

Werk

Jahr: 1941

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:17

Werk Id: PPN101433392X_0017

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X_0017 | LOG_0007

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Eine Neuberechnung der Dichteverteilung und der davon abhängenden physikalischen Größen im Erdinnern

Von H. Haalek, Potsdam. — (Mit 6 Abbildungen)

Es wird die Zunahme der Dichte mit der Tiefe im Erdinnern neu berechnet, und zwar wird — nach Zusammenstellung der von einem Dichtegesetz zu erfüllenden Bedingungen — die Rechnung durchgeführt für zwei Grenzfälle A und B, welche so gewählt sind, daß man die wirkliche Dichteverteilung als innerhalb dieser Grenzen liegend annehmen kann. Die Rechnung ergibt für das Innere des Erdkerns eine stärker wachsende Verdichtung der Substanz infolge des zunehmenden Druckes, als man bisher angenommen hatte; entsprechend erhalten wir einen etwas größeren Wert für den maximalen Druck im Erdmittelpunkt. Die mit dem Dichtegesetz zusammenhängenden Größen (Verlauf der Schwerebeschleunigung, des Druckes, des Moduls der Richtigkeit und des Kompressibilitätskoeffizienten) werden für das Erdinnere berechnet, die Resultate in graphischer Form für die beiden Grenzfälle des Dichtegesetzes dargestellt. Die dem Berechnungsergebnis für den Erdkern anhaftende Unsicherheit hat ihren Grund darin, daß die Frage des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins transversaler Erdbebenwellen im Erdkern noch nicht entschieden ist. Unter der Voraussetzung, daß Transversalwellen sich durch den Erdkern wie bei einer vollkommen elastischen Masse fortpflanzen, ergibt die Berechnung für das Innere des Erdkerns eine so stark wachsende Verdichtung der Materie infolge des zunehmenden Druckes, daß dieser Fall als physikalisch unwahrscheinlich anzusehen ist. Dagegen zeigt es sich, daß die Berechnung des Kompressibilitätsfaktors auf atomtheoretischem Wege eine vollständige Übereinstimmung mit den auf seismischem Wege in Verbindung mit dem Dichtegesetz berechneten Werten ergibt, wenn man den Fall, daß keine Transversalwellen durch den Erdkern gehen, annimmt.

Die Verteilung der Dichte im Erdinnern beeinflußt eine Reihe von Erscheinungen, welche der Beobachtung zugänglich sind, und es sind eine ganze Anzahl von Gesetzen über die Dichtezunahme mit der Tiefe aufgestellt worden, welche diesen Beobachtungstatsachen gerecht werden. Die älteren, von Legendre (1789) begründeten Versuche, ein solches Dichtegesetz durch eine analytische Form darzustellen, gingen von der Voraussetzung aus, daß die Dichte infolge einer wachsenden Verdichtung der Substanz durch den Druck der darüberlagernden Massen stetig bis zum Erdmittelpunkt hin zunimmt. Im Gegensatz dazu vertrat E. Wiechert (1897) die Ansicht, daß eine so starke Kompression der Moleküle sehr unwahrscheinlich sei und daß als wesentlichste Ursache der Dichteunterschiede nur *Materialverschiedenheiten* in Frage kämen. Er entwickelte seine Hypothese von der Zweiteiligkeit des Erdballs, welche dann später, den Ergebnissen der Erdbebenforschung und der physikalischen Chemie entsprechend, zu der Auffassung des dreiteiligen, schalenförmigen Aufbaues der Erde (Gesteins-

mantel, Zwischenschicht und Metallkern) erweitert wurde, wobei man die Dichte innerhalb dieser einzelnen Schichten als im wesentlichen konstant annahm (W. Klußmann). Die darauf folgenden Berechnungen des Dichtegesetzes (Gutenberg, Haalck) gingen von der Ansicht aus, daß die Dichtezunahme mit der Tiefe innerhalb des Gesteinsmantels und der Zwischenschicht stetig erfolgt — ohne daß dabei eine Voraussetzung über ihre Ursache gemacht wird — mit einer un stetigen, aber nicht sprunghaften Änderung an ihrer Trennungsfläche in 1200 km Tiefe, und daß erst an der Grenze des — als homogen angenommenen — Erdkerns in 2900 km Tiefe ein ausgeprägter Dichtesprung vorhanden ist. Eine andere Berechnung (Williamson und Adams) beruht auf der Annahme, daß die Dichtezunahme bis zum Erdkern *nur* eine Folge der Druckerhöhung ist und daß erst am Kern eine Substanzänderung eintritt.

Die *Hauptbedingungen*, denen ein Gesetz über die Dichteverteilung im Erdinnern genügen muß, sind folgende:

1. Es muß die richtige Dichte der Oberflächenschicht liefern,
2. die den Messungen entsprechende mittlere Dichte der Erde,
3. die richtige Figur des hydrostatischen Gleichgewichts der Erde,
4. die beobachtete Größe der Präzession.

