

# **Über die Konstitution der Erde und ihrer Kruste**

Von

**Adalbert Prey**

(Sonderabdruck aus dem Almanach der Akademie der  
Wissenschaften in Wien, Jahrgang 1943)

**Wien 1943**

# Über die Konstitution der Erde und ihrer Kruste.

Von Adalbert Prey.

(Vortrag, gehalten in der Feierlichen Sitzung der Akademie der  
Wissenschaften in Wien am 2. Juni 1943.)

Daß die Erde eine Kugel ist, haben schon die Alten gewußt und der alexandrinische Gelehrte Eratosthenes aus dem dritten vorchristlichen Jahrhundert hat auch schon die Größe derselben im wesentlichen nach der gleichen Methode bestimmt, wie wir sie heute noch anwenden. Die Beobachtungsgrundlagen waren natürlich sehr unrichtig, aber durch einen günstigen Zufall hoben sich die Fehler so ziemlich auf, so daß ein recht gutes Resultat herauskam. Seither wissen wir, daß die Erde einen Radius von etwa 6000 *km* besitzt. Vergleicht man damit die Tiefe der tiefsten Bohrungen, die kaum bis 4 *km* reichen, so sieht man, daß sie nur Nadelstiche bedeuten. Wenn wir uns die Erde als eine Kugel von 1 *m* Radius vorstellen, so würde diese Tiefe nicht einmal 1 *mm* betragen. Was wir vom Erdinneren aus direkten Beobachtungen wissen, bezieht sich also nur auf die allerobersten Schichten. Wenn wir etwas von den tieferen Schichten oder gar von der Mitte der Erde wissen wollen, so müssen wir uns nach Boten umsehen, welche davon Kunde bringen können, mit anderen Worten, wir müssen Erscheinungen suchen, in denen sich die innere Konstitution der Erde an der Oberfläche ausspricht.

Die erste und wichtigste dieser Erscheinungen ist die Figur der Erde. Es ist bekannt, daß sich die Erde täglich um ihre Achse

dreht. Die dadurch entstehende Fliehkraft sucht die Massen von der Achse zu entfernen. Sie drängen sich daher zum Äquator und es entsteht eine Abplattung. Es ist nicht notwendig dazu vorauszusetzen, daß die Erde, als sie diese Figur annahm, eine hohe Temperatur gehabt habe. Obwohl die Erde als Ganzes von ungeheurer Festigkeit ist, sind wir doch der Überzeugung, daß unter dem großen und langanhaltenden Einfluß der Fliehkraft die Erde plastische Eigenschaften zeigt und endlich dieselbe Figur annimmt, wie wenn sie flüssig wäre.

Das erstemal, daß sich die Abplattung bemerkbar machte, war, als der Astronom Richer im Jahre 1672 nach Cajenne ging, um daselbst Marsbeobachtungen zur Bestimmung der Sonnenentfernung zu machen. Er sah sich gezwungen, das Pendel seiner Uhr stark zu verkürzen, um wieder einen richtigen Gang zu erhalten. Newton, der damals im Begriffe war, sein Gravitationsgesetz zu entwickeln, erkannte sofort den richtigen Grund dieser Erscheinung: In den Äquatorgegenden ist die Schwere kleiner, da man weiter von der Mitte der Erde entfernt ist als anderswo. Die Franzosen widerstrebten lange dieser Erklärung aus politischen Gründen und griffen zu anderen, zum Teil fast lächerlichen Ausflüchten. Sie stützten sich auf den Umstand, daß die französische Gradmessung, welche ganz Frankreich vom Norden bis Süden umfaßte, gerade das Gegenteil zu ergeben schien, nämlich ein gegen die Pole mehr zugespitztes Ellipsoid. Voltaire (1694 bis 1778) erfand das Scherzwort: in Frankreich sei damals die Erde eine Zitrone, in England eine Orange gewesen. Endlich waren es doch die Franzosen, die die Frage zur Entscheidung brachten, indem sie in der Zeit von 1730 bis 1740 zwei große Gradmessungsexpeditionen aussandten, eine nach Lappland unter der Führung von Maupertuis und Clairaut, und eine nach Peru unter Führung von Bouguer und La Condamine. Seither ist der Streit über die Abplattung entschieden; wir wissen, daß die Abplattung  $\frac{1}{300}$

beträgt oder mit anderen Worten: die Polarachse ist um 42 *km* kürzer als der Durchmesser des Äquators.

Es ist nun klar, daß die Größe der Abplattung zusammenhängt mit der inneren Schichtung der Massen, wobei wir zunächst annehmen wollen, daß diese in einer regelmäßigen Zunahme der Dichte gegen den Mittelpunkt besteht. Die Annahme, daß die Dichte nach innen abnimmt, ist nach allen unseren physikalischen Begriffen ausgeschlossen. Ist die Zunahme sehr stark, so daß sich der größte Teil und die schwersten Massen nahe dem Mittelpunkte befinden, so ist die Fliehkraft offenbar klein und damit auch die Abplattung. Ist dagegen die Zunahme geringer, so liegen auch schon in der Nähe der Oberfläche schwere Massen, die Fliehkraft und die Abplattung sind also groß. Den mathematischen Zusammenhang zwischen der Erdfigur und der Dichtezunahme hat Clairaut aufgedeckt (1713—1765). Das Resultat aller seitherigen Untersuchungen kann man dahin zusammenfassen, daß beginnend mit einer Dichte von 2·7, welche für die Oberfläche gilt, ihr Wert bis etwa 10—12 im Zentrum zunimmt. Von der Annahme einer solchen stetigen Dichtezunahme gegen das Erdinnere ist man heute abgekommen, weil die Mineralogie bewiesen hat, daß die Materialien weitgehend das Bestreben haben, sich zu sondern und sich dann nach der Dichte zu lagern. Auch die Erdbebenwellen deuten auf das Vorhandensein von Unstetigkeitsflächen in der Erde hin. Ausgehend von dem Herd des Erdbebens laufen diese Wellen durch das Innere der Erde, werden an den Unstetigkeitsflächen teils gebrochen, teils reflektiert, in Longitudinal- und Transversalwellen aufgespalten und erreichen so auf Umwegen wieder die Erdoberfläche, wo an Erdbebenapparaten die Eintrittszeiten und die Einfallswinkel beobachtet werden können.<sup>1)</sup> Dadurch erhalten wir Kunde, wo

