

Ueber die physikalische Beschaffenheit des Erdinnern.

Von **H. Benndorf.**

Nach einem Vortrag*) gehalten in der Geologischen Gesellschaft in Wien
am 8. März 1908.

Liest man in einem Handbuche, etwa der Geophysik von Günther, nach, was alles im Laufe der Jahrhunderte über die Beschaffenheit des Erdinneren behauptet wurde, so wird es sehr begreiflich, wie besonders einen Nichtphysiker Grauen erfassen kann; weniger darüber, daß nacheinander die verschiedensten Hypothesen aufgestellt wurden, als vielmehr darüber, daß gleichzeitig u. zw. bis in die neueste Zeit hinein von hervorragenden Gelehrten die widersprechendsten Ansichten vertreten wurden, u. zw. mit einer Ueberfülle an Phantasie, wie auf wenig anderen Gebieten der kosmischen Physik.

Es muß daher der geophysikalischen Forschung des letzten Jahrzehntes als besonderes Verdienst angerechnet werden, daß sie auf den verschiedensten Gebieten Tatsachen ans Licht gebracht hat, die einheitlich zusammengefaßt gestatten, ein Bild vom Erdinnern zu entwerfen, das in seinen Hauptzügen auf sicherer Basis ruht und vermutlich der Wirklichkeit recht nahe kommt.

Gestatten Sie mir daher, meine Herren, Ihnen heute in Kürze eine kritische Zusammenstellung alles dessen zu geben, was wir vom physikalischen Standpunkte aus über das Erdinnere wissen.

Ganz ohne Hypothesen kann es natürlich bei einem direkter Erforschung so unzugänglichen Gegenstände nicht abgehen, ich werde mich aber bemühen, begründete Vermutungen als solche hervorzuhoben.

*) Dieser Vortrag schloß sich an einen „Ueber Methoden und Ziele physikalischer Erdbebenforschung“ an, der hier nicht zum Abdrucke kommt, weshalb bezüglich der näheren Details des 5. Abschnittes auf die Literatur verwiesen werden muß.

1. Gestalt der Erde.

Denken wir uns die Ozeane durch zahlreiche Kanäle in den Kontinenten verbunden, so liegt die gesamte Wasseroberfläche, von Fluterscheinungen abgesehen, in einer Fläche, die von den Geodäten als mathematische Erdoberfläche oder Geoid bezeichnet wird. Zu ihrer Ausmessung gelangt man auf verschiedenen Wegen und die sichersten Werte ergeben sich aus Kombination geodätischer und Schweremessungen.

Der Uebersichtlichkeit halber will ich die verschiedenen Methoden getrennt besprechen. Schon Huygens und Newton nahmen aus theoretischen Gründen an, daß das Geoid keine exakte Kugel, sondern ein an den Polen abgeplattetes Rotationsellipsoid sei; ihre Vermutung wurde durch die zahlreichen Gradmessungen seit dem 17. Jahrhundert bestätigt.

Zur Charakterisierung eines solchen Rotationsellipsoides sind zwei Zahlen erforderlich; man pflegt die große Halbachse a der Meridianellipse und die Abplattung $a = \frac{a-b}{a}$ den relativen Unterschied zwischen der großen und der kleinen Halbachse b zu wählen.

Der erste Weg, der zu ihrer Kenntnis führt, ist der geodätische der Gradmessungen, deren Prinzip darin besteht, daß zwischen zwei Orten bekannten geographischen Breiteunterschiedes, die auf demselben Meridian liegen mögen, die Länge des Meridianbogens in Metern ausgedrückt gemessen wird; aus einer solchen Gradmessung läßt sich der Krümmungsradius des Meridianbogens an der betreffenden Stelle bestimmen, aus einer größeren Zahl aber die Meridiankurve festlegen.

Die Gesamtheit besonders der feinsten modernen Gradmessungen, hat nun ergeben, daß das Geoid sehr nahe wirklich ein abgeplattetes Rotationsellipsoid ist, so daß es für viele Zwecke genügt, die kleinen, aber sicher gestellten Abweichungen von dieser Gestalt zu vernachlässigen. Das bereits von Bessel in der Mitte des vorigen Jahrhunderts festgelegte Ellipsoid mit $a = 6377$ km und der Abplattung $a = \frac{1}{299}$ genügt für die meisten Zwecke, als mittlerer Erdradius ergibt sich daraus 6370 km. Die absolute Größe, resp. die genaue Bestimmung der Halbachse a ist von geringerem Interesse als die Größe

der Abplattung, deren geophysikalische Bedeutung aus dem Folgenden zur Genüge erhellen wird.

Unabhängig von den geodätischen Messungen führt zu ihrer Kenntnis ein zweiter Weg, die Schweremessungen. Die Beschleunigung g , die ein kleiner Körper in der Nähe der Erdoberfläche durch die Erdschwere erfährt, setzt sich aus zwei Teilen zusammen; der erste ist am größten und rührt von der Anziehung der Erde her, der zweite von der Zentrifugalkraft infolge der Rotation.

Die Bestimmung von g wird am genauesten durch Pendelmessungen gemacht. Da g umgekehrt proportional dem Quadrate der Schwingungsdauer eines Pendels ist, genügt es, an verschiedenen Punkten der Erde die Schwingungsdauer eines unveränderlichen Pendels zu messen, um Relativwerte der Schwerebeschleunigung zu erhalten. Dank der hoch ausgebildeten Meßtechnik, deren Begründer v. Sterneck ist, gehört der Wert von g zu den am genauest bekannten physikalischen Größen; freilich läßt sich diese Methode nur auf dem Festlande oder dem Polareise durchführen und unsere Kenntnis der Erdschwere über dem größeren, wasserbedeckten Teile der Erde war bis vor kurzem höchst mangelhaft. Durch eine neue von Mohn angegebene und von Hecker ausgearbeitete Meßmethode ist diesem Uebelstande abgeholfen worden. Zu ihrer Erklärung sei folgendes vorausgeschickt:

Bei gleichem Luftdrucke zeigen zwei Quecksilberbarometer an verschiedenen Orten im Meeresniveau und bei gleicher Temperatur verschiedene Höhen der Quecksilbersäulen, wenn an diesen Orten die Erdschwere verschieden und infolgedessen das spezifische Gewicht des Quecksilbers verschieden ist, also am Pole z. B. einen niedrigeren Stand als am Aequator. Außerdem besitzen wir in der Siedepunktsbestimmung reinen Wassers ein Mittel, den Luftdruck unabhängig vom Barometer zu messen.

