 10 000 Atm.) Leichtflüssigkeit annehmen zu können. Diese Verhältnisse müssen einmal bestanden haben.

Die kristallinen Schiefer archaischen Alters zeigen nirgends auf der Erdoberfläche ruhige Lagerungsformen. Alle sind mehr oder weniger verworfen oder gefaltet. Es besteht kein Zweifel, daß zur Zeit ihrer Bewegung tektonische Kräfte mehr als jetzt über die ganze Erde hin wirksam waren, nicht wie in den postarchaischen Zeiten lediglich zonenweise Faltengebirge aufgetürmt haben.

Der Schluß erscheint gerechtfertigt, diese über die ganze Erdoberfläche hin sichtbaren Erscheinungen als Äußerungen einer stärkeren Kontraktion des Erdkerns gegenüber der Kruste anzusehen.

Hierzu ist es notwendig, die Geschichte der Erde in rohen Umrissen (vgl. die tabellarische Übersicht auf S. 212) zu betrachten.

Die erste geschlossene Rindenbildung fällt demnach in die dritte Phase. Unter der festen obersten Schale kann noch das Vorhandensein dünnflüssiger Massen (bei Annahme einer geothermischen Tiefenstufe von 20 m¹) erhalten wir, von 800° Oberflächentemperatur ausgehend, bereits in 10 km Tiefe trotz des dort herrschenden Druckes von 2600 Atmosphären Dünnflüssigkeit der Silikate) angenommen werden. Wie die Tabelle zeigt, sind jedoch erst in der vierten Phase die Vorbedingungen für eine stärkere Runzelung der Rinde gegeben, da erst in dieser Phase ein erheblicher Unterschied in der Kontraktion des Erdinnern gegenüber der Erdrinde sich äußern dürfte. In dieser Phase würde dann die ganze dünnflüssige Magmazone in den zähflüssigen bzw. festen Zustand überführt worden sein. Berücksichtigen wir dazu noch den geringeren Temperaturabfall an der Erdoberfläche gegenüber demjenigen des Erdinnern, so erhalten wir für die archaische Zeit eine Kontraktion des Kerns, die zweifellos für die Runzelung der Erdrinde von Bedeutung gewesen sein muß. Die geringen Kontraktionszahlen jedoch, die uns eine überschlägige Berechnung gibt, zeigen, daß der größere Anteil auch an der Gebirgsbildung im Archaikum derselben Grundursache zufällt, die für die postarchaischen tektonischen Bewegungen vornehmlich verantwortlich zu machen ist: der säkularen Verlangsamung der Achsendrehung der Erde.

II. TEIL.

Kritik der Retardationstheorie.

Fassen wir die bei der kritischen Betrachtung der Theorien der Gebirgsbildung bisher gewonnenen Ergebnisse zusammen, so erhalten wir:

Von der Kontraktionstheorie abgesehen, dringt keine der besprochenen Theorien zu einer Grundursache vor, die für die Gebirgsbildung von

¹) Die Tiefenstufe kann entsprechend der Beziehung, daß die Wärmeleitfähigkeit bei höherer Temperatur größer ist, für die archaische Periode geringer angenommen werden.

wesentlicher Bedeutung ist. Die von ihnen als Grundursachen angegebenen Vorgänge sind vielfach lediglich Zwischenbewegungen, deren Zurückführung auf Grundursachen bisher nicht gelungen ist. Nur die Kontraktionshypothese hat eine mit Sicherheit erkennbare und zeitlich fast unbeschränkte kosmische Grundlage: den säkularen Temperaturabfall der Erde. Dagegen ist die andere zur Gültigkeit der Hypothese notwendige Vorbedingung: die stärkere Schrumpfung des Erdkerns gegenüber der Erdrinde in Anbetracht des jetzigen Erkaltungszustandes der Erde zu geringer Bedeutung herabgesunken. In früheren Entwicklungsperioden der Erde war dieser Vorbedingung noch mehr entsprochen; sie hat somit an der Entstehung archaischer Rindenbewegungen einen wesentlichen Anteil.

Die Gebirgsbewegungen in nacharchaischer Zeit (einschließlich der huronischen Faltung), die Bildung der Schollengebirge aus Zerrung, die kontinentalen Hebungen und Senkungen harren demnach noch der Deutung, die über isostatische Vorgänge und Volumschwankungen im Untergrund hinweg ebenfalls in kosmischen Ursachen gefunden werden muß.

Von den bestehenden Theorien ist es nur eine, die uns diese Grundursachen vermittelt: die Theorie von der Verlangsamung der Achsendrehung der Erde durch Gezeitenreibung.

Nachdem in den achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts TAYLOR¹⁾ bereits darauf hingewiesen hatte, daß dieser Vorgang für die Gebirgsbildung bedeutungsvoll sein könne, hat BÖHM²⁾ VON BÖMERSHEIM in einer ausgezeichneten Studie die Theorie begründet und zur Gebirgsbildung in Beziehung gesetzt. Eigentümlicherweise hat der Erklärungsversuch BÖHMS in der geophysikalischen und geologischen Fachliteratur eine recht geteilte Aufnahme gefunden³⁾, wie es scheint infolge seiner zu abstrakten Durchführung, die sich mehr mit der zukünftigen Entwicklung der Abplattungsverhältnisse der Erde als mit der Vergangenheit und den geologischen Zeugnissen, die für die Theorie sprechen, beschäftigt. Zudem ist die Theorie — sie wird weiterhin kurz als Retardationstheorie bezeichnet werden — einer Ausgestaltung fähig, die BÖHM entgangen ist, einer Ausgestaltung, die allein in der Lage ist, der Schwierigkeiten und Widersprüche Herr zu werden, die sich bei Anwendung der BÖHMSchen Hypothese auf die irdischen geologischen Verhältnisse ergeben.

¹⁾ W. B. TAYLOR, Crumpling of the Earth's Crust. Am. J. Sci. 33. Ser. XXX. New Haven 1885. S. 249—266.

²⁾ A. BÖHM Edler VON BÖMERSHEIM, Abplattung und Gebirgsbildung. Leipzig und Wien 1910.

³⁾ Vgl. u. a. PÖCKELS, Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit der Erde als geologischer Faktor. Geol. Rundsch. 1911. S. 141—144. — K. ANDRÉE, Über die Bedingungen der Gebirgsbildung. Berlin 1914. S. 12—14.

Grundlagen.

a) Verlangsamung der Achsendrehung durch Gezeitenreibung.

Die ungleichen Rotationszeiten, die uns die zum Sonnensystem gehörigen Planeten und Monde zeigen, insbesondere die Tatsache, daß die noch nicht so weit in der Abkühlung vorgeschrittenen Planeten Jupiter und Saturn eine raschere Umdrehung aufweisen, machen es wahrscheinlich, daß die Achsendrehung nicht konstant ist, sondern sich dem Fortschreiten der Erstarrung der Weltkörper entsprechend verlangsamt. Als Endergebnis erscheint uns die Achsendrehung des Mondes, die so weit verzögert ist, daß für ihn Monat und Tag fast zusammenfallen.

Bei einem sich selbst überlassenen rotierenden Körper bleibt das halbe Produkt aus Winkelgeschwindigkeit und Trägheitsmoment konstant. Eine Änderung der Rotationszeit tritt also nur ein, wenn sich das Trägheitsmoment ändert. Wird das Trägheitsmoment größer, z. B. durch Vergrößerung der langen Halbachse, so wird die Umdrehungsgeschwindigkeit abnehmen, wird es kleiner, so wird sie zunehmen. Auf diese wichtige Beziehung wird noch zurückzukommen sein.

Nun ist aber die Erde kein sich selbst überlassener Körper, vielmehr wirken auf sie und damit auf ihre Umdrehungszeit äußere Kräfte ein, die — das Ergebnis mag vorweggenommen werden — eine Verlangsamung der Achsendrehung zur Folge haben.

Schon ROBERT VON MAYER¹⁾, der Schöpfer des Satzes von der Erhaltung der Energie, hat darauf aufmerksam gemacht, daß die Flutwelle eine verzögernde Wirkung auf die Geschwindigkeit der Achsendrehung ausüben müsse. Nicht in Präzession und Nutation erschöpfe sich der Einfluß der Sonnen- und Mondanziehung auf die Erde, sondern auch die Rotation werde durch die Anziehungskräfte verändert. Unaufhörlich schlage die der Drehung der Erde entgegengesetzte Mond- und Sonnenflutwelle an die Ostränder der Kontinente und trage dazu bei, die Energie der Rotationsbewegung zu verringern.

Seit diesem Hinweis hat die Frage die Geophysiker und Astronomen lebhaft beschäftigt. I. C. ADAMS, Lord KELVIN, HERTZ, SCHÖNFELD, G. H. DARWIN haben versucht, die Größe der Verzögerung festzustellen.