<sup>1)</sup> H. Benndorf, Mitteilungen der Erdbebenkommission der kais. Akad. d. Wiss. XXIX, XXXI, XLVI.

solche Unstetigkeitsflächen liegen müssen. Einige solcher Grenzflächen sind nun schon mit großer Sicherheit festgestellt. So liegt ein Dichtesprung bei etwa 60 km Tiefe, ein zweiter etwa bei 2900 km Tiefe, weitere werden noch vermutet. Es war zuerst Wiechert<sup>1)</sup>, der diesen Standpunkt eingenommen hat. Die Sache wurde weiter ausgebaut von Klußmann<sup>2)</sup>, Gutenberg<sup>3)</sup>, Haalck<sup>4)</sup> und anderen. Darnach wird man nun in der Erde eine Kruste unterscheiden, in der die Dichte von 2·7 auf 3·1 steigt, eine Zwischenschicht mit einer Dichte von 3·4 bis 5·3, endlich einen Kern mit einer Dichte von 9 bis 12. Das Material, aus dem diese Schichten bestehen, ist für die Kruste Gesteine, wie wir sie auch an der Oberfläche der Erde sehen, für die Mittelschicht schwere Erze, für den Kern endlich die schwersten Stoffe, nach einer sehr gangbaren Hypothese im wesentlichen Eisen und Nickel, deren Dichte wohl unter dem Einfluß des ungeheuren Druckes größer ist als an der Oberfläche. Die Anwesenheit von viel Eisen wird auch durch die magnetischen Eigenschaften der Erde wahrscheinlich gemacht. Eine ganz neue Theorie<sup>5)</sup> behauptet, daß die Massen im tiefsten Erdinnern noch in demselben Urzustande mangelnder Entmischung sich befinden, in dem sie sich von der Sonne abgetrennt haben, da das Alter der Erde noch lange nicht hinreichende, einen geordneten Zustand herbeizuführen. Die Stellung-

---

1) E. Wiechert: Über die Massenverteilung im Erdinnern, Göttinger Nachr. 1897.

2) W. Klußmann: Über das Innere der Erde. Gerlands Beiträge zur Geophysik, XIV.

3) B. Gutenberg u. C. F. Richter: P's and the earth's core MNRAS. Geophys. 4, 1938.

4) H. Haalck: Eine Neuberechnung der Dichteverteilung und der davon abhängigen physikalischen Größen im Erdinnern. Zeitschrift für Geophysik, XVII, 1.

5) W. Kuhn: Stoffliche Homogenität des Erdinnern. Die Naturwissenschaften, 30. Jahrg.

nahme zu dieser Theorie<sup>1)</sup> wird erschwert durch die große numerische Unsicherheit in den Grundlagen.

Zu Anfang des 19. Jahrhunderts glaubte man durch Vermehrung und Verbesserung der Gradmessungen einen immer besseren Wert der Abplattung zu erhalten. Das Verfahren, das man dabei verwendet, ist seit Snellius (1620) die Triangulation, die darin besteht, daß man den nördlichen und südlichen Endpunkt des Meridianbogens durch Dreiecke miteinander verbindet. Man braucht nun in diesem Netze nur eine Seite und die Winkel zu messen und kann dann alle Seiten und endlich auch die lineare Entfernung vom nördlichen zum südlichen Ende des Bogens berechnen, die zu vergleichen ist mit dem Unterschied der geographischen Breiten. Man mißt also nur mehr eine kurze Strecke, während Eratosthenes den ganzen Bogen direkt zu bestimmen suchte. Bessel hat aus den zehn besten der damals vorhandenen Gradmessungen und mit Hilfe des von Gauss eingeführten Ausgleichsverfahrens einen Wert der Äquatorachse und der Abplattung berechnet. Diese Erddimensionen liegen noch heute vielen Tafeln zugrunde. Man glaubte damit einen definitiven Wert der Abplattung gefunden zu haben und war nun sehr erstaunt, als wenige Jahrzehnte später die neueren Gradmessungen einen ganz anderen Wert ergaben. War man zuerst geneigt, diese Unterschiede Beobachtungsfehlern zuzuschreiben, so erkannte man bald, daß sie reell sind, daß also die Erde z. B. in Indien einem anderen Ellipsoid entspricht als in Europa und daß man daher von einer einheitlichen Abplattung überhaupt nicht sprechen könne. Es gibt also kein Ellipsoid, welches die ganze Erdoberfläche mit hinlänglicher Genauigkeit darstellt, sondern die Erdoberfläche ist eine viel kompliziertere Fläche, für die man den Namen Geoid erfunden hat (Listing 1873, Bruns 1876). Sie ist identisch

1) H. Haalck: Zur Kuhn-Rittmannschen Theorie über die Beschaffenheit des Erdinnern. Zeitschrift f. Geophysik 1943.

mit der Meeresfläche, wenn wir von deren Bewegung absehen und sie unter den Kontinenten unter der Forderung fortsetzen, daß sie überall auf der Schwererichtung senkrecht stehen soll, ebenso wie die Fläche des Ozeans. Solche Flächen heißt man in der Physik Niveauflächen. Das Geoid ist also jene Niveaufläche der Erde, deren sichtbarer Teil mit der Meeresfläche zusammenfällt.

Die Ursache für diese ungleichmäßige Verbiegung der Erdoberfläche kann nur in der Massenverteilung liegen und da wir annehmen müssen, daß die Massen, je weiter wir ins Innere der Erde kommen, desto regelmäßiger lagern, so dürften die großen Unregelmäßigkeiten alle in der Nähe der Oberfläche liegen.