Die Mohn-Heckersche Methode, die sich zum Unterschiede von Pendelmessungen auch auf Schiffen ausführen läßt, besteht nun darin, daß gleichzeitig mit einer minutiösen Siedepunktsbestimmung von Wasser der Stand eines Quecksilberbarometers abgelesen wird. Aus dem Siedepunkte berechnet sich ein Barometerstand, z. B. bezogen auf die Erd-

schwere von Potsdam, mit dem man den wirklich abgelesenen Stand der Quecksilbersäule vergleicht; der Quotient beider Quecksilberhöhen gibt direkt das Verhältnis der Erdschweren. Bei der geringeren Aenderung des Siedepunktes des Wassers mit dem Luftdrucke wird es Bewunderung erregen müssen, daß diese Methode nur etwa zehnmal ungenauer als die Pendelmethode ist; es reicht aber ihre Genauigkeit hin, um nachzuweisen, daß die Schwere über den Ozeanen ebenso groß ist als über den Kontinenten in gleicher Breite, worauf wir noch später zurückkommen.

Als das Resultat sehr zahlreicher Schweremessungen kann ausgesprochen werden, daß die Schwere, natürlich überall auf das Meeresniveau reduziert, nur von der geographischen Breite abhängt und aus der Formel $g = 978 (1 + 0.00531 \sin^2 B)$ meist genügend genau für die geographische Breite B berechnet werden kann; wie leicht zu ersehen, ist 978 die Erdschwere am Aequator und 0.00531 die relative Zunahme der Schwere vom Aequator zum Pole.

Aus dieser empirisch gefundenen Formel können wir zunächst die wichtige Tatsache erkennen, daß die Massen im Innern der Erde sehr genau symmetrisch um die Erdachse angeordnet sein müssen, weil anderen Falles die Schwere auch mit der geographischen Länge variieren müßte.

Ferner können uns obige Zahlen aber auch dazu dienen, unter Anwendung des Clairautschen Theorems die Abplattung der Erde zu berechnen. Dieses Theorem gibt nämlich einen Zusammenhang zwischen Abplattung, Erdschwere am Pole und Aequator und Zentrifugalkraft am Aequator, die sich ja aus Rotationszeit und Halbmesser des Aequators berechnen läßt, und ergibt eine Abplattung bei Verwendung obiger Zahlen von $\frac{1}{297.8}$

Rechnet man mit einer noch etwas genaueren Formel für die Schwerkraft, so ergibt sich nach Helmert als gegenwärtig sicherster Wert für die Abplattung $a = \frac{1}{298.3}$

Schließlich weisen uns die Astronomen noch einen dritten Weg zur Bestimmung der Abplattung. Berechnet man nämlich die Bahn, die der Mond um die Erde beschreiben würde, wenn

sie eine Kugel wäre, so zeigt sie kleine Abweichungen von der faktisch vorhandenen, die auf die Elliptizität des Erdkörpers zurückzuführen sind; man kann daher aus diesen Störungen der Mondbahn die Abplattung berechnen und findet Werte zwischen $\frac{1}{296}$ und $\frac{1}{300}$; freilich ist dieser Weg zur Bestimmung der Abplattung nicht so genau, wie der früher erwähnte, bietet aber eine unabhängige und deshalb wertvolle Kontrolle.

Fassen wir das bis jetzt Festgestellte zusammen, so läßt sich sagen, daß die Erde in großer Annäherung ein Rotationsellipsoid mit der Abplattung von nahe $\frac{1}{8}$ und einem mittleren Radius von 6370 km ist.

2. Dichte und Dichtenverteilung.

Bereits die Schweremessungen haben uns das Ergebnis bezüglich der Massenordnung gezeitigt, daß die Verteilung der Massen um die Erdachse und bezüglich des Äquators symmetrisch sein muß; aber ehe wir über diese Verteilung Genaueres erfahren können, ist es notwendig, die Gesamtmasse oder die daraus berechenbare mittlere Erddichte zu bestimmen.

Eine ganze Reihe hervorragender Experimentatoren haben sich mit dieser Frage beschäftigt und Methoden zu ihrer Lösung ausgearbeitet, die, soweit sie auf Genauigkeit Anspruch erheben können, auf dem Prinzip der Wägung beruhen. An einer sehr empfindlichen Hebelwage oder einer Drehwage wird die Kraft, mit der die Erde eine gegebene Masse m anzieht, verglichen mit der Kraft, die eine zweite Masse m' in gemessener Entfernung auf sie ausübt; mittels Anwendung des Newtonschen Gravitationsgesetzes läßt sich daraus die Gesamtmasse M der Erde und damit natürlich ihre durchschnittliche Dichte d berechnen; als wahrscheinlichster Wert ist gegenwärtig $d = 5.52$ anzunehmen.

Da die Dichte des äußersten Gesteinsmantels der Erde nach Schätzung der Geologen 2.6 bis 2.8 beträgt, wären folgende Typen der Dichteverteilung denkbar: Entweder ist nur ein ganz dünner Mantel von der Dichte 2.6 bis 2.8 und der Hauptteil der Erde, homogen und von einer Dichte wenig über 5.52, oder die Hauptmasse hat eine Dichte von ca. 2.7 und nur ein kleiner

Kern um den Mittelpunkt eine, dann natürlich sehr hohe Dichte, oder schließlich, der allgemeinste Fall, die Dichte variiert im Innern nach irgendeinem Gesetze, so zwar, daß sich als mittlere Dichte 5.5 ergibt.