THOMSON (Lord KELVIN)²⁾ ging hier insofern weiter als MAYER, als er bei Beurteilung der Frage sich nicht allein auf die äußeren Gezeiten beschränkte, sondern auch die im Innern der Erde unter Voraussetzung einer gewissen Elastizität entstehenden Ebbe- und Fluterscheinungen heranzog. Daß tatsächlich Gezeiten der festen Erdkruste vorhanden sind, hat sich nicht nur aus der Tatsache ergeben, auf die G. H. DARWIN hingewiesen hat, daß die Meeresgezeiten langer Periode fehlen, sondern

¹⁾ Vgl. ZÖLLNER, Über die Natur der Kometen. Leipzig 1883. S. 118 ff.

²⁾ W. THOMSON, On the Rigidity of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London. 1863. S. 573—582.

auch einwandfrei aus neueren geodätischen Untersuchungen von C. HECKER und W. SCHWEYDAR¹⁾. Damit ist eine weitere wesentliche Grundlage für die Beurteilung der Frage gewonnen.

Bei der Berechnung des verzögernden Einflusses der Gezeitenreibung auf die Achsendrehung kommt ADAMS²⁾ zu dem Ergebnis, daß die Erde, als Zeitmesser betrachtet, im Verlauf eines Jahrhunderts um 22 Sekunden hinter einer gleichmäßig gehenden Uhr zurückbleibe. Danach würde die tägliche Verkürzung des Sterntages $328073 \cdot 10^{-13}$ Sekunden betragen³⁾. Vor 100 Millionen Jahren wäre demnach die Rotationszeit der Erde um etwa 20 Minuten kürzer gewesen als heute. Zu einem wesentlich anderen Ergebnis ist G. H. DARWIN⁴⁾ gelangt. Er nimmt an, daß früher der Mond der Erde näher gestanden habe als heute und daß infolge der dadurch verursachten intensiveren Gezeitenreibung in der Vorzeit die Achsendrehung sich erheblich rascher verlangsamt habe als heute. Er berechnete, daß vor 56 Millionen Jahren die Länge des Sterntages nur $6\frac{3}{4}$ Stunden, vor 46 Millionen Jahren $15\frac{1}{2}$ Stunden betragen habe. Untersuchungen englischer und amerikanischer Forscher haben ergeben, daß die von G. H. DARWIN gemachten Voraussetzungen nicht sicher sind. G. H. DARWIN hat sich mit dieser Kritik in neuerer Zeit abgefunden, jedoch nochmals⁵⁾ mit aller Entschiedenheit sich für eine verzögernde Wirkung der Gezeitenreibung auf die Achsendrehung der Erde ausgesprochen. Eine mittlere Stellung nimmt S. OPPENHEIM⁶⁾ ein. Nach seinem Ansatz wäre vor 100 Millionen Jahren der Sterntag $1\frac{3}{4}$ Stunden kürzer gewesen als heute.

Es ist bisher nicht gelungen, die Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit durch astronomische Beobachtungen einwandfrei zu bestätigen. Allerdings haben ADAMS und DELAUNAY⁷⁾ versucht, die durch NEWCOMB berechnete und bisher unaufgeklärte säkulare Störung der Mondbahn, die 5 Bogensekunden im Jahrhundert beträgt, zur Lösung des Problems heranzuziehen. Sie gingen hierbei von dem Gedanken aus, daß die beobachtete Beschleunigung in der mittleren Bewegung des

¹⁾ W. SCHWEYDAR, Beobachtungen der Änderung der Schwerkraft durch den Mond. Sitzungsber. d. Kgl. Preuß. Akad. d. Wiss. 1914. S. 454. Er gibt die maximale Amplitude der halbtägigen elastischen Tide zu 32 cm, für Potsdam zu etwa 12 cm an. Die Werte sind etwas zu groß, da aus ihnen die Einwirkung der Meeresgezeiten nicht eliminiert ist.

²⁾ THOMSON and TAIT, Treatise on Natural Philosophy. Cambridge 1903. S. 417—418.

³⁾ Vgl. F. R. HELMERT, Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. II. Leipzig 1884. S. 450.

⁴⁾ G. H. DARWIN, On the Precession of a Viscous Spheroid and on the Remote History of the Earth. Philos. Trans. Royal Soc. London 1879. S. 447.

⁵⁾ G. H. DARWIN, Tidal Friction and Cosmogony. Scientific Papers. II. Bd. Cambridge 1908. — Ders., Ebbe und Flut. Leipzig und Berlin 1911. S. 279.

⁶⁾ S. OPPENHEIM, Astronom. Nachrichten 1886. S. 208.

⁷⁾ Vgl. SCHÖNFELD, Neuere Untersuchungen über die Konstanz der Rotationszeit der Erde. Ausland 1879. S. 181 ff.

Mondes nicht wirklich, sondern nur scheinbar bestehe, verursacht durch eine entsprechende Änderung des mittleren Sonnentages, also des astronomischen Zeitmaßes.

Obwohl diesen Spekulationen¹⁾ schon wegen der Kleinheit der auftretenden Größen eine große Unsicherheit anhaftet, so kann doch mit Gewißheit gesagt werden, daß das tatsächliche Vorhandensein der Flutreibung — sowohl der Meereszeiten als auch der inneren Gezeiten — schon dafür spricht, daß ihnen auch eine Einwirkung auf die Achsendrehung zukommen muß. Es handelt sich lediglich darum, festzustellen, ob und inwieweit die durch die Verlangsamung der Achsendrehung hervorgerufenen Bewegungsvorgänge in der Erdrinde und im Erdinnern tektonische Erscheinungen erzeugen können.

b) Das hydrostatische Gleichgewicht des Erdsphäroids.

Die Verteilung des Wassers, die durch Messung festgestellte Abplattung²⁾ der Erde, das Verhältnis zwischen Schwere- und Zentrifugalbeschleunigung und die Berechnungen, die daran geknüpft worden sind, erweisen, daß sowohl an der Oberfläche als auch im Innern der Erde annähernd vollkommenes hydrostatisches Gleichgewicht vorhanden ist³⁾. Das Erdsphäroid entspricht mit gewissen Einschränkungen⁴⁾, die sich aus den Dichteunterschieden an der Oberfläche, der Dichtezunahme zum Kern hin, der eingeschränkten Elastizität der Erdrinde und des tieferen Erdinnern ergeben, der Gestalt einer rotierenden Flüssigkeit. Diese Tatsache ist es — neben der Beobachtung der inneren Gezeitenbewegung — vor allem gewesen, die bei den Geophysikern und Geodäten die bereits erwähnte Anschauung befestigt hat, daß zwischen der Erdrinde und dem starren Erdkern eine zähflüssige oder doch molekular plastische, nach SCHWEYDAR 600 km mächtige Zone vorhanden ist, die langsam wirkenden Kräften gegenüber sich wie eine wahre Flüssigkeit verhält.

Jede Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit muß daher zu Bewegungen in der Magmazonen und weiterhin zu einer Änderung der Sphäroidgestalt führen. Eine Verlangsamung hat eine Verkürzung der großen Achse (Äquatorialachse) und eine Verlängerung der Drehachse (Polarachse) zur Folge. Wäre die Erde völlig flüssig, so müßte ein anhaltendes Sinken des äquatorialen Wulstes und ein Steigen der Polarregion stattfinden. Die Abplattung würde sich verändern bis zu dem Grenzfall, daß Rotation und Abplattung den Wert Null annehmen.

¹⁾ Eine kurze Kritik gibt RUDZKI in seiner Physik der Erde. Leipzig 1911. S. 203—207.

²⁾ Nach HELMERT (1906) 1:298, 3.

³⁾ Vgl. hierzu WIECHERT, Über die Massenverteilung im Innern der Erde. Göttinger Nachrichten 1897. Heft 3. § 10. — W. KLUSSMANN, Über das Innere der Erde. Gerlands Beiträge zur Geophysik. Leipzig 1915. S. 13.

⁴⁾ Das Geoid weicht nach MESSERSCHMIDT (Annal. Hydrogr. u. marit. Meteorologie 1900) an keiner Stelle mehr als 50 m von der Ellipsoidoberfläche ab.

Tatsächlich durchläuft die Erdgestalt diese Deformationsreihe. Allerdings nicht in stetiger Folge, sondern mit Unterbrechungen, die sich aus den Abweichungen des reellen Zustandes eines Weltkörpers von dem idealen Gleichgewichtszustand eines flüssigen Körpers erklären. Daß nicht nur die aus der Tatsache der Gezeitenreibung zu ziehenden Schlüsse, sondern auch die Umdrehungs- und Abplattungsverhältnisse der Planeten und Monde des Sonnensystems eindeutig diesen Entwicklungsgang vorzeichnen, der allein durch die Verlangsamung der Achsendrehung hervorgerufen sein kann, bedarf nur eines kurzen Hinweises:

Planeten in früher Phase der Umformung (Dichte 0,8 bis 1,3):

	Rotationsdauer	Verhältnis zwischen Schwere- und Zentrifugalbeschleunigung	Abplattung
Jupiter	9 ^h 55 ^m	1 : 12	1 : 15
Saturn	10 ^h 29 ^m	1 : 6	1 : 10
Uranus	?	?	1 : 15

Planeten in vorgeschrittener Phase der Umformung (Dichte 4 bis 5,6):

	Rotationsdauer	Verhältnis zwischen Schwere- und Zentrifugalbeschleunigung	Abplattung
Erde	23 ^h 56 ^m	1 : 288	1 : 298
Mars	24 ^h 37 ^m	1 : 217	1 : 230

Soll die Änderung der Erdgestalt infolge Verlangsamung der Achsendrehung als gebirgsbildender Vorgang Anerkennung finden, so muß das Ausmaß der äquatorialen Achsenverkürzung hinreichen, um die bisher der Abkühlungskontraktion zugeschriebene zonare Gebirgsfaltung zu erklären.