Wir können zur Bestimmung der Abplattung auch die Schwere verwenden. Daß diese mit der Abplattung im Zusammenhang steht, hat sich schon daraus ergeben, daß sie eigentlich zur Entdeckung dieser Größe geführt hat. In der Tat kann man aus Schwerebeobachtungen, die über die ganze Erde verteilt sind, die Abplattung berechnen. Wir haben noch eine dritte Methode, die Abplattung zu bestimmen, nämlich aus den Mondbeobachtungen. Da die abgeplattete Erde in anderer Weise anziehend auf den Mond wirkt, als wenn sie eine Kugel wäre, so entsteht in der Mondbewegung eine von der Abplattung abhängige kleine Schwankung. Da immer die ganze Erde auf den Mond wirkt, so müßte man hier eigentlich den besten Mittelwert erhalten. Leider ist der Einfluß sehr klein. Theoretisch müssen aber alle drei Methoden: Gradmessung, Schwerebeobachtung und Mondbeobachtung, auf den gleichen Wert der Abplattung führen, da sie in ganz der gleichen Weise von der inneren Schichtung der Erde abhängig sind.

Will man die Abplattung aus Schweremessungen ableiten, so braucht man möglichst viele Beobachtungsstationen, welche über die ganze Erde verteilt sind. Zur Bestimmung der Schwere verwendet man hauptsächlich das Pendel. Da die direkten,

sogenannten absoluten Messungen der Schwere eine sehr schwierige und zeitraubende Arbeit sind, so wird man sie auf wenige Zentralstationen, meist Sternwarten, beschränken, und arbeitet im übrigen nach dem von dem österreichischen General von Sterneek eingeführten Verfahren der relativen Messung, wobei nur der Unterschied in der Schwingungszeit eines und desselben Pendels in der Hauptstation und der Feldstation bestimmt wird, was sehr rasch und sehr sicher geht. Ein Übelstand, der immer als sehr schwer empfunden wurde, bestand darin, daß drei Viertel der Erde vom Ozean bedeckt ist, der bei der ständigen Bewegung des Meeres für solche Messungen unzugänglich ist. Nach einem Versuch von Hecker,<sup>1)</sup> die Schwere auf dem Ozean durch den Einfluß des Gewichtes der Luft auf die Siedetemperatur des Wassers zu messen, der zwar die Durchführbarkeit bewies, aber auch gezeigt hat, daß das Verfahren sehr umständlich und empfindlich ist, gelang es dem holländischen Gelehrten Vening Meinesz,<sup>2)</sup> Pendelbeobachtungen im Unterseeboot zu machen. Bei einem getauchten Unterseeboot ist die Schiffsbewegung sehr gedämpft und wenn man überdies einen Apparat konstruiert, bei welchem sich die Schiffsbewegung von selbst eliminiert, so erhält man vollkommen brauchbare Werte der Schwere. Eine wesentliche Unterstützung findet das Verfahren noch dadurch, daß wir heute im Echolot einen Apparat besitzen, der gestattet, in wenigen Sekunden die Meerestiefe am Beobachtungspunkte zu bestimmen, während eine einzige Lotung sonst viele Stunden in Anspruch genommen hat. Überdies gibt es nun auch schon Gravimeter, das sind Apparate, die direkt das Ablesen der Schwere an einer

---

<sup>1)</sup> O. Hecker: Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean. Veröffentl. d. preuß. geol. Institutes, N. F. 11, ferner Nr. 16 und 20.

<sup>2)</sup> F. A. Vening Meinesz: Gravity expeditions at sea 1923—30. I. 1932, II. 1934.

Skala erlauben, so daß in wenigen Minuten eine Schwerewert gewonnen werden kann.

Man kann sich nicht wundern, daß die Schwerewerte einen sehr komplizierten Verlauf zeigen. Üben doch die gesamten Massenunregelmäßigkeiten, die die Erdoberfläche erfüllen, Kontinente, Gebirge und Meere usw., ihre anziehende Wirkung aus, aber man hat geglaubt, daß, wenn man dies in Rechnung zieht, dann ein viel regelmäßiger Verlauf verbleiben werde. Da hat man sich aber sehr getäuscht. Wenn man diese Korrektion, die den Namen Bouguersche Korrektion trägt, anbringt, so ist der verbleibende Verlauf ebenso kompliziert wie früher, aber merkwürdigerweise vielfach ins Gegenteil verkehrt. Wo früher die Schwere groß war, erscheint sie nun kleiner als normal, so daß man zu der Idee kam, daß die Massen, die oben aus der Erde herausragen, in irgendeiner Weise unten fehlen. So ist es schon sehr merkwürdig, daß die Schwere auf dem Ozean im allgemeinen ganz normal erscheint, obwohl doch der Ozean einen ungeheuren Massendefekt gegenüber den Kontinenten vorstellt, denn diese haben eine Dichte von etwa 2·7, während das Meer nur die Dichte 1 hat. Es ist also gar nicht anders denkbar, als daß sich unter dem Meere besonders schwere Massen oder Massenanhäufungen befinden. Der erste, der versuchte, die Größe der Defekte unter den Gebirgen zu berechnen, war Sterneck.

Schließlich kam man zu der Überzeugung, daß, wenn man die sichtbaren Massenunregelmäßigkeiten in die Erde hineinrückt, dann ein regelmäßigerer Verlauf der Schwere entsteht und daraus hat sich der Begriff der Isostasie oder des Massengleichgewichtes in der Erdkruste entwickelt, welches darin besteht, daß über jeder Flächeneinheit einer in der Tiefe liegenden Ausgleichfläche gleichviel Masse liegt. Wird dieses Gleichgewicht irgendwie gestört und entsteht z. B. ein Übergewicht an einer Stelle, so wirkt der Druck dahin, daß sich in längerer oder kürzerer Zeit das Gleichgewicht

wieder herstellt, ein Vorgang, der natürlich immer möglich ist, wenn wir voraussetzen, daß die tieferliegenden Schichten mehr und mehr plastisch sind. Dies wird auch durch den Umstand gefördert, daß die Temperatur gegen das Erdinnere steigt, wie die Beobachtungen beweisen. Wie weit die durch die geotherme Tiefenstufe gekennzeichnete Temperaturzunahme nach dem Inneren anhält und welche Temperatur die Erde im Mittelpunkte hat, ist uns unbekannt. Da nun die Erde ständigen Veränderungen unterworfen ist, so wird auch das Gleichgewicht unaufhörlich gestört. Es wird also immer Gebiete geben, für welche die Isostasie nicht mehr oder noch nicht gilt; namentlich junge Formationen werden noch in unausgeglichenem Zustand sein, während alte Formationen schon isostatisch gelagert sind. In der Tat sind fast alle vulkanischen Gegenden Gebiete eines Schwereüberschusses. Im allgemeinen aber können wir sagen, daß wir dem Zustand der Isostasie viel näher sind, als dem nichtisostatischen.