Daß die beiden erstgenannten Extremfälle nicht zutreffen können, lehrt uns wieder die Theorie; es läßt sich nämlich leicht ausrechnen, daß für den Fall, als die Erde bis auf einen dünnen Gesteinsmantel homogen sein sollte, die Abplattung $\frac{1}{230}$ betragen müßte und für die zweite Annahme, eines sehr kleinen, aber außerordentlich dichten Kernes, $\frac{1}{577}$ zu setzen wäre; da nun die wirkliche Abplattung zwischen diesen Grenzwerten liegt, müssen wir annehmen, daß die Dichte der Erde im allgemeinen nach der Mitte hin zunimmt. Leider kann man aus einer bestimmten Abplattung nicht eindeutig auf eine bestimmte Dichteverteilung schließen, da immer noch unendlich viele Arten der Dichtezunahme mit einem Werte der Abplattung vereinbar sind.

Außer der mittleren Erddichte und der Abplattung gibt uns nun aber noch die Erscheinung der Präzession und Nutation der Erdachse einigen Aufschluß über die Massenverteilung in der Erde.

Die Erde ist ein großer Kreisel und ihre Rotationsachse würde daher immer auf denselben Punkt der Himmelskugel weisen, wenn sie eine exakte Kugel und homogen wäre; da sie aber gewissermaßen eine Kugel ist, die um ihren Aequator einen Wulst trägt, wird der Mond — und in schwächerem Maße die Sonne — den im näheren Teil des Wulstes stärker anziehen als den entferntesten und dadurch eine Drehung um eine Achse in der Aequatorebene hervorzubringen streben; da nun bekanntlich ein Kreisel auf ein derartiges Kräftepaar durch eine Bewegung senkrecht dazu reagiert, bleibt die Erdachse im Weltraume sich nicht parallel, sondern beschreibt am Himmelsgewölbe in etwa 20.000 Jahren einen Kreis, welche Erscheinung als Präzession bezeichnet wird; die Nutation der Erdachse besteht in kleinen Schwankungen um diesen Kreis. Die Astronomen haben nun die Größe der Präzession und Nutation mit ziemlicher Genauigkeit gemessen und uns dadurch in den

Stand gesetzt, daraus auf theoretischem Wege Daten über die Dichteverteilung zu gewinnen.

Präzession und Nutation hängen in ihrer Größe nämlich ab von dem relativen Unterschiede der Schwungkraft der Erde um ihre wirkliche Achse, gegenüber der Schwungkraft, die sie haben würde, wenn sie um eine in der Aequatorebene liegende Achse ebenso rasch rotieren würde. Bezeichnen wir mit C die Schwungkraft um die wirkliche Erdachse, mit A die andere Schwungkraft, so lehrt eben die Theorie, aus den Konstanten der Präzession und Nutation den Quotienten $\frac{C-A}{C}$ zu bestimmen.

Die Abplattung hängt von der Differenz C—A ab, so daß wir jetzt zwei Beziehungen haben, die gestatten, C und A getrennt zu berechnen.

Da sich nun für jede supponierte Massenverteilung in der Erde die entsprechenden Schwungkräfte ausrechnen lassen, sind wir in den Stand gesetzt, solche Dichteverteilungen anzugeben, die eben jenen Bedingungen genügen.

Damit ist zwar unser Problem noch nicht gelöst, aber die Zahl der möglichen Lösungen eingeschränkt, und fassen wir zusammen, was wir über die Massenverteilung in der Erde aussagen können, so ergibt sich folgendes: Die Verteilung muß symmetrisch zur Erdachse und Aequatorebene sein; die Oberflächendichte ist ca. 2.7, die mittlere Dichte 5.52; die Dichtezunahme nach dem Innern muß derartig erfolgen, daß sowohl ein ganz bestimmtes C als ein bestimmtes A daraus resultiert. Dies können wir als sicher fundiertes Wissen bezeichnen, da es nur auf experimentell gefundenen Zahlenwerten unter Anwendung mechanischer Prinzipien basiert ist.

Wollen wir speziellere Angaben über die Dichteverteilung machen, so müssen wir zu Hypothesen greifen.

Die zahlreichen Annahmen, die von den verschiedenen Autoren gemacht wurden, lassen sich (soweit sie physikalisch sich begründen lassen) in zwei Gruppen teilen; die eine umfaßt die Hypothesen, welche die Dichtezunahme auf Kompression eines die ganze Erde bildenden Materiales zurückführen, die andere solche, welche chemische Verschiedenheit der einzelnen Teile des Erdinnern annehmen.

Aus der ersten Gruppe will ich die Hypothese von Legendre herausgreifen, die besonders für den Theoretiker viel Verlockendes hat. Diese Hypothese nimmt an, der einheitliche Stoff, aus dem die Erde bestünde, sei kompressibel, u. zw. so, daß die Dichtezunahme pro Atmosphäre umgekehrt proportional der bereits vorhandenen Dichte sei; hieraus ergibt sich nun zunächst ein Zusammenhang zwischen Dichte und Druck, unter dessen Benützung sich ausrechnen läßt, wie die Dichte der Erds substanz unter dem Drucke der darüber lastenden Schichten nach dem Innern zu wächst.

Das Resultat dieser Rechnung ist: Dichte im Erdinnern 11.0, an der Erdoberfläche 2.7, welcher letzterer Wert sehr gut mit der Erfahrung stimmt; außerdem zeigt sich als Rechnungsergebnis eine Kompressibilität der Erds substanz an der Erdoberfläche, die mit der experimentell gefundenen der dichteren Gesteinsarten der Größenordnung nach gut übereinstimmt. Die physikalisch einfache Grundannahme, die Möglichkeit, sie in mathematisch eleganter Art verwerten zu können, und die errechneten, mit der Erfahrung stimmenden Oberflächenwerte von Dichte und Kompressibilität geben, worauf schon Wiechert hinweist, dieser Theorie etwas ungemein Bestechendes. Ich sage nicht ohne Absicht „Bestechendes“, denn die guten Seiten dieser Hypothese müßten den, der sie für wahrscheinlich hält, über eine Folgerung hinwegtäuschen, die die Mehrzahl anschaulich denkender Physiker kaum akzeptieren werden, die Folgerung nämlich, daß es möglich sei, einen festen Körper von der Beschaffenheit der Gesteine durch Anwendung sehr hoher Drucke auf ein Viertel seines Volumens zu komprimieren.