Es mag von den tatsächlichen Verhältnissen ausgegangen werden. Ein Querprofil durch die bergmännisch vorzüglich aufgeschlossene Bochumer, Essener und Emscher Mulde des westfälischen Steinkohlengebirges zeigt, daß durch den oberkarbonischen Horizontaldruck eine nordsüdliche Verkürzung des Profils von 29 500 m auf 22 000 m, also um 7500 (25,4%) erfolgt ist. Übertragen wir diese Schubzahl auf die Teile des varistischen Gebirgsbogens, die als ebenso stark zusammengeschoben angesehen werden können, so erhalten wir bei einer jetzigen Breite von rund 170 km eine ehemalige Ausdehnung von rund 220 km. Das Gebirge hat also durch den Faltdruck eine Breitenverkürzung von rund 50 km erfahren. Diese Zahl stellt einen Mindestwert dar für die im Meridian des Rheines von der herzynischen Faltung betroffenen Gebirge. Werden nämlich alle im Karbon zusammengeschobenen Gebiete von den Alpen bis zu den Ardennen berücksichtigt, so ergeben sich Zahlen, die höher sind als der obige Wert.

Halten wir die von der Kontraktionstheorie her geläufige Vorstellung fest, daß die zonaren Gebirge randliche Faltenwülste sinkender Erdkalotten darstellen, deren Zentrum etwa unter dem Äquator gelegen ist, so müssen wir zur Erklärung eines unter 50° nördlicher Breite erfolgenden Zusammenschubes von 50 km (0,5% des Erdquadranten) eine Verkürzung des Äquatorradius von etwa 30 km voraussetzen.

Dieser Wert liegt in der Größenordnung, zu der auch frühere Berechner¹⁾ des Zusammenschubes durch Faltung gelangt sind.

Wie wenig diese beträchtliche Verkürzung des Erdradius durch die Kontraktionstheorie erklärt werden kann, ergibt eine einfache Rechnung:

Wird ein Längeschwindmaß von 0,012 beim Übergang vom flüssigen zum kristallisierten Zustand angenommen, so muß der Teil des Radius, der verfestigt worden ist, um eine Verkürzung von 30 km zu ergeben, fast 3000 km lang gewesen sein, d. h. allein zur Hervorbringung der herzynischen Faltung muß bei folgerichtiger Anwendung der Kontraktionshypothese etwa die Hälfte des Erdballes vom flüssigen²⁾ zum festen Zustand überführt worden sein.

Ähnliche Schwierigkeiten ergeben sich anscheinend bei Zugrundelegung der Retardationshypothese.

Unter der Voraussetzung, daß sich das Erdvolumen nicht verändert hat, muß der Verkürzung des Äquatorradius von rund 6407 auf 6377 km³⁾ eine Verlängerung der Polarachse von 6300 auf 6356 km, also um 56 km gegenüberstehen. Einer fünffachen Abplattung entspricht⁴⁾ eine Zunahme der Zentrifugalbeschleunigung auf etwa den viereinhalbfachen Wert. Nach der Gleichung

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{r_1 \cdot w_1^2}{r_2 \cdot w_2^2}$$

worin p_1 und p_2 die Zentrifugalkraft, r_1 und r_2 den Äquatorradius, w_1 und w_2 die Winkelbeschleunigung vor und nach der Achsenverkürzung bedeuten, berechnet sich die einstige Rotationsdauer zu 11^h 05^m.

1) C. E. DUTTON (A Criticism upon the Contractual Hypothesis. Amer. Journ. Sci. 1874. S. 121) nimmt eine Verkürzung des Erdhalbmessers seit der Kreide um 48 km, HEIM (Der Mechanismus der Gebirgsbildung. II. Basel 1878. S. 213) um 57 km an. Unter Berücksichtigung der neueren Annahmen vom Deckfaltenbau der Alpen (HEIM, Bau der Schweizer Alpen. Neujahrsbl. d. Naturf. Ges. Zürich 1908. 110. S. 24) müßten diese Zahlen für die tertiäre Faltung eine Erhöhung bis zu mehreren hundert km erfahren. Eine von mechanischen Prinzipien geleitete Kritik wird jedoch unzweifelhaft zu dem Ergebnis führen, daß dann das Alpengebirge nach der Aufstauchung mehrere Dutzend km hoch gewesen sein müßte.

2) Hierbei ist von den tatsächlichen Verhältnissen ganz abgesehen und das Schwindmaß unter normalen Druckverhältnissen vorausgesetzt worden.

3) Der Einfachheit wegen sind die jetzigen Längen zugrundegelegt.

4) Nach der Schätzung von B. PEIRCE, The Contraction of the Earth. Proc. Am. Acad. Arts and Sci. 1873, S. 106—108. Vgl. BÖHM, Abplattung und Gebirgsbildung. S. 32.

Zur Hervorrufung der Verkürzung der großen Halbachse um 30 km müßte demnach die Rotationsdauer der Erde von $11^h 05^m$ auf $23^h 56^m$ angewachsen sein.

Dieser unwahrscheinliche Wert, der unter Berücksichtigung der Verzögerungszahl OPPENHEIMS einem Zeitraum von etwa 700 Millionen Jahren entsprechen würde, macht die Abneigung verständlich, die bisher gegen die Retardationshypothese bestanden hat.

Da jedoch an der Tatsache der säkularen Verzögerung der Achsendrehung nicht zu zweifeln ist, darf trotz dieser Schwierigkeiten das Bestreben nicht aufgegeben werden, aus der richtigen Voraussetzung Schlüsse zu ziehen, die unsere Erkenntnis von den Ursachen der Gebirgsbildung fördern können.

In der Tat sind solche Schlüsse möglich, wir müssen uns nur in einigen Punkten Zurückhaltung auferlegen; wir dürfen zunächst nicht annehmen, daß der an der Erdoberfläche beobachtete Zusammenschub die ganze Rinde betroffen hat. Die Faltenbildung ist ein Vorgang, der mehr oder weniger nur die obersten Teile der Erdrinde beeinflusste. Im westfälischen Teil des rheinisch-westfälischen Steinkohlengebirges ist die Tiefe der intensiven Faltung der Wittener und Bochumer Mulde auf 3 bis 5 km zu veranschlagen. In den größeren Tiefen müssen wir weniger faltige, vielmehr molekular-plastische Umlagerungen voraussetzen, da die über Tage zu beobachtenden Dislokationen, z. B. Überschiebungen und Falten, die Möglichkeit des Ausweichens voraussetzen, die für die größere Tiefe nicht gegeben ist. Andererseits sind die Dislokationen in der Nähe der Oberfläche vielfach gewissermaßen nur Reaktionserscheinungen auf unterirdische Volumbewegungen und Schwankungen hin.

Trotz dieser Einschränkungen weist uns die zonare Anordnung der Faltengebirge und ihr einseitiger Aufbau immer wieder auf einen einseitigen, allerdings in manchen Fällen auch zweiseitigen tangentialen Rindendruck hin, dessen Intensität jedoch nicht nach der Breite der gefalteten Schichten bemessen werden darf, wie es oben geschehen ist. Wir dürfen dem Horizontaldruck lediglich eine Mitwirkung an der oberflächlichen Stauchung zuerkennen, ihn nicht als den alleinigen, unmittelbar wirkenden gebirgsbildenden Faktor betrachten. Bei der Entstehung der oberflächlichen Erscheinungen haben noch zahlreiche Zwischen- und Nebenvorgänge¹⁾, über die z. T. bereits gesprochen wurde, z. T. noch zu reden sein wird, mitgewirkt.

Nehmen wir diese Differenzierung und Potenzierung einer an und für sich feststehenden Grundursache an und gehen von dem Gedanken aus, daß zur Auslösung einer Faltenbewegung über Volumschwankungen im tieferen Untergrund und isostatische Vorgänge hinweg eine gewissermaßen ruckweise Verkürzung der großen Halbachse von 7,5 km aus-

¹⁾ Es sei an die Trogfaltung und -zerrung erinnert.

reicht, so erhalten wir bei Durchführung der Rechnung folgende Werte in runden Zahlen:

Verkürzung der halben Äquatorialachse	von 6384,5 auf 6377 km
Verlängerung der Polarachse	» 6342 » 6356 »
Abnahme der Abplattung	» $\frac{1}{150}$ » $\frac{1}{298}$ »
Verlängerung des Sterntages	» 17 ^h 02 ^m » 23 ^h 56 ^m

Für die vorhergehende orogenetische Phase würden sich folgende Werte ergeben:

Verkürzung der halben Äquatorialachse	von 6392 auf 6384,5 km
Verlängerung der halben Polarachse	» 6328 » 6341 »
Abnahme der Abplattung	» $\frac{1}{100}$ » $\frac{1}{150}$ »
Verlängerung des Sterntages	» 14 ^h 64 ^m » 17 ^h 02 ^m .