Das Problem, aus den Schwerstörungen auf die Lage der störenden Massen zu schließen, ist unlösbar, da es unendlich viele Massenverteilungen gibt, die sich in den gleichen Störungen äußern. Um also brauchbare Vorstellungen über die Lagerung der störenden Massen zu erhalten, muß man gewisse mehr oder minder wahrscheinliche mit unserem sonstigen Wissen verträgliche Annahmen machen. Zur Erklärung sind vornehmlich zwei solche Annahmen herangezogen worden. Die erste, nach Pratt<sup>1)</sup> benannt, versucht die Erscheinung der Isostasie durch Dichteunterschiede zu erklären, derart, daß die Massendefekte dadurch entstehen, daß die Massen an dieser Stelle bis zu einer gewissen Tiefe geringere Dichte haben. In dieser Tiefe befindet sich die Ausgleichsfläche. Man kann sich davon durch einen Versuch etwa

1) I. H. Pratt: On the attraction of the Himalayan Mountainse Phil. Trans. of London 145 (1855). On the deflection of the plumbline: in Indic. phil. Trans. 149.

folgendes Bild machen: Wir stellen aus verschiedenen Stoffen, also z. B. Cu, Fe, Zn, Ni, Prismen von einer Länge her, die der Dichte verkehrt proportional ist, die also alle das gleiche Gewicht haben. Setzen wir nun die Prismen in Quecksilber, so sinken sie alle bis zur gleichen Tiefe ein, während das obere Ende bei den leichteren Stoffen höher heraussteht als bei den schwereren; die gemeinsame untere Begrenzung aller Prismen stellt die Ausgleichsfläche vor. So ähnlich müssen wir uns auch die isostatische Lagerung der Massen der Erdoberfläche vorstellen. In der Tat hat es sich gezeigt, daß die höher aufragenden Massen in der Regel auch kleinere Dichte haben.

Dieser Theorie von Pratt steht die von Airy<sup>1)</sup> gegenüber, nach welcher die Kontinente als Schollen aufzufassen sind, die auf einem dichteren plastischen Untergrund schwimmen, und dabei so weit einsinken, als eben das archimedische Prinzip verlangt. Diese Schollentheorie wird durch geographische und geologische Argumente gestützt. Die Geographie zeigt, daß fast die Hälfte der Welt sich auf zwei Höhenstufen konzentriert. Der größte Teil des Festlandes hat eine Höhe von 0 bis 100 m und der größte Teil des Meeres eine Tiefe von 4000 bis 5000 m, während die übrigen Höhen nur mit geringen Prozentsätzen auftreten, so daß also die Kontinente und Meere von vornherein schon eine plattenartige Anordnung zeigen. Die Geologie dagegen zeigt das Vorhandensein von zweierlei Materie, das auf der Oberfläche fast überall auftretende Sial und das aus der Tiefe kommende Sima. Die erste, mit einer Dichte von etwa 2·6 bis 2·8, zeichnet sich durch größeren Gehalt an Aluminium aus gegenüber dem an Magnesium reicheren Sima, dessen Dichte 2·8 bis 3·3 ist. Die Dicke der Scholle nimmt man mit etwa 30 bis 50 km an. Der Massendefekt entsteht in diesem Falle dadurch, daß die

<sup>1)</sup> J. B. Airy: On the compensation effect of the attraction of mountain-masses. Phil. Trans. of London 149.

eintauchende Sialmasse an dieser Stelle die schwerere Simamasse verdrängt hat. Die Schollen, die weiter herausragen, sind auch tiefer eingetaucht. Eine gemeinsame Ausgleichsfläche gibt es in diesem Falle erst in der Tiefe der am tiefsten eintauchenden Scholle. In keinem der beiden Fälle aber darf man annehmen, daß sich die Kompensation auf jede Einzelheit der Massenverteilung erstreckt. Erst große Komplexe werden gegeneinander ausgeglichen sein. Die Kompensation ist also nicht lokal, sondern regional. Von diesen beiden Theorien scheint wohl die letztere, also die von Airy, den Tatsachen besser zu entsprechen.

Aus dieser Schollentheorie ziehen wir gleich eine wichtige Folgerung. Wenn die Scholle auf dem Sima schwimmt und in dieselbe 30 bis 50 *km* eintaucht, so erfährt sie einen hydrostatischen Druck, nicht nur von unten, sondern auch von der Seite, der bis zum Boden der Scholle auf 10.000 bis 15.000 Atmosphären anwächst. Unter dem Einfluß dieses ungeheuren stetigen Druckes wird nicht nur die Masse plastische Eigenschaften annehmen, sondern es wird sich auch die Scholle verbiegen und damit wird die Bildung eines Gebirges beginnen. Es läßt sich zeigen,<sup>1)</sup> daß auf einer Scholle von  $1000 \times 1000$  *km* im Laufe von 10.000 Jahren in der Mitte ein Gebirge entsteht etwa von 1000 *m* Höhe, in Form einer Insel von etwa 400 *km* Radius, die von einem etwa 600 *m* tiefen Ozean umgeben ist. Wählen wir die Scholle größer, etwa von kontinentalem Ausmaß; so erhalten wir bald Gebirge von riesiger Höhe, da diese quadratisch mit den Dimensionen der Scholle wächst. Es werden also große Falten entstehen, die unter ihrem eigenen Gewicht umkippen und Deckfalten bilden werden, die natürlich schon während der Entwicklung zum Teil der Erosion anheimfallen und das Bild bieten werden, das wir in