Die Verteidiger Legendres werden vielleicht einwenden, besonders wenn sie der „beschreibenden“ Richtung der Physiker angehören: Der Druck im Innern der Erde muß jedenfalls nach Millionen von Atmosphären messen, sei also besten Falles 100mal größer als die größten derzeit im Laboratorium herstellbaren Drucke, wie sich daher eine Substanz bei solchem Drucke verhalte, könne unmöglich erschlossen werden. Dagegen läßt sich nun anführen, daß man zwar in der Tat experimentell diese Behauptung nicht widerlegen kann, daß wir uns aber über die Beschaffenheit der Moleküle Anschauungen

gebildet haben, die durch zahlreiche Erfahrungen auf den verschiedensten Gebieten der Physik gestützt werden und es nicht gestatten, eine so große Zusammendrückbarkeit anzunehmen. Es wird daher jedem, der diese Anschauungen teilt, eine Hypothese, die der Dichtezunahme durch Materialverschiedenheit erklärt, von vornherein plausibler erscheinen; eine solche ist die bekannte Wiechertsche, des Eisenkernes der Erde.

Schon vor zehn Jahren hat Wiechert, geleitet von den oben dargelegten Bedenken gegen eine Dichtezunahme durch Druck, versucht, zu berechnen, wie sich die Dinge gestalten, wenn man zunächst aus Gründen der Einfachheit annimmt, die Erde bestünde aus einem dichten Kerne mit einem Gesteinsmantel. Nimmt man die Dichte des Mantels mit 3·0 bis 3·4 an, so läßt sich aus der mittleren Dichte der Erde und der Abplattung, Dichte und Radius des Kernes berechnen; es ergibt sich der Radiuskern zu $\frac{4}{5}$ bis $\frac{3}{4}$ des Erdradius und seine Dichte zu 8·0 bis 8·5.

Diese letzten Zahlen würden für einen Kern aus komprimiertem Nickeleisen sprechen, was in Anbetracht der chemischen Beschaffenheit der Meteoriten und dessen, was wir sonst über den Bau der Himmelskörper wissen, sehr plausibel erscheint.

Mag es auch nach dem bisher Dargelegten bis zu gewissem Grade Sache subjektiver Anschauung sein, welcher Hypothese der Vorzug zu geben ist, so wird die Sache ganz anders, sobald wir auch die Resultate seismischer Forschung in Betracht ziehen; wie weiter unten dargelegt wird, sprechen sie unbedingt für die Hypothese Wiecherts.

Ehe wir jedoch hierauf eingehen, müssen wir noch einen Blick auf die Temperaturverteilung und elastische Beschaffenheit im Erdkörper werfen.

3. Temperatur- und Aggregatzustände des Erdinnern.

Die einzige, sicher fundierte Tatsache, auf die wir unsere Schlüsse über die Temperatur des Erdinnern aufbauen können, ist die der Existenz einer mittleren geothermischen Tiefenstufe von ca. 33 m in der äußersten Erdrinde; dazu kommt noch das Bestehen von flüssigen Lavaherden. Die Folgerungen, die

sich daraus für die Temperatur im Erdinnern ziehen lassen, hängen wesentlich davon ab, welche Annahmen wir über die Vorgeschichte unseres Planeten machen wollen und welche Energiequellen den Wärmestrom aus dem Innern heraus decken. Es würde hier zu weit führen, diese schwierigen Probleme eingehend zu erörtern, indeß läßt sich mit Sicherheit sagen, daß nicht der geringste Grund vorliegt, so ungeheuerliche Temperaturen (100.000° Ritter) anzunehmen. Nach dem Gesetze der Wärmeleitung müssen wir im Gegenteil annehmen, daß die geothermische Tiefenstufe nach innen bald zunimmt und der weitaus größere Teil des Erdinnern eine gleichmäßige Temperatur von der Größenordnung von etwa 3000° besitzt. Viele Forscher sind geneigt, eine noch erheblich niedrigere Temperatur für wahrscheinlich zu halten.

Hieran schließt sich nun die alte Streitfrage nach dem Aggregatzustande des Erdinnern. Sich für einen der drei ohne weiteres entscheiden zu wollen, würde ohne Angabe von Kriterien auf einen müßigen Wortstreit hinauslaufen. Mir erscheint es immer noch am zweckmäßigsten, die drei Aggregatzustände, zwischen denen es ja keine scharfen Grenzen gibt, durch ihre elastischen Eigenschaften zu charakterisieren. Starke Kompressibilität beim Fehlen jeglicher Scherkräfte kennzeichnet Gase, geringe Zusammendrückbarkeit verbunden höchstens mit Spuren elastischer Tangentialkräfte Flüssigkeiten, deutliche Reaktion auf tangentialen Verschiebungen die festen Körper. Wir werden deshalb einen Körper als fest bezeichnen, wenn ihn transversale Wellen durchziehen können.

Dickflüssige, plastische Körper bilden ein Mittelding zwischen festem und flüssigem Aggregatzustande. Nach dieser Definition steht, wie wir sehen werden, nichts im Wege, einen Körper sowohl als fest wie als flüssig zu bezeichnen, je nach der Zeitdauer der Kräfte, denen er unterworfen ist.

Daß ein Körper oberhalb seiner kritischen Temperatur gasförmig sein müsse, wird nach den Experimentaluntersuchungen von Tamann nur jemand aufrecht erhalten können, dem kristallinische Gase oder gasförmige Kristalle widerspruchsfreie Begriffe sind.