Die Bewegungsvorgänge im Erdinnern und in der Magmazone. (Strömungen und Volumschwankungen.)

Die postarchaischen Faltenbildungen sind zeitlich auf wenige geologische Formationen, örtlich auf verhältnismäßig geringfügige und in ihrer Lage bestimmte Teile der Erdoberfläche beschränkt. Dagegen zeigen die zahlreichen Trans- und Regressionen des Meeres und anhaltende Senkungen in der Vorzeit neben den Beobachtungen kontinentaler Bewegungen in der Gegenwart, daß den säkularen vertikalen Schwankungen der Kruste eine derartig enge zeitliche und örtliche Begrenzung fehlt. Der schon lange erkannte Gegensatz zwischen orogenetischen und epirogenetischen Bewegungen prägt sich nicht zum wenigsten in diesen Beziehungen aus. Eine Zwischenstellung nehmen die Schollenbewegungen ein, die unter Vermittelung von Sprüngen erfolgt sind. Bisher hat man sie meist dem Typus der orogenetischen Bewegungen zugezählt, doch hat der Verfasser¹⁾ bereits vor einigen Jahren auf den Zusammenhang aufmerksam gemacht, der zwischen den Schollengebirgen und den säkularen Krustenbewegungen besteht. Es dürfte keinem Zweifel unterliegen, daß die kontinentalen Schwankungen vielfach unter Auslösung oder unter Benutzung von Sprüngen vor sich gehen. Gewiß sind viele tektonische Spalten seit ihrer Entstehung in Ruhe geblieben, andererseits aber scheint die in fast allen Formationen und in allen Gegenden der Erde auftretende große Zahl von Sprüngen darauf hinzuweisen, daß den Schollenbewegungen ebenso wie den Krustenschwankungen eine weitere regionale und zeitliche Bedeutung zukommt.

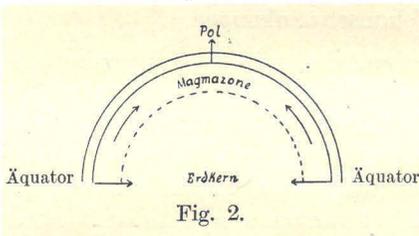
Jedenfalls begründet der obenerwähnte zeitliche und örtliche Unterschied zwischen intensiven Faltungen und Kontinentalbewegungen eine Trennung der Vorgänge, die diese beiden verschiedenen Bewegungsbilder erzeugen und erzeugt haben. Die episodischen Zeiträume, in denen die Faltungserscheinungen zur Ausbildung gelangt sind, mögen weiterhin

¹⁾ QUIRING, Die Entstehung der Schollengebirge, Ztschr. d. D. geol. Ges. 1913. Abh. S. 418ff.

als Komplikationsperioden, die säkularen Zeiträume, in denen die Faltenbildung zurückgetreten ist und die Niveauschwankungen vorgeherrscht¹⁾ haben, als Oszillationsperioden bezeichnet werden.

a) Die Vorgänge in der Oszillationsperiode.

Die Unterscheidung einer Oszillationsperiode von einer Komplikationsperiode drängt sich aber vor allem auf, wenn die Vorgänge im Erdinnern und innerhalb der Erdkruste betrachtet werden, die sich aus der Verlangsamung der Achsendrehung im Laufe eines geologischen Zeitraumes ergeben. Während die zähflüssige Magmazone und das molekularplastische Erdinnere der säkularen Einwirkung der Verringerung der Zentrifugalbeschleunigung verhältnismäßig gleichmäßig — ein geringes Zurückbleiben des Erdinnern gegenüber der Magmazone bedeutet nicht viel — nachfolgen wird, setzt die starre Erdrinde den umgestaltenden



Kräften einen gewissen Widerstand entgegen, der nur unter Bruch und Stauchung überwunden werden kann.

Nehmen wir für die nachfolgende Betrachtung an, daß sich die Erde in der Mitte einer Oszillationsperiode befinde, daß die Achsendrehung sich verlangsamt und die Erde das Bestreben habe, sich in Richtung auf eine Verkürzung der Äquatorachse und eine Verlängerung der Polarachse umzuformen. Welchen Einfluß hat diese Bestreben auf Magmazone und Erdkern? Die beistehende Skizze (Fig. 2) veranschaulicht die Hauptbewegungsrichtungen: Die äquatorialen Massen suchen sich dem Erdmittelpunkt zu nähern, die polaren sich von ihm zu entfernen. Innerhalb der rascher nachgebenden Magmazone werden daneben geringe tangentiale Strömungen vom Äquator zu den Polen hin auftreten. Der Druck des Magmas gegen die Rinde wird an den Polen steigen, am Äquator sich abschwächen. Gibt die Erdrinde am Äquator der Entlastung des Innendruckes durch Nachsinken nicht sofort nach, so wird das Magma das Bestreben haben, sich von der Erdrinde abzulösen. Dieser Fall wird jedoch aus zwei Gründen niemals eintreten:

1. kann sich die Erdrinde nicht selbst tragen,
2. wird das Magma jede noch so geringe Verminderung des Rindendruckes durch Volumvermehrung ausgleichen.

Über den ersten Grund ist kein Wort zu verlieren. Der zweite erscheint für die Tatsache, daß die Aufstauchung von Faltenzonen auf verhältnis-

¹⁾ Naturgemäß haben epirogenetische Bewegungen auch in den Komplikationszeiten und geringfügige Faltungen in den Oszillationsperioden stattgefunden. Schollenbildungen und -verschiebungen sind in beiden Perioden erfolgt.

mäßig kurze geologische Perioden beschränkt ist — huronische Faltung im Präalgonkium, kaledonische Faltung im Obersilur und Unterdevon, herzynische Faltung im Oberkarbon, alpine Faltung im Miozän — von entscheidender Bedeutung zu sein. Die äquatoriale Druckentlastung, mag sie nun gering oder bei großer Starrheit der Erdrinde groß sein, muß notwendig dazu führen, daß das unter mehreren 10 000 Atmosphären vorher zusammengepreßte Magma sich ausdehnt, zum Teil wohl sogar aus dem zähflüssigen in den dünnflüssigen Zustand übergeht — auf die Temperaturschwankungen werde ich noch zurückkommen — und auf diese Weise den inneren Gegendruck, wenn auch nicht völlig, so doch zum größten Teil wiederherstellt. Derartige Volumschwankungen werden in den polaren Teilen nicht eintreten. Vielmehr wird dort während der Oszillationsphase eine dauernde isostatische Emporhebung stattfinden, wozu nur ein geringer innerer Überdruck notwendig ist. Die größte äquatoriale Druckentlastung wird kurz vor einer Komplikationsperiode eintreten. Hierdurch dürfte die Erscheinung erklärt sein, daß unmittelbar vor einer Komplikationsperiode der Vulkanismus ansteigt¹⁾.

Die radialen Verschiebungen des Magmas am Äquator bzw. am Pol entsprechen den Verkürzungen bzw. Verlängerungen der halben Äquator- bzw. Polarachse. Das Minimum der radialen Verschiebung liegt auf einem nahe 35° nördl. und südl. Breite gelegenen Parallelkreise. Das Maximum der tangentialen Verschiebung und damit das Maximum des tangentialen Druckes ist bei rund 45° geographischer Breite zu suchen. Das Überwiegen der radialen Komponente läßt die tangentielle Verschiebung in der Nähe des Äquators und der Pole nur wenig zum Ausdruck kommen, dagegen überwiegt die tangentielle Komponente zwischen 35° und 55° geographischer Breite. Dort wird man von einem säkularen »Strömen« des Magmas von niederen zu höheren Breiten sprechen können.

Auf einen wichtigen Nebenvorgang ist noch hinzuweisen. Die Druckentlastung in den äquatorialen Breiten und die hierdurch hervorgerufene Volumvermehrung des Magmas hat eine Erniedrigung der Temperatur zur Folge. Dieser Temperaturabfall wird durch Wärmezufuhr aus den Tiefen des Erdinnern ausgeglichen und kann somit zu Volumveränderungen in größeren Tiefen Veranlassung geben.

Diese mannigfachen Vorgänge zeigen, in welchem Umfange die verlangsamte Achsendrehung auf die Zustände im Erdinnern einwirkt. Erst auf diese Weise erhalten die durch andere Theorien nur ungenügend erklärten Volumschwankungen und Kristallisationsvorgänge, die von vielen Forschern als Vorbedingung der Gebirgsbildung angesehen werden, eine gesicherte Grundlage.