---

<sup>1)</sup> A. Prey: Über die Möglichkeit der Gebirgsbildung durch den hydrostatischen Druck in der Erdkruste. Sitzungsber. Wiener math.-naturw. Klasse, Abt. II a, 151. Bd.

der Natur beobachten. Wären nun die beiden Materialien, das Sial und das Sima, von unbegrenzter Beweglichkeit, wie echte Flüssigkeiten, so müßte der Vorgang damit enden, daß das leichtere Sial wieder ganz herausgepreßt wird. Da aber die Plastizität nicht so groß ist, so wird es nicht soweit kommen können. Aber immerhin wird ein Teil der Sialmasse austreten und sich über das benachbarte Sima ergießen. Diese Sialmasse wird nun ihrerseits einzusinken beginnen und durch den hydrostatischen Druck neuerlich zur Gebirgsbildung angeregt werden. Jedenfalls also haben wir im hydrostatischen Druck eine Kraft, welche zu allen Gebirgsbildungen ausreicht. Die oft herangezogenen und immer wieder abgelehnten Kräfte aus der Schrumpfungstheorie sind dann überflüssig.

Die nächste Frage, die auftaucht, ist die, ob diese Schollen beweglich sind oder wenigstens in früherer Zeit beweglich waren, oder ob sie noch genau an der gleichen Stelle liegen, wie zu Anfang. Da kommen wir auf die bekannte Theorie der Kontinentalverschiebungen von Wegener<sup>1)</sup> zu sprechen, die sich allerdings zunächst auf die äußere Ähnlichkeit der Küstenformation speziell der Westküste von Afrika-Europa und der Ostküste von Amerika gründet, aber auch sonst noch durch geologische, botanische und zoologische Argumente gestützt wird. Ist nun diese Theorie richtig, so muß sich auch ein geophysikalischer Grund finden, der es möglich macht, daß in früherer Zeit nicht nur Amerika an die afrikanische Küste angeschlossen war, sondern auch Südafrika mit Indien, Madagaskar, Australien und der Antarktis einen großen Kontinent gebildet haben, in dessen Mitte damals der Südpol lag. Es müßte also das Vorhandensein einer Kraft gezeigt werden, die diese Landmassen in ihre heutige Stellung gebracht hätte.

---

<sup>1)</sup> A. Wegener: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, Braunschweig 1929.

Als eine solche Kraft hat man zunächst die Polfluchtkraft angesehen, die dadurch entsteht, daß der Schwerpunkt der schwimmenden Scholle höher liegt, als der des verdrängten Sima. Dadurch entsteht in der Scholle ein Überschuß an Fliehkraft, die die Scholle vom Pol zum Äquator treibt. Diese Kraft müßte riesig groß sein, da die Schollen tief eingetaucht sind und daher gegen einen ungeheuren Stirnwiderstand bewegt werden sollten. Im Gegenteil dazu findet man aber,<sup>1)</sup> daß sich in den Ausdrücken für die Polfluchtkraft bei einer schwimmenden Scholle alle größeren Glieder wegheben und nur ein ganz kleiner Rest bleibt, der auch noch verschwindet, wenn die Scholle um einen gewissen kleinen Winkel kippt. Die Polfluchtkraft dürfte also ganz ausscheiden. Dagegen käme eine andere Kraft in Betracht, die sich aus der Fluttheorie ergibt.

Es ist bekannt, daß die Gezeiten eine durch die Anziehung des Mondes und der Sonne hervorgerufene periodische Bewegung des Meeres sind; es ist aber gewiß, daß an dieser Bewegung auch die feste Erde teilnimmt. Es war Thomson,<sup>2)</sup> der zuerst diesen Gedanken ausgesprochen und gezeigt hat, daß, wenn die feste Erde auch von der Flutbewegung ergriffen wird, in der Meeresflut nur noch die Differenz der Bewegung zum Ausdruck kommen kann. Es galt also festzustellen, ob an einem Flutmesser der ganze theoretische Wert der Flut gemessen wird oder nur ein Teil. Es ist klar, daß sich zu diesen Untersuchungen nur die langsamen Fluten, also etwa die 14tägige Flut, eignen kann, weil bei den kurzperiodischen die Wasserbewegung zu stürmisch ist. In der Tat hat sich gezeigt, daß die Flutmesser nur etwa zwei Drittel des richtigen Wertes zeigen. Eine viel genauere Methode beruht auf der Verwendung des Horizontalpendels,

<sup>1)</sup> A. Prey: Über die Polfluchtkraft. Geol. Beiträge zur Geophysik. Bd. 48, 1936.

<sup>2)</sup> W. Thomson & P. S. Taist: Treatise on natural philosophy vol. I, part II.

eines Pendels, welches nicht wie ein gewöhnliches Pendel um eine horizontale Achse schwingt, sondern um eine fast vertikale, etwa wie ein Türflügel. Ein solches Instrument ist äußerst empfindlich, sowohl für die Änderung der Schwererichtung als auch für die Änderung der Aufstellung. Auf Grund dieser sehr genauen Untersuchungen<sup>1)</sup> hat es sich nun ergeben, daß der Boden tatsächlich eine Flutbewegung mitmacht, d. h. also, sich täglich zweimal hebt und senkt, u. zw. um eine recht bedeutende Größe, von der Größenordnung 3 bis 4 *dm*.

Man kann nun auch versuchen, den Grad dieser Nachgiebigkeit zahlenmäßig zu bestimmen, mit anderen Worten, die Festigkeit der Erde auszurechnen, unter der Annahme, daß wir die Erde einer Kraft gegenüber, die nur die kurze Periode eines Tages hat, als rein elastisch betrachten können, nur dürfen wir dabei nicht mit anderen Forderungen in Widerspruch geraten. So muß für die Kruste der Erde ein Wert herauskommen, der mit dem übereinstimmt, den die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen verlangt. Aber noch mehr. Es zeigt sich nämlich aus den Erdbebendiagrammen, daß Transversalwellen den Erdkern nicht durchdringen können, was darauf schließen läßt, daß die Masse hier den Charakter einer Flüssigkeit hat. Man muß also annehmen, daß die Festigkeit der Erde von der Oberfläche nach innen zuerst wächst, und dann wieder stark abnimmt. Unter der Annahme, daß die Festigkeit in der Mitte bis auf Null heruntergeht, ergibt sich aus meinen an Schweydar angelehnten Untersuchungen<sup>2)</sup> in einer Tiefe von etwa 1750 *km*

1) W. Schweydar: Untersuchungen über die Gezeiten der festen Erde und die hypothetische Magmaschicht. Veröffentl. d. preuß. geol. Institutes, N. F. 54.