4. Die elastischen Eigenschaften des Erdkörpers.

Die vorangehenden Betrachtungen führen uns unmittelbar zu der Frage nach der elastischen Beschaffenheit der Erde. Die elastischen Eigenschaften jedes Stoffes lassen sich durch Angabe von zwei Zahlen, seinen Elastizitätskonstanten, charakterisieren, die man je nach der Art des zu behandelnden Problems anders zu wählen pflegt. Für unsere Zwecke empfiehlt es sich, den Koeffizienten der Linearelastizität (a) und den der Formelastizität (b) zu benutzen. Der erstere gibt ein Maß für den Widerstand, den der Körper dem Zusammendrücken in einer Richtung (bei ungeänderten Querdimensionen) entgegensetzt, der zweite ein Maß für den Widerstand gegen Schubkräfte; er ist daher auch ein Maß für das, was die Engländer „rigidity“ nennen und wir nicht ganz treffend mit „Starrheit“ bezeichnen; um der Zweideutigkeit des Ausdruckes „Starrheit“ zu entgehen, hat Wiechert dafür den Ausdruck „Rieghheit“ und „riege“ vorgeschlagen, den wir im folgenden auch gebrauchen wollen, wenn wir das Widerstreben eines Körpers gegen Formveränderung bezeichnen wollen; Stahl ist in diesem Sinne sehr riege, während es Butter gar nicht ist.

Die Aggregatzustände fest und flüssig unterscheiden sich durch die Werte der Rieghheit, eine Flüssigkeit ist gar nicht riege, während festes Material einen endlichen Wert der Rieghheit besitzt.

Am einfachsten wird vielleicht folgende Tabelle die Bedeutung von a und b anschaulich machen.

	Kork	Aspik	Flüssigkeit	Gas
a)	klein	groß	groß	klein
b)	relativ groß	klein	Null	Null.

Wie schon früher erwähnt, gibt es aber Substanzen — bei gewissen Drucken und Temperaturen vielleicht die meisten Stoffe — die soowhl als flüssig wie fest bezeichnet werden können, je nach der Zeitdauer der auf sie einwirkenden Kräfte. Schwarzes Pech ist ein gutes Beispiel dafür; läßt man einen Klumpen Pech lange genug liegen, so beginnt er unter seinem eigenen Gewichte zu fließen, wie eine sehr zähe Flüssigkeit, kleine Bleikugeln sinken in ihm im Laufe der Zeit unter; ander-

seits ist es rasch wirkenden Kräften gegenüber sehr rüch, es zerspringt wie Glas unter einem Hammerschlage.

Die Erde als Ganzes scheint nun eine Beschaffenheit zu haben, die der des Peches vergleichbar ist, u. zw. läßt sich dies aus folgendem schließen:

Die Rotationsdauer der Erde wird durch die Flut des Meeres verlangsamt, da die Flutberge gewissermaßen wie Bremsklötze wirken, andererseits beschleunigt durch die Kontraktion infolge der Abkühlung; beide Einflüsse sind sehr gering, so daß sie sich durch Messung bis jetzt nicht haben feststellen lassen. In den Jahrmlionen der Erdgeschichte indessen hat die Flut, die in Zeiten, wo die ganze Erde noch flüssig war, bedeutend intensiver wirkte, eine gewaltige Zunahme der Dauer eines Tages bewirkt. Wäre nun die Erde auch lange andauernden Kräften gegenüber als fester Körper anzusehen, so müßte sie eine Abplattung besitzen, die der Zentrifugalkraft jener Zeit, da sie erstarrte, entsprechen würde. Da dies aber nicht der Fall ist, da sie eine Abplattung besitzt — und nicht nur die äußere Oberfläche, sondern sehr nahe auch die des Eisenkernes, wie Wiechert wahrscheinlich gemacht hat — die der heutigen Rotationsdauer entspricht, müssen wir die Erde als im hydrostatischen Gleichgewichte befindlich ansehen und sie daher gegenüber Kräften, die durch geologische Zeiträume hindurch gleichmäßig einwirken, als flüssig bezeichnen.

Ganz anders verhält sich aber die Sache, wenn wir das Verhalten der Erde rasch wechselnden Kräften gegenüber untersuchen, wie es sich beim Studium verschiedener Erscheinungen ergibt.

Zunächst zeigt das Auftreten von Ebbe und Flut des Meeres an, daß der Erdkörper gegenüber den periodisch wechselnden Kräften von Sonne und Mond ein gewisses Maß von Unnachgiebigkeit haben muß, weil, wenn das nicht der Fall wäre, die Kontinente an der Flutbewegung teilnehmen müßten und eine Verschiebung des Meeresspiegels gegenüber dem Festlande nicht eintreten könnte. Schon Lord Kelvin hat, indem er die beobachtete Größe der 14tägigen Mondflut mit der theoretischen für eine vollkommen starre Erde berechneten verglich, gefunden, daß die Erde mindestens so rüch wie Stahl sein muß.

Dies wird bestätigt durch die neuesten Pendelmessungen von Hecker in Potsdam. Ein sehr empfindlich aufgehängtes Horizontalpendel ergibt Ausschläge für die Attraktion durch Mond und Sonne. Würde die Erde vollkommen nachgiebig sein, so müßte sich der Pfeiler, auf dem das Instrument aufgestellt ist, immer so neigen, daß er dieselbe Orientierung zur jeweiligen Schwererichtung hätte, das Pendel könnte dann keine Bewegungen machen. Man kann nun ebenso, wie bei der Flut, die beobachteten Pendelausschläge vergleichen mit den berechneten, die eintreten müßten, wenn die Erde vollkommen starr wäre; Hecker findet auch hier die beobachtete Bewegung zwei Drittel so groß wie die theoretische, was wieder für eine Rieghheit der Erde von der Größe des Stahles spricht.