¹⁾ Im ganzen betrachtet, wird sich demnach in einer Oszillationsperiode das Volumen der Erde vergrößern. Ein merkwürdiger, wenn auch vorde hand nicht beweiskräftiger Umstand ist es, daß neuere geodätische Messungen ergeben haben, daß sich zurzeit (wir befinden uns in einer Oszillationsperiode) die Erdoberfläche vergrößert (WELLISCH, Die Abmessungen der Erde. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen. 1918. I/II. Vierteljahrsheft. S. 16).

b) Die Vorgänge in der Komplikationsperiode.

Den ruhigen Zeiten der Oszillationsperiode, in denen die Strömungen und Volumschwankungen im Untergrunde als aktive Bewegungsvorgänge in den Mechanismus der Erdrindenbewegungen eingreifen, steht die Komplikationsperiode gegenüber, in der die Erdrinde als aktiver Bewegungsfaktor sich in beträchtlichem Umfange bemerkbar macht. Um es vorwegzunehmen: Die durch die Verminderung des äquatorialen inneren G g druckes in der Erdrinde summierten Tangentialspannungen kommen zur Entladung; die Rinde fängt da und dort an zu brechen. Die radiale Druckkomponente gewinnt ihre alte Bedeutung wieder. Der in den Äquatorgebieten lange gehemmte isostatische Ausgleich kommt zur vollständigen Auswirkung.

Welchen Einfluß hat nun dieses Niedersinken der Äquatorialkalotten auf die Magmazone? Die unter der Druckentlastung eingetretenen Volumvermehrungen des Magmas werden unter Einwirkung des wieder einsetzenden Druckes rückgängig gemacht, das Magma geht widerstrebend in einen zähflüssigeren Zustand über. Das Widerstreben prägt sich vor allem darin aus, daß die gewaltsame Zusammendrückung eine mehr oder weniger allgemeine Temperaturerhöhung — Abgabe der Schmelzwärme — auslöst. Die Temperaturerhöhung trägt mit dazu bei, daß in einzelnen Herden — mögen sie nun mit der magmatischen Zone im Zusammenhang stehen oder nicht —, in denen sich der Rindendruck weniger bemerkbar macht bzw. durch Gebirgsbewegungen¹⁾ vermindert ist, das vulkanische Magma sich ausdehnt, und Extrusionen und Intrusionen in größerem Umfange eintreten. Die geologische Geschichte der beiden bedeutendsten Komplikationsperioden zeigt uns, daß in sie und in ihre unmittelbare Folgezeit die Haupttätigkeit der Vulkane fällt. Nicht zufällig ist das Mesozoikum eine Zeit der vulkanischen Ruhe, liegt doch das gesamte Mesozoikum in der vorletzten Oszillationsperiode.

Beschleunigung der Achsendrehung am Ende der Komplikationsperiode.

Vergegenwärtigen wir uns nochmals die aufgezeigten Vorgänge eines gebirgsbildenden Zyklus:

- A. Oszillationsperiode — Zeit der Verlangsamung der Achsendrehung und der stetigen Umformung der Erde; absolute Hebung der Polarregion bei verhältnismäßigem Stillstand der Äquatorialregion, Druckentlastung unter dem Äquatorring.

¹⁾ Über die Verknüpfung von Gebirgsbewegungen mit vulkanischen Erscheinungen habe ich mich kürzlich in anderem Zusammenhange ausgesprochen. Vgl. H. QUIRING, Gebirgsbau der Ostkarpathen, Deckenlehre und Vulkanismus. Ztschr. d. d. geol. Ges. 1920. Monatsberichte.

B. Komplikationsperiode — Auslösung der im Äquatorring aufgesammelten Gewölbespannungen. Niedersinken des Ringes. — Wiederherstellung des in der Oszillationsperiode langsam verschobenen isostatischen Gleichgewichts der Äquatorialregion¹⁾.

Welche Folge hat nun die Verkürzung der Äquatorialachse?

Nach einem bereits erwähnten mechanischen Prinzip bleibt bei einem sich selbst überlassenen rotierenden Körper das Flächenmoment (das halbe Produkt aus Winkelgeschwindigkeit und Trägheitsmoment) konstant. Das Trägheitsmoment der Erde bezogen auf die Rotationsachse ist nach HELMERT²⁾ $0,3321 a^2 M$, worin a den Äquatorialhalbmesser, M die Masse der Erde bedeutet. Bezeichnen wir die Winkelgeschwindigkeit vor und nach der Radiusverkürzung um 7,5 km mit w_1 bzw. w_2 , so erhalten wir, wenn Dichte und Masse der Erde als unverändert angesehen werden,

$$\frac{1}{2} w_1 \cdot 0,3321 (a + 7500)^2 M = \frac{1}{2} w_2 \cdot 0,3321 a^2 M$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{a^2}{(a + 7500)^2}.$$

Führen wir die Rechnung durch, so ergibt sich, daß durch die Achsenverkürzung die Rotationsdauer der Erde eine Verringerung von 174 Sekunden = $2^{\text{n}} 54^{\text{s}}$ erleiden würde. Der Wert ist in Anbetracht der nicht voll berücksichtigten Größen kleiner, doch zeigt er, daß am Ende einer Komplikationsperiode mit der Beschleunigung der Achsendrehung nicht nur ein sehr rasches Abflauen der Gebirgsstauchung, sondern wegen der wiederansteigenden Fliehkraft auch eine geringe Vergrößerung der Abplattung unter Umkehr der bisherigen Bewegungen des Magmas und der Erdrinde eintreten wird. Der vom Magma gegen den Äquatorring ausgeübte Druck wird steigen, unter dem Polarkreis wird eine geringe Druckentlastung eintreten.

Für eine Zeitdauer von etwa 2 bis 3 Millionen Jahren (nach dem OPPENHEIMSchen Wert) wird die durch Gezeitenreibung hervorgerufene Verlangsamung der Achsendrehung ausgeglichen sein. Erst danach wird sie wieder mit ihren Nebenvorgängen voll in Erscheinung treten.

Eine Beschleunigung der Achsendrehung wird sich übrigens auch bei der Zusammenziehung der Erdrinde infolge Temperaturabfall ergeben, doch hat schon BÖHM nachgewiesen, daß diese Beschleunigung so gering ist, daß sie gegenüber der Verlangsamung der Achsendrehung infolge Gezeitenreibung nicht ins Gewicht fällt.

¹⁾ Die Komplikationen müssen auch zu geringen Polverschiebungen führen, die bis zu mehreren Graden betragen können. Die Verschiebungen der Pole treten aber stets nur sekundär auf, da sie ohne Massenverlagerungen nicht denkbar sind. Vgl. A. GEIKIE, Textbook of geology. 2. Aufl. London S. 16.

²⁾ HELMERT, Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. II. Bd. Leipzig 1884. S. 473.

Die Bewegungsvorgänge in der Erdrinde.

a) Absolute Hebung und Zerrung.

Die Kugel ist bekanntlich derjenige Körper, der bei größtem Inhalt die kleinste Oberfläche besitzt. Jede Annäherung an die Kugelgestalt — die Veränderung der Abplattung infolge Verlangsamung der Achsendrehung ist eine solche Annäherung — ist mit einer Verkleinerung der Oberfläche verknüpft. Daher, so argumentiert BÖHM, suchen sich nicht nur alle Punkte der Äquatorialregion, sondern auch der Polarregion dem Pol zu nähern.

Dem ist entgegenzuhalten, daß während der Oszillationsperiode das Umformungsbestreben in der Hauptsache von der Magmazone ausgeht und daß eine Umformung der starren Rinde, soweit es sich um Auslösung von tangentialen Bewegungen handelt, erst nach einer beträchtlichen Aufsammung von Spannungen erfolgt, wie es die anastrophische Entstehung der Faltengebirge beweist. Wir können daher mit gewissen Einschränkungen für die Oszillationsperioden von den tangentialen Druckspannungen absehen.

Die Oszillationsperioden sind die Zeiten vorherrschender absoluter¹⁾ Hebung. Sie betrifft in der Hauptsache die Polarkalotten nördlich bzw. südlich von 35° geographischer Breite. Wie werden nun die Polkalotten in einer Oszillationsperiode verändert?