2) W. Schweydar: Theorie der Deformation der Erde durch Flutkräfte; Veröffentl. d. preuß. geod. Institutes, N. F. 66.

A. Prey: Über die Elastizitätskonstante der Erde: Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd 23, 1929.

ein Maximum von  $15 \cdot 8 \cdot 10^{11}$  CGS, d. i. etwa das Doppelte der Festigkeit des Stahles. Gegen die Oberfläche sinkt die Festigkeit auf  $3 \cdot 10^{11}$ , wie es die Erdbeben-theorie verlangt.

Es gibt noch eine Methode zur Bestimmung der Festigkeit der Erde, die auf der Theorie der sogenannten Polschwankung beruht, die darin besteht, daß der Pol um eine Mittellage auf der Erde einen kleinen Kreis beschreibt, allerdings mit einem Halbmesser von nur 10 m, was aber zur Folge hat, daß die geographische Breite sich ändert und mit einer Amplitude von  $0.3''$  um einen Mittelwert schwankt. Diese Erscheinung, die man schon in der Mitte des XIX. Jahrhunderts gemutmaßte und gesucht hat, wurde in den achtziger Jahren von Küstner<sup>1)</sup> in Berlin einwandfrei festgestellt. Seither wird auf sechs Stationen, die am 39. Parallelkreis rund um die Erde verteilt sind, mit gleichen Instrumenten nach einheitlicher Methode unaufhörlich die geographische Breite gemessen, so daß sich nun schon ein riesiges Beobachtungsmaterial aufgehäuft hat. Die Ursache dieser Erscheinung sucht man in dem Umstande, daß sich die Erde um eine Achse dreht, die nicht genau mit der Symmetrieachse des Rotationsellipsoides zusammenfällt, sondern um eine Mittellage herumwandert. Bei einer ganz festen Erde müßte die Bewegung eine Periode von 305.6 Tagen haben, die sogenannte Eulersche Periode. Das Beobachtungsmaterial zeigt aber gerade diese Eulersche Periode nicht, sondern eine Periode von 420 bis 430 Tagen, die als Chandlersche Periode bekannt ist. Nach Newcomb<sup>2)</sup> nun aber gilt für eine Erde, die nicht ganz fest, sondern etwas nachgiebig ist, eine verlängerte Periode; man ist

---

1) F. Küstner: Neue Methode zur Bestimmung der Aberrationskonstante nebst Untersuchungen über die Veränderlichkeit der Polhöhe. Berlin 1888.

2) L. Newcomb: On the periodic variation of latitude. Astr. Journ., XI. Bd.

heute der Ansicht, daß die Chandlersche Periode nichts anderes ist als die verlängerte Eulersche Periode und man kann aus der Größe dieser Verlängerung auch auf die Nachgiebigkeit der Erde schließen. Das Resultat, das man auf diesem Wege erhält, stimmt mit dem aus dem Horizontalpendel gut überein, doch darf nicht verschwiegen werden, daß sich bei der Behandlung des ungeheuren Materials, welches die internationale Polhöhenbeobachtung aufgehäuft hat, einige Merkwürdigkeiten gezeigt haben, deren Erklärung bisher noch nicht gelungen ist.

Schumann<sup>1)</sup> hat schon vor 40 Jahren darauf aufmerksam gemacht, daß die Art und Weise der Reduktion eine wahrscheinlich vorhandene tägliche Schwankung der geographischen Breite ganz verschleiert und wir daher ein ganz unrichtiges Bild der Erscheinung erhalten. Wenn das Horizontalpendel schon eine Hebung und Senkung des Bodens, die durch die Flutkraft hervorgerufen wird, nachweist, so scheint es unglaublich, daß damit nicht auch Horizontalbewegungen und daher Schwankungen der geographischen Breite und auch der geographischen Länge im gleichen Rhythmus verbunden sein sollten. Es ist also jedenfalls notwendig den internationalen Breitendienst auf die Untersuchung, dieser Frage umzustellen. Wir müssen darauf gefaßt sein, daß wir von dieser Seite noch Überraschungen erleben werden und unsere Anschauungen ganz ändern müssen.

Zu dieser Flutkraft gehört auch ein beständig nach Westen wirkender Zug, der am Äquator am größten ist. Dieser unaufhörlich wirkenden Kraft gegenüber zeigt die Erde plastische Eigenschaften, d. h. die Kruste wird langsam nachgeben und nach Westen wandern. Im Gegensatz aber zu der oben erwähnten Polflucht kraft wirkt diese Kraft nicht auf die Kontinente allein,

---

<sup>1)</sup> R. Schumann: Numerische Untersuchungen über Polschwankung und Aberrationskonstante. Ergänzungsheft zu den Astr. Nachr. Nr. 11 und Astr. Nachr. 173.