Von obigen Beobachtungen vollkommen unabhängig, liefern die Polschwankungen der Erde ein weiteres Mittel, ihre Elastizitätseigenschaften zu untersuchen. Unter Polschwankungen verstehen wir das Wandern der momentanen Drehungsachse im Erdkörper selbst; in Erscheinung treten sie in einer geringen Veränderlichkeit der geographischen Breite irgendeines Punktes der Erdoberfläche; äußerst subtile Messungen haben ergeben, daß der jeweilige Drehpol auf der Erdoberfläche kreisartig geschlossene Bahnen von etwa 20 m Durchmesser um den „eigentlichen“ Pol der Erde beschreibt, u. zw. in einer Periode von etwa 427 Tagen. Solche Polschwankungen müssen an jedem Kreisel auftreten, wenn irgendeinmal die Drehungsachse nicht mit der Symmetrieachse übereinstimmt.

Interessant ist es nun, zu sehen, daß die Rechnung für die Erde Polschwankungen von einer Periode von 305 Tagen ergibt, wenn man annimmt, daß sie vollkommen starr ist; Newcomb hat nun darauf hingewiesen, daß die Unterschiede zwischen der beobachteten Periode von 427 Tagen und der beschriebenen von 305 Tagen durch eine gewisse Nachgiebigkeit der Erde bedingt sein müssen; Hough hat dieses Problem dann auch wirklich durchgerechnet und findet wieder eine Rieghheit der Erde wie bei Stahl, also eine schöne Bestätigung der früheren Werte.

Alle diese Resultate sind erhalten worden durch den Vergleich von beobachteten Werten mit theoretisch ermittelten für

eine vollkommen starre und, wie ich hinzufügen will, homogene Erde.

In allerneuester Zeit sind diese Untersuchungen noch verbessert und erweitert worden; Kimura findet die Periode der Polschwankungen zu 438 und 434 Tagen, Herglotz und Schweydar dehnen die Theorie auf eine inhomogene Erde mit Kern aus.

Die Resultate Schweydars sind besonders interessant; sie ergeben für die Erde als Ganzes eine etwas geringere Starrheit als die von Stahl, für den Kern allein einen etwa dreimal so großen Wert, für den Mantel aber nur ein Achtel von der Rieghheit des Stahles; wie wir weiter unten sehen werden, steht dieser auffallend niedrige Wert der Starrheit des Mantels in guter Uebereinstimmung mit dem, was uns die Erdbebenbeobachtungen lehren, auch er deutet auf eine plastische Schicht unterhalb der äußersten Erdkruste hin.

5. Ergebnisse der Erdbebenbeobachtungen.

Haben wir bis jetzt in großen Zügen ein Bild von der Beschaffenheit unserer Erde zu gewinnen gesucht, so ist es jetzt an der Zeit, jene schon erwähnten Ergänzungen und Bestätigungen vorzubringen, die die jüngste Entwicklung der Seismologie uns in ungeahntem Maße gebracht hat. Nicht mit Unrecht sind die so außerordentlich empfindlichen Instrumente, die uns viele Tausend Kilometer vom Bebenherd entfernt, die Erschütterung des Erdbodens in allen Details aufzeichnen, in ihrer Bedeutung für die Erforschung des unzugänglichen Erdinnern verglichen worden mit dem Spektroskop, das dem Astronomen Nachricht gibt über Vorgänge, die sich in ungeheuren Fernen im Weltraume abgespielt haben. Hier ist es die äußerst feine Wellenbewegung des Lichtes, die den Weltraum durchheilt, dort sind es die elastischen Wellen, die das Erdinnere durchlaufen und uns Kunde von ihnen bringen.

Aus der Fülle neuer Tatsachen und neuer Probleme, die die letzten Jahre der Erdbebenforschung gebracht, kann ich natürlich nur das Wichtigste in Kürze vorführen, so weit es Aufschluß gibt über die Beschaffenheit der Erde.

Findet irgendwo ein stärkeres Beben statt, so pflanzen sich die elastischen Erschütterungswellen fort, die die seismischen Instrumente auch in großer Entfernung noch in Bewegung zu setzen vermögen. Studiert man nun eine solche Aufzeichnung eines Seismographen sorgfältig, so findet man, daß im Beobachtungsorte drei Wellenzüge nacheinander eintreffen, die wir die ersten Vorläufer, die zweiten Vorläufer und die Hauptwellen nennen.

Verfolgen wir zunächst einmal die ersten Vorläufer; sie treffen in einem Orte, der 1000 km vom Epizentrum des Bebens entfernt ist, nach 140 Sekunden, in 2000 km Entfernung nach 260 Sekunden ein usw., wie es aus folgender Tabelle entnommen werden kann.

Entfernung in 1000 km	Einheiten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laufende Zeit in Sekunden		140,	260,	360,	440,	510,	570,	630,	690,	740,	790
Zeit für je 1000 weitere km		120,	100,	80,	70,	60,	60,	60,	50,	40	

Denken wir uns diese Tabelle graphisch dargestellt, indem die Entfernungen als Abszissen, die Zeiten als Ordinaten aufgetragen werden, so erhalten wir die sogenannte Laufzeitkurve der ersten Vorläufer; sie ist das experimentell gegebene Material, auf dem sich die weiteren Schlüsse aufbauen. Ihre genaue Festlegung ist eine der wichtigsten Aufgaben der Seismologie.

Aus der Beschaffenheit dieser Kurve nun läßt sich viel Interessantes erkennen. Die Tatsache, daß die Laufzeiten nicht proportional den Entfernungen wachsen, zwingen zu der Annahme, daß die Wellen der ersten Vorläufer durch die Erde hindurch gehen und sich nicht längs der Oberfläche fortpflanzen; die Art der Bewegung des Erdbodens im Beobachtungsorte zeigt ferner, daß wir es mit Longitudinalwellen zu tun haben, bei denen die Erdteilchen in der Richtung der Wellenfortpflanzung schwingen.

Die Zahlen der dritten Zeit obiger Tabelle geben ferner die Möglichkeit, in sehr einfacher Weise die Winkel zu berechnen, unter denen die Erdbebenstrahlen von unten her die Erdoberfläche treffen; da sich nun diese Winkel durchweg größer erweisen als die Winkel, die die Sehne zwischen Epi-

zentrum und Beobachtungsort mit dem Horizont bildet, folgt zwingend, daß die Bahn der Erdbebenstrahlen eine nach dem Erdmittelpunkte konvex gekrümmte sein muß. Wie wir wissen, kommen solche gekrümmte Strahlen überall, auch beim Lichte, dort vor, wo die Wellenbewegung ein Medium durchläuft, das einen kontinuierlich variablen Brechungsindex besitzt oder, was dasselbe aussagt, das an verschiedenen Stellen die Wellen verschieden schnell fortleitet.