Die durch Verlangsamung der Achsendrehung am Pol aufsteigende Magmazone treibt die auf ihr »schwimmende« Kalotte isostatisch empor, und zwar nach der von uns gemachten Voraussetzung um 14 km. Die Erdrinde nimmt hierbei einen größeren Raum ein — die lineare Ausdehnung des Meridians vom 35. Breitengrade bis zum Pol beläuft sich auf 0,22% — und zerrißt hierbei in von Sprüngen begrenzte Schollen, die sich gegeneinander verschieben. Absolute Hebung und Schollenverschiebung aus Zerrung sind die unmittelbaren Folgen der Verlängerung der Polarachse. Die geringe Zugfestigkeit der die Rinde aufbauenden Gesteine, die im allgemeinen nur $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{30}$ der Druckfestigkeit beträgt, macht es erklärlich, daß die Rinde dem Auftrieb und der Zerreißung keinen großen Widerstand entgegengesetzt. Die Zugfestigkeit gestattet lediglich, daß die tangentialen Zugspannungen nicht überall gleichmäßig zur Zerreißung der Rinde führen, vielmehr meist in den von Haus aus schwächeren und bereits von Sprüngen, z. B. seit der ersten Zeit der Rindenbildung durchsetzten Zonen²⁾ zur

1) Unter absoluter Hebung und absoluter Senkung ist in diesem Zusammenhange Vergrößerung bzw. Verkleinerung des Abstandes der Erdoberfläche vom Erdmittelpunkt zu verstehen. In Beziehung zum Meeresspiegel (vgl. w. u.) wird stets von relativer Hebung und relativer Senkung gesprochen werden.

2) Vgl. die tabellarische Übersicht auf S. 212. Die vertretenen Anschauungen berühren sich in dieser Hinsicht mit den eigenartigen Gedanken W. DEECKES (Ein Grundgesetz der Gebirgsbildung. N. J. f. Min. usw. 1908 u. 1910), der die geographischen Homologien im Verlauf der Küsten, Gebirge, Vulkanzonen auf alte Kontraktionsklüfte, die seit der ersten Erstarrung der Rinde bestehen, zurückführt.

Auslösung gelangen. So kommt es, daß weite Gebiete von Sprüngen nur in geringem Maße zerstückelt sind, hingegen andere Rindenteile, z. B. die großen Grabenzonen und ihre Nachbarschaft, Zerrungszahlen aufweisen, die ein Vielfaches des angegebenen mittleren Wertes erreichen, so daß in gewisser Beziehung von einer divergierenden Wanderbewegung größerer Schollen gesprochen werden kann; allerdings werden diese Bewegungen niemals das ihnen von WEGENER zugeschriebene Ausmaß erreichen. Maß und Mechanismus der Schollenbewegung aus Zerrung habe ich in einem besonderen Aufsätze¹⁾ eingehend behandelt, so daß an dieser Stelle darauf verwiesen werden kann. Wenn auch theoretisch das Zerrungsmaß an den Polen am größten und zu niedrigeren Breiten hin geringer sein wird, so dürfte es doch auch einer späteren Forschung kaum möglich sein, zirkumpolare Linien und Zonen gleicher Zerrung zu ermitteln, da zu viele Momente, von denen die oben angegebenen nur einen Teil darstellen, gegen eine gleichmäßige flächenhafte Ausbreitung sprechen. Im großen und ganzen wird die Zerrung »ungerichtet« in dem von mir früher gebrauchten Sinne sein, wenn auch in bestimmten Fällen die latenten Druckspannungen meridionaler und auch ostwestlicher Richtung die Richtung der Spalten mehr oder weniger beeinflussen werden. Die Abhängigkeit der Richtungen der Spalten von latenten Druckwirkungen zeigt sich besonders auffällig in den unter Horizontaldruck entstandenen Faltengebirgen²⁾.

Es bedarf wohl kaum der Erwähnung, daß durch die Hebung nur ein kleiner Teil der Schollenverschiebungen erklärt werden kann. Der größere ist auf örtliche Vorgänge, über die ich in den angegebenen Abhandlungen mich ausgesprochen habe, zurückzuführen.

In einer Komplikationsperiode und der unmittelbar darauf folgenden Zeit wird die Beschleunigung der Achsendrehung das Bild umkehren. Absolute Senkung über 35° nördlicher bzw. südlicher Breite wird tangential Druckspannungen erzeugen und in geringem Umfange die frühere absolute Hebung und Zerrung verringern. Andererseits wird in den Äquatorialgebieten absolute Hebung eintreten, die hauptsächlich meridional gerichtete Zerrspalten entstehen lassen wird, die naturgemäß ebenfalls nicht an allen Punkten gleichmäßig auftreten, sondern die schwächeren Zonen besonders beeinflussen werden.

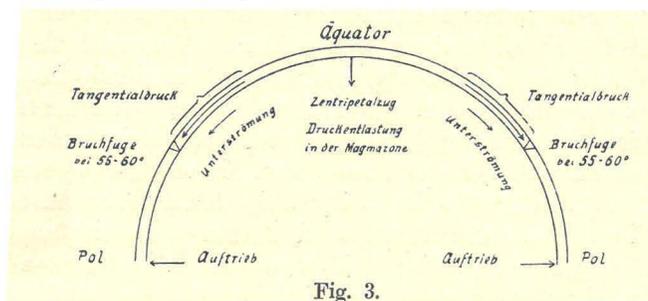
b) Absolute Senkung und Faltung.

Dem Monde fehlen die Faltengebirge. Diese Erscheinung, die bisher keine Deutung finden konnte, dürfte nach der Hypothese, daß die Entstehung von Faltengebirgen in ursächlichem Zusammenhang mit der

¹⁾ QUIRING, Entstehung der Schollengebirge. Ztschr. d. D. geol. Ges. 1913. Abh. S. 418ff.

²⁾ Vgl. QUIRING, Über Verlauf und Entstehung von Querstörungen in Faltengebirgen. Ztschr. f. d. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen i. Pr. Staate. 1919. Abh. S. 133ff.

säkularen Verlangsamung der Achsendrehung steht, eine ausreichende Erklärung gefunden haben. Es ist hierzu nur die Voraussetzung zu machen, die wohl kaum Widerspruch finden dürfte, daß die Stabilisierung der Mondrotation auf die Dauer eines Monats der Erstarrung der Oberfläche vorausgegangen ist. Nach Beginn der Erstarrung hat keine wesentliche Verlangsamung der Achsendrehung mehr stattgefunden, so daß die damit verbundenen tangentialen Rindenbewegungen (Faltenbildung) nicht eingetreten sind.



Zur Erläuterung der irdischen Verhältnisse diene beistehender meridionaler Schnitt (Fig. 3).

Die Verminderung der Zentrifugalbeschleunigung erzeugt folgende, nacheinander und nebeneinander verlaufende Vorgänge in den äquatorialen Teilen der Erdrinde:

a) Oszillationsperiode.

1. Druckentlastung unter dem äquatorialen Ring.
2. Entstehung eines radialen Senkungsbestrebens in der Erdrinde, dessen Auslösung durch Volumvermehrung des Magmas hinausgeschoben wird.
3. Umsetzung des zentripetalen Zuges in tangentiale, vom Äquator ausstrahlende Gewölbedruckspannungen, die durch das polwärts gerichtete »Strömen« des Magmas unterstützt werden.
4. Langsames Aufsammeln und Ansteigen der tangentialen Spannungen bis zur Erreichung des »kritischen« Überschiebungs- bzw. Faltungsdruckes.

b) Komplikationsperiode.

5. Überschreiten der Festigkeitsgrenze der Erdrinde in den »kritischen« Zonen.
6. Zertrümmerung und Faltung der Rinde in den kritischen Zonen, unterstützt und begleitet von Auftriebs- und Strömungsvorgängen in der Magmazone.
7. Rasche absolute Senkung des äquatorialen Ringes. Wiederherstellung des während der Oszillationsperiode gestörten isostatischen Gleichgewichts der Äquatorialzone.

8. Beschleunigung der Achsendrehung infolge der Veränderung des Trägheitsmomentes der Erde (s. o.).

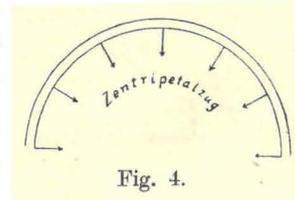
Die Lage der »kritischen« Zone wird durch zwei Größen bestimmt:

1. Die vorhandenen Ungleichmäßigkeiten in der Festigkeit der Erdrinde.
2. Die theoretische Lage der »Bruchfugen«.

Daß Ungleichmäßigkeiten in der Festigkeit der Erdrinde, Schwächezonen, seit ihrer ersten Bildung bestehen, wurde eingehend behandelt. Daß sie nicht nur für die Lage der Zerrungszonen, sondern auch für die Lage der Faltenzüge und Vulkane von ausschlaggebender Bedeutung sind, bedarf wohl keines besonderen Hinweises. In einer Komplikationsperiode haben wir daher zwei nebeneinander verlaufende große Bewegungsvorgänge zu unterscheiden:

1. Kontinentale absolute Senkung und Einbruch ausgedehnter Rindenteile in der Äquatorialzone.
2. Aufstauchung und Auffaltung der die Senkungsfelder umgebenden randlichen Zonen.