sondern auch auf den Untergrund.<sup>1)</sup> Sie wandern daher mit-sammen. Die Scholle bewegt sich also nicht wie ein Schiff, das im Wasser schwimmt und dieses stets verdrängen muß, sondern wie ein Eisblock, der mit der Strömung geht. Sollen aber auf diesem Wege gegenseitige Verschiebungen der Kontinente zu-stande kommen, so können diese nur auf Unregelmäßigkeiten beruhen, derart, daß eine Scholle aus irgendeinem Grunde nicht mitkommt oder aufgehalten wird, vielleicht an einer Stelle hängen bleibt und sich nun verdreht, wodurch auch Bewegungen ent- stehen können, die nicht genau nach Westen gerichtet sind. Man erkennt diese Bewegung an den am Äquator nach Westen aus- gebogenen Küsten sowie aus den nach hinten zurückgebliebenen Inselgüirlanden Ost-Asiens. Diese im wesentlichen westlich ge- richtete Bewegung wird ergänzt durch die Möglichkeit einer Pol- wanderung, derart, daß der Nordpol in früheren Perioden an einer anderen Stelle wie heute gelegen hätte und daher auch die West- richtung eine andere gewesen wäre wie jetzt, wodurch ebenfalls die Bewegung der Kontinente in anderer Richtung erklärt werden kann. Solche Polwanderungen sind nun tatsächlich möglich,<sup>2)</sup> da die Erde im großen und ganzen als plastischer Körper aufgefaßt werden muß, der sich nach der Drehungsachse orientiert, aber durch das Vorhandensein einer äußerst festen Oberschichte, wie sie die Kontinente und Gebirge vorstellen, beständig aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Dadurch entstehen Polbewegungen, die den Pol über ungeheure Gebiete der Erde führen. Wegen der inneren Reibung ist nach Milankovich<sup>3)</sup> die Bahn des Poles eine

<sup>1)</sup> A. Prey: Flutreibung und Kontinentalverschiebung, *Geöl. Beiträge zur Geophysik*, Bd. XV, 1926.

<sup>2)</sup> A. Prey: Über Polschwankung und Polwanderung, *Geöl. Beiträge zu Geophysik*, Bd. 56, 1940.

<sup>3)</sup> M. Milankovich: Numerische Ausrechnung der säkulären Bahnkurve der Rotationspole der Erde. *Bull. de l'acad. Serbe. A. 1*, Belgrad 1933.

Spirale, die schließlich an einem Punkt enden muß, für den die Massenlagerung in der Kruste so ist, daß eine Gleichgewichtsstörung nicht mehr eintritt. Die Länge der Periode ist sehr empfindlich gegen Änderungen in der Massenlagerung, wodurch es sich auch erklärt, wenn der Pol zu manchen Zeiten rascher gelaufen ist, zu anderen Zeiten wieder fast still gestanden hat.

Es sieht nun so aus, als ob alles in bester Ordnung wäre. Wir haben für alle Erscheinungen, die mit der Kontinentalwanderung verbunden sind, eine Erklärung gefunden. Wenn man aber diese Erklärungen näher ansieht, so wird man überall Schwierigkeiten finden. Die Polfluchtkraft ist wahrscheinlich gar nicht vorhanden. Die Westdrift der Gezeiten ist wohl ganz bestimmt vorhanden, aber größere Wirkungen sind unwahrscheinlich, da nur eine durch Zufälligkeiten bedingte Differenz in Erscheinung tritt. Auch kann man ihr größere Beträge nur zuschreiben zu einer Zeit, wo die Zähigkeit der Erde viel geringer war. Damals konnten allerdings diese Verschiebungen sehr groß werden. Die Polwanderung endlich kommt nur zustande, wenn wir der Erde eine bestimmte Konstitution zuschreiben, die sie vielleicht gar nicht hat. Wenn nun die Geologen und Paläobotaniker usw. durchaus die Kontinentalwanderung verlangen und die Erscheinungen der Übereinstimmung von geologischen Formen, der Flora und Fauna auf beiden Seiten des atlantischen Ozeans auf gar keinem anderen Weg erklärt werden können, so müßten die oben angeführten geophysikalischen Einflüsse tatsächlich in der verlangten Form wirksam gewesen sein. Aber gibt es nicht doch noch eine andere Lösung der Frage? Viele Geologen halten noch immer an der Landbrückentheorie fest. Es fragt sich nun, ob es nicht möglich ist, diese auf Grund der Schollentheorie zu stützen. Die Hauptschwierigkeit dabei besteht darin, das Versinken der Landbrücken in Tiefen von zwei- und mehr tausend Metern zu erklären. Wir legen uns zunächst die Frage vor, welchem Umstand die Schollen

ihre Existenz verdanken. Es ist naheliegend anzunehmen, daß es eine Zeit gegeben hat, da die Schichte, aus welcher die Scholle besteht, also das Sial, die ganze Erde umschlossen hat. Wo sind aber dann die fehlenden Teile der Kruste hingekommen? Die Antwort darauf gibt uns eine Theorie, die behauptet, daß sich aus diesen Teilen der Mond gebildet hat, und es sei das Becken des Pazifischen Ozeans die Narbe, die das Losreißen des Mondes von der Erde zurückgelassen hat.<sup>1)</sup> In der Tat sind die hier fehlenden Massen der Größenordnung nach und auch nach ihrer Dichte mit der des Mondes gut vergleichbar. Dies führt wieder zu der Frage, ob eine solche Loslösung überhaupt möglich ist und ob der Mond nicht, wie vielfach behauptet wird, durch die Erde eingefangen wurde. Demgegenüber ist festzustellen, daß das Einfangen eines Körpers durch einen anderen vielleicht prinzipiell möglich ist, daß aber dazu sehr spezielle und selten verwirklichte Bedingungen gehören. Im allgemeinen wird bei großer Annäherung zweier Himmelskörper die gegenseitige Geschwindigkeit so groß werden, daß sie aneinander vorbeirasen und sich in langgestreckten Bahnen wieder entfernen werden, um wahrscheinlich überhaupt nie mehr wieder zusammenzukommen. Dagegen ist das Abtrennen eines Teiles der Masse eines Himmelskörpers ein nach den Rotationsgesetzen vollständig möglicher Vorgang.