Die Erde ergibt sich also in elastischer Beziehung als ein Medium, in dem die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nach dem Inneren zu wächst; hiebei ist die sehr bemerkenswerte Tatsache hervorzuheben, daß die obenerwähnte Laufzeitkurve innerhalb der Fehlergrenzen unabhängig davon ist, wo sich das Beben ereignet hat, daß also z. B. die Wellen eines amerikanischen Bebens dieselbe Zeit brauchen, 10.000 km zurückzulegen, wie etwa die eines asiatischen Bebens.

Im Zusammenhange mit dem Umstande, daß die Vorläufer durch das Erdinnere gehen, ist diese Tatsache ein sehr gewichtiger Beweis für die Gleichmäßigkeit im Bau der Erde. Wenn wir von der unordentlichen äußersten Erdkruste absehen, muß die Materialverteilung in konzentrischen Kugelschichten eine sehr gleichförmige sein; dies gilt wenigstens im großen; ob kleine lokale Störungen im Erdinnern auftreten, lassen die Bebenbeobachtungen bis jetzt nicht entscheiden.

Um aber wieder auf die ersten Vorläufer zurückzukommen, so lassen sich aus der Laufzeitkurve noch viel weiter gehende Schlüsse über das Erdinnere ziehen.

Milne, Laska, Oldham haben sich mit dieser Frage beschäftigt und sind zu gewissen Anschauungen über eine innere Zweiteilung der Erde gelangt, die aber infolge der nicht genügend genauen Laufzeitkurve, die sie benützen konnten, sehr unsicher sind. Ich selbst habe dann vom allgemeinen Standpunkte aus die Frage zu erörtern unternommen, ob überhaupt und was sich aus einer Laufzeitkurve schließen lasse; ich fand, daß es möglich sei, aus einer genügend genauen Kurve die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen für alle Punkte des Erdinnern zu berechnen und, da mit der Geschwindigkeit zugleich eine Elastizitätskonstante bestimmt ist, zugleich den elastischen Zustand im Inneren der Erde überall zu ermitteln.

Die synthetische Methode, die ich dann zur wirklichen Durchführung der Rechnung auf die beste, mir damals erreichbare Laufzeitkurve anwandte, war zwar noch ziemlich primitiv, führte aber trotzdem zu dem wenigstens qualitativ sichergestellten Resultate, daß dort, wo nach der Wiechertschen Theorie die Oberfläche des Eisenkernes zu suchen war, auch eine auffallende Aenderung in der Geschwindigkeitszunahme der Bebenwellen eintritt, wie man es erwarten muß, wenn das Material von Kern und Schale verschieden ist.

Wiechert hat dann in seiner neuesten Arbeit durch Ausarbeitung einer eleganten Berechnungsmethode und unter Anwendung der genauesten, bis jetzt verwendeten Laufzeitkurve viel genauere Resultate erhalten, die das oben Gesagte bestätigen. Wiechert meint, aus den Erdbebenbeobachtungen den Radius seines Eisenkernes auf ca. 100 km genau festlegen zu können. Wenn auch noch weitere Beobachtungen manche Details ändern werden, so ist doch die Existenz eines Kernes aus anderem Material als der Mantel von der Größenordnung des Wiechertschen Eisenkernes als sicher zu betrachten.

Die zweiten Vorläufer, die sich etwa halb so schnell ausbreiten wie die ersten, haben sich als transversale Wellen erwiesen; auch für sie läßt sich eine gekrümmte Laufzeitkurve festlegen, was beweist, daß sie durch das Erdinnere gehen, und im übrigen in derselben Schlußweise, wie bei den ersten Vorläufern, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für verschiedene Tiefen ermitteln; wir finden hier ebenfalls den Erdkern angedeutet.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen v_1 , wie der transversalen v_2 hängt mit den oben verwendeten Elastizitätskonstanten und der Dichte d in sehr einfacher Weise zusammen. Die Elastizitätstheorie lehrt, daß $v_1 = \sqrt{\frac{a}{d}}$ und $v_2 = \sqrt{\frac{b}{d}}$ ist, kennen wir also die Dichte mit einer gewissen Annäherung, so läßt sich mit derselben Annäherung Kompressibilität und Rieghheit berechnen. Da die so zu erhaltenden Zahlenwerte für verschiedene Punkte des Erdinnern wohl gegenwärtig noch recht unsicher sind, will ich nur die Werte anführen, die sich für den Kern ergeben; es

findet sich eine Rieghheit viermal so groß und seine Kompressibilität etwa $4\frac{1}{2}$ mal so klein wie die von Stahl.

Der Wert für die Rieghheit des Kernes steht in verblüffender Uebereinstimmung mit dem auf ganz anderem Wege erhaltenen Werte von Schweydar und ist bei dem enormen Drucke im Inneren ganz plausibel, wenn man Eisen als Kernmaterial ansieht. Der geringe Wert der Kompressibilität entscheidet aber endgültig zuungunsten aller Theorien, die die Dichtezunahme auf Kosten des Druckes setzen wollen.

Wie steht es nun mit der plastischen Schichte unterhalb der äußersten Erdkruste, läßt sie sich aus Erdbebenbeobachtungen nachweisen? Diese Frage ist mit Ja zu beantworten, und es ist ebenfalls das Verdienst Wiecherts, zuerst auf zwei Erscheinungen aufmerksam gemacht zu haben, die sich nur verstehen lassen, wenn man eine solche plastische Schichte annimmt.

Vorausgeschickt sei nur, daß aus dem Umstande, daß Transversalwellen in das Innere der Erde eindringen, geschlossen werden muß, daß eine derartige Schichte nicht flüssig sein kann, sondern sich nur durch eine erheblich geringere Rieghheit auszeichnet, wie sie durch geeignetes Zusammenwirken von Druck- und Temperaturzunahme entstanden gedacht werden kann.