Während im Innern des Senkungsfeldes das während der Oszillationsperiode so lange gestörte isostatische Gleichgewicht wiederhergestellt wird, entstehen in den gewissermaßen in Reaktion aufgestauchten Randzonen neue Spannungen; das vorher vorhandenen gewesene isostatische Gleichgewicht ist gestört, und die neuen Spannungen drängen nun ihrerseits nach Ausgleich. So erklärt sich die Tatsache, daß in den neuentstandenen Faltengebirgen auch die Schwereverteilung Unregelmäßigkeiten aufweist, wohingegen alte Faltenrumpfe, die tektonische Nachbewegungen (Ausgleichbewegungen) erlitten haben, einheitlichere Schwereverhältnisse aufweisen¹⁾.



Bei Gewölben mit halbkreisförmiger Wölblinie liegt die Bruchfuge und damit das Maximum des Gewölbedruckes unter einem Winkel von 55° bis 60° zu der Linie der Gewölbehöhe. Die Gewölbehöhe fällt auf der Erde etwa mit dem Äquatorradius zusammen (vgl. Fig. 3). Die ideale Bruchfuge befindet sich demnach in der Nachbarschaft des Maximums der Unterströmung, das — wie erwähnt — zwischen 35° und 55° geographischer Breite liegt.

Zur weiteren theoretisch-mechanischen Behandlung der Frage müssen wir noch einen zweiten Schnitt durch die Erde und zwar in der Äquatorialebene legen (Fig. 4).

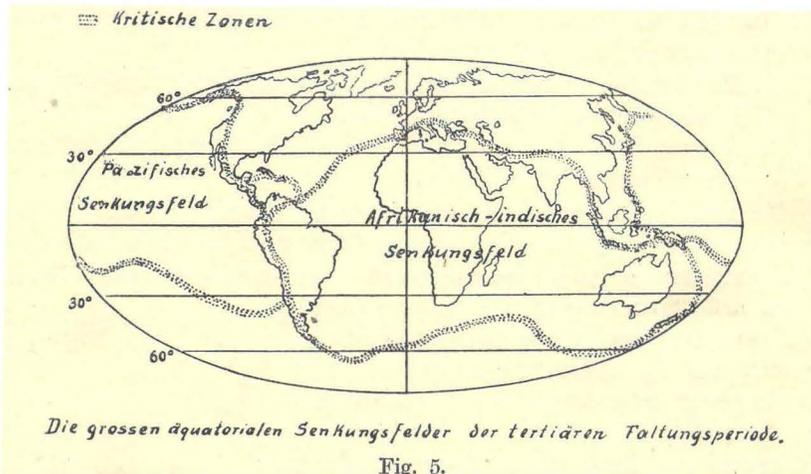
Auch in der Äquatorialebene und in ähnlicher Weise in allen Breiten bis etwa zum $55.$ Breitengrade entstehen durch den zentripetalen Zug Gewölbespannungen. Hier können nur Ungleichmäßigkeiten in der

¹⁾ Vgl. z. B. HEIM, Geol. Nachlese. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich 1915. Nr. 24.

Festigkeit der Erdrinde für die Lage der tatsächlichen Zertrümmerungszone verantwortlich gemacht werden¹⁾.

Theoretisch gelangen wir demnach zu dem Ergebnis, daß die dem Äquator parallel laufende ideale Bruchfuge für die Lage der Faltenzonen von besonderer Bedeutung sein muß, daß jedoch für die Lage mehr oder weniger meridional gerichteter Faltenzüge keine idealen Voraussetzungen bestehen²⁾.

Betrachten wir unter diesem Gesichtspunkt die Faltenketten der Erde, so erkennen wir sofort, daß tatsächlich den theoretischen Voraussetzungen entsprochen ist. Kein jüngeres Faltengebirge reicht über die Polarkreise hinaus. Die jüngste Komplikationsperiode hat beispielsweise



zur Senkung zweier Erdkalotten geführt, der afrikanisch-indischen und der pazifischen (Fig. 5). Die Senkungsmittelpunkte beider liegen nur wenige Grade vom Äquator entfernt. Die Kalotten berühren sich einmal in den Sundainseln, Neuguinea und Neuseeland, andererseits in den Anden Südamerikas. Die theoretischen Bruchfugen sind naturgemäß nicht eingehalten, da, wie bereits erwähnt, die Ungleichmäßigkeiten in der Festigkeit der Erdrinde von größerer Bedeutung sind, immerhin ist ihre Einwirkung auf die Lage der Kettengebirge, insbesondere in Eurasien unverkennbar. Die Senkung der beiden Kalotten ist im Süden stärker

¹⁾ Nach der Tetraedertheorie GREENS (Vestiges of the molten globe as exhibited in the figure of the earth's volcanic action and physiography. London 1875) müßte die Zusammenziehung zu einer Umwandlung des kreisförmigen Querschnittes zu einendreseitigen führen. Tatsächlich ist bei der letzten tertiären Gebirgsfaltung der Ring nur an zwei Stellen (Anden und Neuguinea) geborsten.

²⁾ In seiner Kritik der Theorie BÖHMS hat ANDRÉE (Über die Bedingungen der Gebirgsbildung. Berlin 1914. S. 14) darauf hingewiesen, daß das Fehlen ostwestlich bzw. meridional streichender Faltenzüge »mit Entschiedenheit« gegen die Theorie spreche. Dieser Einwand ANDRÉES dürfte nach den obigen Ausführungen als nicht stichhaltig anzusehen sein.

erfolgt als im Norden, so daß die südlichen Faltenränder zurzeit unter dem Meeresspiegel liegen. Die Kammlinien der südlichen Gebirgsketten sind auf der beistehenden Karte bezeichnet. Sie verlaufen im pazifischen Ozean über die von DANA und HUSLAY als Zeugen alter Festländer angesehenen Parallelreihen der Koralleninseln Polynesiens. Auf die einseitige Senkung ist auch die Tatsache zurückzuführen, daß die Kontinente ihre Breitseite nach Norden kehren und nach Süden spitz zulaufen.

Über den Mechanismus und die Beziehungen der Faltenbildung zu Unterströmungen und Gleitungsvorgängen hat sich AMPFERER¹⁾ in seiner ausgezeichneten Studie über das Bewegungsbild von Faltengebirgen eingehend ausgesprochen. Meines Erachtens ist er insofern zu weit gegangen, als er die Gewölbedruckspannungen in der Erdrinde vernachlässigt hat²⁾, wie es scheint unter dem Eindruck der von WEPFER durchgeführten Berechnung der dem Gewicht eines freien Gewölbes von der Größe der Erde entspringenden Faltungskraft. Den von WEPFER³⁾ gemachten Voraussetzungen ist die Berechtigung abzusprechen. Ein freier Gewölbedruck wird niemals auftreten. Dagegen wird niemand bestreiten wollen, daß in der Erdrinde überhaupt tangentiale Spannungen entstehen können. Sie werden natürlich dort zur Auslösung kommen, wo bei dem säkularen Ansteigen des Tangentialdruckes zuerst die Festigkeitsgrenze des Gesteins überschritten wird. Dies kann selbstverständlich an allen Punkten der sinkenden Kalotte eintreten, in erster Linie jedoch in den kritischen Zonen⁴⁾. Wir dürfen nicht fragen: Kann die Erdrinde den maximalen Gewölbedruck ertragen, sondern vielmehr: wo und wann wird der vorhandene Gewölbedruck die Festigkeitsgrenze der Rinde überschreiten? Daß er dies in den kritischen Zonen, wo geringe Festigkeit der Rinde und verhältnismäßig große Tangentialdrucke zusammentreffen, tun wird, erscheint selbstverständlich. Eine Fortpflanzung des Tangentialdruckes auf große Entfernungen brauchen wir hierbei überhaupt nicht vorauszusetzen. Die Spannungen im Bereich der Bruchfuge sind gewissermaßen latent. Letzten Endes gibt das Bersten der Rinde ja nur den Anstoß zur eigentlichen Faltung, die im einzelnen auf sehr verschiedenartige Zwischen- und Nebenvorgänge zurückgeführt werden kann.

Daß die Faltungserscheinungen, namentlich Außenfaltung und Überschiebung, nur die obersten Rindenteile betroffen haben, steht, wie oben erwähnt, fest. In größeren Tiefen können der Tangentialdruck und die durch das Auslösen der Gebirgsbewegung hervorgerufenen

1) Jahrb. d. k. k. Geol. Reichsanstalt. 1906. S. 530.

2) Vgl. hierzu u. a. SMOLUCHOWSKI (Über ein gewisses Stabilitätsproblem der Elastizitätslehre und dessen Beziehung zur Entstehung von Faltengebirgen. Anz. d. Akad. d. Wissensch. zu Krakau. Math.-naturw. Kl. Juni 1909. S. 1—20).

3) Vierteljahrsschrift d. Naturforschenden Ges. in Zürich 1905. S. 135.

4) Auch die Mehrzahl der früheren und heutigen vulkanischen Erscheinungen ist an die kritischen Schwächezonen der Erdrinde geknüpft.