Wenn eine rotierende Masse von planetarischer Größe, die in der Lage ist, etwa durch Wärmeverlust ihre Dichte zu ändern, sich selbst überlassen bleibt, so wird sie unter dem Einfluß der langsam wachsenden Dichte ihre Rotationsgeschwindigkeit und damit ihre Gestalt verändern. Da dieser Vorgang sich immer sehr langsam vollzieht, so wird immer eine Gleichgewichtsfigur erreicht werden und die Masse eine Reihe solcher Gleichgewichtsfiguren durchlaufen. Den Anfang der Reihe bildet natürlich die schwach abgeplattete und langsam rotierende Kugel. Je größer

<sup>1)</sup> W. H. Pickering, Journ. of geology 15, 23, 1907.

die Dichte wird, um so rascher wird die Rotation und desto mehr wird sich der Körper abplatteln. Das geht aber, man kann sagen merkwürdigerweise, nicht unbegrenzt weiter, sondern es wird ein Grenzzustand erreicht werden, von welchem eine neue Reihe beginnt, in der die Rotationsgeschwindigkeit wieder abnimmt. Die ursprüngliche Reihe ginge auch noch weiter, aber die dazugehörigen Figuren sind nicht stabil und könnten nur erreicht werden, wenn die Masse von ganz idealer Homogenität wäre, was aber nie der Fall ist. Die neue Reihe besteht nicht mehr aus Rotationsellipsoiden, sondern die eine Äquatorachse verlängert sich so, daß eine mehr eiförmige Figur entsteht; aber auch diese Reihe findet ein Ende an einer Stelle, wo die Masse die Tendenz zeigt, an einem Ende eine Einschnürung zu bilden, also etwa wie eine Birne. An dieser Stelle geht aber die Stabilität überhaupt verloren. Es muß eine turbulente Bewegung einsetzen, die zunächst nicht zur Ruhe kommen kann, weil ein Gleichgewichtszustand überhaupt nicht existiert. Der nächstgelegene Gleichgewichtszustand besteht bereits aus zwei Massen, die in der Weise umeinander rotieren, daß die sich immer die gleiche Seite zuwenden. Nach Überwindung dieser turbulenten Zeit hat sich also ein Teil der Masse abgespalten, u. zw. zeigt die Theorie, daß es kein ganz kleiner Teil sein kann, sondern wenigstens gerade von der Größenordnung unseres Mondes; daher können auch die anderen Monde unseres Planetensystems, die im Verhältnis zu ihren Hauptkörpern viel kleiner sind, nicht auf diesem Wege entstanden sein. Dagegen nimmt man diesen Vorgang für die Entstehung enger Doppelsterne im Fixsternsystem in Anspruch und neigt auch zu der Ansicht, daß der Vorgang bei gewissen Veränderlichen dem oben erwähnten turbulenten Übergangszustand entspricht.

Wenn wir nun an dieser Theorie der Entstehung des Mondes, obwohl sie natürlich auch manchem schweren Einwand begegnet, festhalten, so ist es zunächst verständlich, daß gerade im Gebiet

des Großen Ozeans als dem Zentrum der Katastrophe die Sialhülle ganz weggerissen wurde. In der Tat zeigt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen, daß am Boden des Großen Ozeans das Sial vollständig fehlt, während in den übrigen Ozeanen noch eine Sialschicht existiert. Andererseits ist wohl anzunehmen, daß bei dieser großen Katastrophe auch der übrige Teil der Sialschicht in Trümmer gegangen ist, die sich dann über die Erde zerstreut hätten, wobei der Umstand, daß sie zu dieser Zeit noch nicht eingesunken waren, ihre Beweglichkeit erleichterte. Auch die Polfluchtkraft ist für nicht eingetauchte Schollen größer und die Westdrift der Flut viel einflußreicher, nicht nur weil die Massen damals noch beweglicher waren, sondern auch wegen der unmittelbaren Nähe des Mondes.

Es scheint mir nun sehr gut denkbar, daß bei den großen Schollen nur die oberste spröde Decke zersprengt wurde, daß also das Auseinanderreißen nur die obersten Teile betraf, deren Konturen heute noch die frühere Zusammengehörigkeit erkennen lassen, die zähen und wärmeren unteren Massen aber in Verbindung geblieben sind. Solche Verbindungen zwischen den Kontinenten hat auch Gutenberg angenommen und in allen Ozeanen, mit Ausnahme des Stillen, nachgewiesen. Da nun damals die Schollen noch nicht eingesunken waren, so lagen auch diese Verbindungen noch an der Oberfläche und bildeten die Landbrücken. Mit dem Einsinken der Kontinente versank auch die Landbrücke in früheren oder späteren Epochen der Erdgeschichte.

Wenn wir nun zurückblicken, so können wir sagen, daß wir schon recht gute Vorstellungen über die Konstitution der Erde und speziell ihrer Kruste haben und daß besonders die Schollentheorie sich als sehr fruchtbar erwiesen hat, die nicht nur mit der Vorstellung der Isostasie im Einklang ist, sondern auch die Entwicklung der Theorie einer Gebirgsbildung gestattet, die auf die

Schrumpfungstheorie verzichten kann und im Zusammenhang mit der Theorie der Entstehung des Mondes aus der Erde die merkwürdigen Ähnlichkeiten in der Küstenbildung und die Bildung und das Versinken von Landbrücken verständlich macht, während Wegeners Theorie der Kontinentalverschiebungen der Erklärung die größten Schwierigkeiten entgegensetzt.

Es scheint also, daß das Antlitz der Erde im wesentlichen durch die Spuren der großen Katastrophe der Mondentstehung bestimmt ist und man darf sich nicht mehr wundern, daß andere Planeten, z. B. Mars, die keinen auf diese Weise entstandenen Mond besitzen können, ganz andere Oberflächenformationen zeigen, Formationen, die uns ganz fremd anmuten.

Immerhin sind noch viele Punkte, die einer weiteren Klärung und Sicherung bedürfen. Zunächst muß noch von der Isostasie nachgewiesen werden, daß sie wirklich eine weltweite Erscheinung ist. Dazu ist notwendig, daß die Zahl der Schwerebeobachtungen auf dem Ozean noch wesentlich vergrößert wird und daß auch die großen Landgebiete, wie etwa Sibirien oder Südamerika und Zentralafrika, mit einem Netz von Schwerestationen gleichmäßig überdeckt werden. Endlich müssen auch die Verhältnisse bei der Polschwankung aufgehellt und festgestellt werden, ob es sich dabei um eine allen Orten gemeinsame Erscheinung oder nur um die Bewegung einzelner Schollen handelt. Wir hoffen, daß auch diese Sache, die wie die Isostasie ein großes Beobachtungsmaterial verlangt, nach dem glücklichen Ende des Krieges ihrer Lösung zugeführt werden kann.