Jetzt sind es die Hauptwellen eines Bebens, die uns hier interessieren; sie pflanzen sich längs der Erdoberfläche fort und bestehen zum größten Teile aus sogenannten Rayleighwellen, eine Wellenart, von der Rayleigh zuerst gezeigt hat, daß sie sich auf der Oberfläche eines festen Körpers fortpflanzen müssen.

Aber diesen Wellen beigemischt findet sich eine andere Art von Wellen ohne Vertikalkomponente, die der Theorie nach an der Oberfläche eines gleichmäßig festen Körpers nicht auftreten können, woraus zu schließen ist, daß sich die äußere Erdkruste nicht ganz wie die Oberfläche eines gleichmäßig festen Körpers verhält; Wiechert hält diese Wellen für Transversalwellen in einer festen Schichte, die auf einer Magmaschichte aufruht.

Ein zweiter Beweis wird durch das Auftreten von Eigenschwingungen bestimmter Perioden des Erdbodens erbracht;

solche Schwingungen können nur eintreten in einem dünnen, relativ elastischen, isolierten Teile der Erdkrinde. Die am häufigsten beobachteten Perioden solcher Eigenschwingungen benützt Wiechert auch, um schätzungsweise die Dicke der schwingenden Kruste zu berechnen und findet Werte, die unter 100 km liegen. Mag nun dieser Wert zu klein sein, wie ich glauben möchte, so sind jedenfalls Anhaltspunkte für die Lage der Magmaschichte gewonnen. Aufgabe der Seismologen wird es sein, hier weitere Klärung zu schaffen.

6. Zusammenfassung der Resultate.

Gestatten Sie mir zum Schlusse, was wir schrittweise entwickelt haben, kurz zusammenzufassen. Ich glaube nach den vorstehenden Ausführungen nicht mißverstanden zu werden, wenn ich im folgenden im Interesse der Kürze und Anschaulichkeit ein ganz bestimmtes Bild entwerfe, auch dort, wo noch nicht alles sichergestellt ist, besonders was die Zahlenwerte anlangt, ein Bild, das nur beansprucht, in seinen Hauptzügen getreu zu sein; es ergibt sich dann etwa folgendes:

Die Erde ist in erster Annäherung als zweiteilig gebaut anzusehen und besteht aus einem Kerne und einem Mantel, dessen Dicke ein Viertel des Erdradius bildet. Der Kern besteht im wesentlichen aus Nickeleisen und hat eine mittlere Dichte von 8.5; von außen nach innen nimmt die Dichte etwas zu, vielleicht infolge von Beimengungen schwererer Metalle. Die Temperatur des Kernes beträgt einige Tausend Grad Celsius bei einem Drucke im Innern von einigen Millionen Atmosphären. Er ist im Mittel etwa viermal so riege und viermal weniger kompressibel als Stahl unter gewöhnlichen Verhältnissen.

Der Gesteinsmantel dagegen besteht aus Substanzen, deren Dichte von dem Oberflächenwerte 2.7 allmählich nach innen zunimmt, so zwar, daß eine mittlere Dichte von ca. 3.4 resultiert; in ihm steigt die Temperatur mit zunehmender geothermischer Tiefenstufe zum Kernwerte an. Unter der äußersten Kruste liegt in 100 km bis 200 km Tiefe eine plastische Schichte von geringer Mächtigkeit. Die Riegeheit des Gesteinsmaterials wächst sehr rasch, ebenso wie die Kompressibilität mit der Tiefe sehr schnell abnimmt. Die Erde als Ganzes hat die Starrheit einer Stahlkugel.

Die Geologen interessiert wohl am meisten die Beschaffenheit der äußersten Erdkruste; über ihre Mächtigkeit und Beschaffenheit in Tiefen, die den Geologen unzugänglich sind, wissen wir noch wenig. Indessen darf ich hier wohl der begründeten Hoffnung Ausdruck geben, daß es den Seismologen durch intensives Studium der Nahbeben in absehbarer Zeit gelingen wird, neue wichtige Tatsachen an das Licht zu bringen.

Literatur-Verzeichnis.

- H. Benndorf, Ueber die Art der Fortpflanzung der Erdbebenwellen im Erdinnern. II. Mitt. der Erdbebenkomm. d. kais. Akad. d. Wiss. 1906, N. F. 31.
- S. Günther, Handbuch der Geophysik. 2 Auflage.
- F. R. Helmert, Theorien der höheren Geodäsie. Leipzig 1880—1884.
- W. Lásk a, Ueber die Verwendung der Erdbebenbeobachtungen zur Erforschung des Erdinnern. Mitt. d. Erbebenkomm. der kais. Akad. d. Wiss. 1904, N. F. 28.
- W. Lásk a, Die Erdbeben im Lichte neuester Forschungen. Natur und Offenbarung 1908, Bd. 54,
- R. D. Oldham, Constitution of the interior of the earth. Quart. Journ. Geolog. Soc. 1906, 64.
- Schweydar, Ueber den Starrheitskoeffizienten der Erde.
- H. Thieme, Temperatur und Zustand des Erdinnern. Jena 1907.
- E. Wiechert, Ueber die Massenverteilung im Innern der Erde. Göttinger Nachrichten 1897.
- E. Wiechert, Was wissen wir von der Erde unter uns? Deutsche Rundschau 1907.
- E. Wiechert und K. Zöppritz, Ueber Erdbebenwellen. Göttinger Nachrichten 1907.
- E. Wiechert, Die Erdbebenforschung, ihre Hilfsmittel und ihre Resultate für die Geophysik. Physikalische Zeitschrift 1908.
-

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Austrian Journal of Earth Sciences](#)

Jahr/Year: 1908

Band/Volume: [1](#)

Autor(en)/Author(s): Benndorf Hans

Artikel/Article: [Ueber die physikalische Beschaffenheit des Erdinnern. 323-342](#)