Störungen des Gleichgewichts lediglich ein Fließen bzw. ein Aufpressen der Massen, z. T. unter »plutonischer Erhebung« zur Folge haben. Einzelne vulkanische Erscheinungen und aufgepreßte Gebirgskerne, an die sich die Falten anlegen, können hierauf zurückgeführt werden¹⁾. Dar- aus, daß einerseits vor einer Faltungsperiode ein langsames Strömen des Magmas im Untergrunde, also gewissermaßen ein Zurückbleiben der Rinde, andererseits aber während einer Faltungsperiode ein Vor- eilen der Rinde gegenüber dem Magma stattfindet, läßt sich vielleicht — in Verbindung mit dem Einfluß alter Massive — eine begründetere Er- klärungsweise der Einseitigkeit der Faltengebirge herleiten, als sie bis- her möglich gewesen ist.

Alle diese Fragen, u. a. auch die Fragen nach dem zonaren Wandern der Gebirgsbildung, der Bogenform der Kettengebirge, die auf örtliche Widerstände und Spannungen zurückzuführen sind, können nicht Gegen- stand der vorliegenden Abhandlung sein.

Land und Meer.

Rascher als Magma, Erdkern und Erdrinde, folgt das Meer den Änderungen der Zentrifugalbeschleunigung. Absichtlich wurde bisher davon abgesehen, die Bewegungen der Hydrosphäre in den Kreis der Betrachtungen zu ziehen, wäre doch dadurch ein unruhiges und schwer zu überschendes Moment in die Darstellung gelangt. Eigentümlicher- weise sind nämlich die absoluten Bewegungen der Erdrinde den relativen, bezogen auf die Meeresoberfläche, vielfach entgegengesetzt. Beispiels- weise mögen für eine Oszillationsperiode die Bewegungen zusammen- gestellt werden.

Absolute Bewegung:

	Äquatorial- gebiete	Gemäßigte Zone über 35° geogr. Breite	Polargebiete
1. Magma	Senkung	Hebung (gering)	Hebung
2. Erdrinde	Senkung (gering)	Hebung (gering; dem Magma folgend)	Hebung (isostatisch dem Magma folgend)
3. Meer	Senkung	Hebung, der Erdrinde nur wenig vorausgehend und stellenweise von ihr überholt; epikontinentale Überflutungen	Hebung (Beziehun- gen zur Erdrinde wie in der gemäßigten Zone)

Relative Bewegung (bezogen auf die Meeresoberfläche):

Erdrinde	Zuerst He- bung, dann Senkung	Senkung und Hebung (erstere vorherrschend)	Senkung und Hebung

¹⁾ Bemerkenswert ist, daß selbst für die Entstehung der Alpen in neuerer Zeit die schon längst für überwunden angesehene »plutonische Erhebungstheorie« herangezogen wird (DREECKE, Die alpine Geosynklinale. N. J. f. Min. usw. Beil.-Bd. 33. 1912. S. 850ff.). Πέντα ἔει!

Die stetigen absoluten Bewegungen von Meer und Land werden also, wenn man beide in Beziehung zueinander setzt, zu relativen oszillatorischen.

Es ergibt sich daraus, daß in einer Oszillationsperiode, wie z. B. im Mesozoikum, die Verteilung von Land und Meer eine wechselnde und eine wesentlich andere gewesen sein muß als z. B. in der Jetztzeit, die unter der Einwirkung der letzten Komplikationsperiode im Tertiär steht. Theoretisch betrachtet müssen die Landgebiete am Äquator, die Wassermassen in der Hauptsache an den Polen gelegen haben. In der Tat bezeugt die historische Geologie, wenn wir auch nicht ohne Einschränkungen die Ansichten HAUGS¹⁾ vertreten wollen, daß im Mesozoikum die äquatorialen Landgebiete ausgedehnter gewesen sind als im Postmiozän. Besonders im Pazifischen Ozean müssen wir — in Anbetracht der vielen Koralleninseln — ein gewaltiges tertiäres Senkungsfeld sehen, das in jüngster Zeit geringe relative Hebungen erfahren hat. Die oszillatorischen Bewegungen des Landes in den gemäßigten Zonen im Mesozoikum — Trans- und Regressionen des Meeres — sind deutlicher. Ein klares Bild über die relativen Bewegungen von Land und Meer gewinnen wir bei theoretischer Behandlung des Gegenstandes nicht, zumal auch die absoluten Bewegungen nur in Umrissen erkennbar sind. Das Bild wird durch den seit der ersten Krustenbildung gegebenen Gegensatz zwischen Schwell- und Hohlformen, vor allem aber durch örtliche Schwankungen verwischt, hervorgerufen durch Abtragungs- und Sedimentationsvorgänge.

Die eigenartige Erscheinung, auf die bereits hingewiesen wurde, daß die Gebirgsketten sich aus dem Meere, aus Geosynklinalen erheben, kann, wenn wir die erste Anlage der Geosynklinalen zugrunde legen, wie ich sie in der Tabelle auf S. 212 angenommen habe, in diesem Zusammenhange die bisher noch ausstehende Erklärung finden. Die Geosynklinalen sind seit der ersten Rindenbildung die Schwächezonen der Erdrinde. Soweit sie innerhalb des äquatorialen Ringes liegen, haben sie auch in der Oszillationsperiode, entsprechend der sinkenden Unterlage, eine abwärts gerichtete Bewegung vollführt (Geosynklinale der Antillen und Anden, Hinterindiens, der Sundainseln und Melanesiens). Hierdurch dürfte sich die Meeresbedeckung und die Sedimentanhäufung in diesen Trögen erklären. Für die Geosynklinale der gemäßigten Zonen genügt die Vorstellung, daß sich das Land dem Meere gegenüber vornehmlich in relativer Senkungsphase (vgl. die

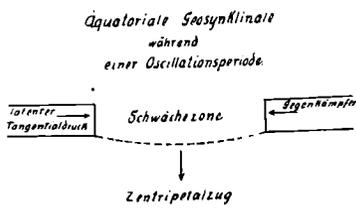


Fig. 6.

¹⁾ HAUG, Les géosynclinaux et les aires continentales. Bull. de la Soc. Géol. de France 1900. S. 617—711, Vgl. die ausgezeichnete Kritik, die SOERGAEL (Das Problem der Permanenz der Ozeane und Kontinente. Stuttgart 1917) gegeben hat.

Tabelle auf Seite 232) befand, zur Deutung der charakteristischen Erscheinung.

Noch weniger als für eine Oszillationsperiode, lassen sich für eine Komplikationsperiode die relativen Bewegungen des Meeresspiegels und der Landoberfläche festlegen. Es ist nicht einmal möglich anzunehmen, daß die aufgestauchten Faltenwülste über den Meeresspiegel emporragen. Die absolute Bewegung der Meeresoberfläche während einer Komplikationsperiode läßt sich dahin skizzieren, daß das Meer auf der ganzen Erde absolut — und vielfach auch relativ — sinkt, so daß die in der Oszillationsperiode etwas verwischte Permanenz der Kontinente und Ozeane, die seit Erstarrung der Rinde gegeben ist, wieder deutlicher zum Ausdruck gelangt.

Schluß.

Kehren wir von der zuletzt behandelten Grundursache der Gebirgsbildung, der säkularen Verlangsamung der Achsendrehung, zurück zu dem allgemeinen Gedanken, der leitend für die Behandlung des Problems gewesen ist, so können wir sagen: den irdischen tektonischen Bewegungen und Erscheinungen liegt nicht eine einzige, ewige und allumfassende Ursache zugrunde. Mehrere Grundursachen, in ihrer örtlichen und zeitlichen Bedeutung abgestuft, sind neben- und nacheinander wirksam. Äonen hindurch scheinbar schlummernd, häufen sie Spannungen in der Erdrinde und in der Magmazonen auf, die immer stärker nach Ausgleich, nach Lösung verlangen. Hemmende Widerstände, Reibungen müssen überwunden, Festigkeitsgrenzen überschritten werden. Die Zeiten der Aufsammlung der Spannungen — die Oszillationsperioden — sind lang, die Zeiten der Zertrümmerung — die Komplikationsperioden — episodisch und kürzer. Erstere sind die Zeiten der relativen, nur wenig gestörten Ruhe, letztere die des ausgesprochenen Kampfes. Und es ist wie im Leben der Völker: Nicht der unmittelbar erkennbare Vorgang, obwohl er vielfach den äußeren Anstoß bildet, ist die wahre Ursache des Streites; tiefer liegende Erreger haben die Gegensätze erzeugt, die zur Entladung kommen. Ist dann aber der Bruch erfolgt, die Kulmination überschritten, greift alles ineinander, den Abbau der Spannungen möglichst restlos zu gestalten, teils unter Zerlegung (Divergenz), teils unter Vereinheitlichung (Konvergenz) der Wirkung. Aber der Kampf ist der Vater aller Dinge: auch der tektonische Kampf schafft niemals einen endgültigen Abschluß, völlige Ruhe; neue Belastungen, neue Widerstände, neue Erreger gehen von ihm aus, die künftige tektonische Umformung bestimmend. Dissonanz und Rhythmus beherrschen die Geschichte der Erde.