Auf die letztere kann, da sie näherungsweise schon mit der Bedingung 3 erfüllt wird, im allgemeinen verzichtet werden. Die beobachtete Abnahme der Normalschwere zwischen Pol und Äquator und die von der Form der Erde her rührenden Störungen in der Mondbewegung ergeben keine neuen Bedingungen, da ein Dichtegesetz, welches den obigen Hauptbedingungen genügt, auch diesen Beobachtungstatsachen ohne weiteres gerecht wird. Dagegen liefern die *Ergebnisse der Erdbebenforschung weitere wesentliche Anhaltspunkte*, wie das Gesetz der Dichteverteilung im Erdinnern beschaffen sein muß:

Die im wesentlichen aus Graniten bestehende *Oberflächenschicht*, deren — örtlich sehr verschiedene — Mächtigkeit auf Grund der seismometrischen Beobachtungen im Mittel zu rund 60 km angenommen wird, hat in den oberen, der direkten Beobachtung zugänglichen Teilen eine mittlere Dichte von etwa 2.7, und wir können annehmen, daß sie bis zur 60 km-Tiefe auf etwa 3.1 im Mittel ansteigt. Die Dichte der darunter folgenden schwereren Silikate nimmt man in dieser Tiefe zu etwa 3.4 an. Die Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Erdbebenwellen mit der Tiefe läßt — außer der besonders markanten, sprunghaften Unstetigkeit in 2900 km Tiefe — noch weitere, aber weniger ausgeprägte und nicht sprunghafte Unstetigkeiten erkennen, von denen eine in etwa 1000 km Tiefe befindliche am deutlichsten hervortritt und daher als die Grenzfläche zwischen Silikathülle und Sulfid-Oxydschicht angenommen wird. Sie können durch un stetige Änderungen entweder der Dichte oder der elastischen Eigenschaften verursacht werden; Substanzänderungen sind in jedem Fall anzunehmen und es ist möglich, daß auch geringe sprunghafte Dichteänderungen vorkommen. An der Grenze des Erdkerns in 2900 km Tiefe ist aber mit Sicherheit ein *aus-*

geprägter größerer Dichtesprung anzunehmen. — In neuerer Zeit haben einige bekannte Erdbebenforscher (B. Gutenberg und F. Richter [7], J. Lehmann [9], H. Jeffreys [10]) gefunden, daß die Annahme einer *Unterteilung des Erdkerns* den Beobachtungsergebnissen am besten entspricht (vgl. Fig. 1). Bei den folgenden Berechnungen werde ich jedoch aus dieser Feststellung keine besondere Bedingung für das Dichtegesetz herleiten, weil — abgesehen davon, daß das Vorhandensein eines innereren Kerns noch nicht als genügend gesichert angesehen werden kann — die für die Berechnung des Dichtegesetzes zur Verfügung stehenden Bedingungsgleichungen es nicht ermöglichen, solche Feinheiten in der Dichteverteilung, besonders wenn es sich um die innersten Teile des Erdkörpers handelt, zu berechnen (vgl. weiter unten, S. 11 .!.). — Kurz zusammengefaßt werde also gefordert, daß das Gesetz der Dichteverteilung im Erdinnern noch folgenden Eigenschaften entspricht:

- a) Bis zur Grenzfläche des Erdkerns in 2900 km Tiefe entspricht die Dichtezunahme dem Zusammenwirken der mit der Tiefe zunehmenden Kompression und der Materialänderung.
- b) Am Erdkern findet eine ausgeprägt sprunghafte, durch Materialverschiedenheit bedingte Dichtezunahme statt.
- c) Innerhalb des Erdkerns entspricht die Dichtezunahme bis zum Erdmittelpunkt ausschließlich der Wirkung des anwachsenden Druckes.

Die den angeführten Beobachtungstatsachen entsprechende Dichteverteilung im Erdinnern ist *unendlich vieldeutig* und es handelt sich jetzt darum, möglichst enge Grenzen für die unvermeidbare Mehrdeutigkeit anzugeben. Am zweckmäßigsten führen wir daher die Berechnung des Dichtegesetzes für zwei Grenzfälle durch derart, daß wir die wirkliche Dichteverteilung mit Sicherheit als innerhalb dieser Grenzen liegend ansehen können. Als Grenzbedingungen können wir den bisherigen Berechnungsergebnissen entnehmen:

Grenzfall A: *Die Dichte steigt von dem Wert 3.4 in 60 km Tiefe bis zu dem Wert 5.3 in 2900 km Tiefe linear an.* Diese Voraussetzung entspricht ungefähr dem Ergebnis der Berechnungen von Williamson und Adams auf Grund der Annahme, daß die Dichtezunahme bis zum Erdkern ausschließlich eine Folge der Kompression infolge des zunehmenden Druckes ist. Da die wirkliche Dichtezunahme wegen der unzweifelhaft vorhandenen Substanzänderungen im Sinne einer Zunahme an schwererer Materie *größer* sein muß, so können wir diese Annahme als ersten Grenzfall ansehen.

Grenzfall B: *Die Dichte steigt von dem Wert 3.4 in 60 km Tiefe bis zu dem Wert 6.8 in 2900 km Tiefe linear an.* Nach dem ziemlich übereinstimmenden Berechnungsergebnis von Haalck (Fall D₂) und Gutenberg ergibt sich die gleichmäßig ansteigende Dichte in 1200 km Tiefe zu etwa 4.7. Nehmen wir an, daß die Dichte in gleichem Maße mit der Tiefe weiter ansteigt, so kommen wir in 2900 km Tiefe auf einen Dichtewert von 6.8. Da das Anwachsen der Ge-

schwindigkeit der Erdbebenwellen mit der Tiefe aber darauf schließen läßt (vgl. Fig. 1), daß die Dichtezunahme innerhalb der Zwischenschicht in Wirklichkeit *weniger* stark als in der Mantelschicht ist, so können wir diese Bedingung als dem zweiten Grenzfall entsprechend ansehen.

Die Grenzbedingungen sind also so gewählt, daß das wirkliche Dichtegesetz innerhalb dieser beiden Grenzfälle (— wahrscheinlich näher dem Grenzfall B —) liegen muß.

Bezeichnungen:

$\sigma_m = 5.52$ = mittlere Dichte der Erde.

$\sigma_0 = 2.7$ = Dichte an der Erdoberfläche (Abstand vom Erdmittelpunkt $R = 6370$ km).

$\sigma_1 = 3.1$ = Dichte in 60 km Tiefe.
Dichtesprung ($R_2 = 0.9906 \cdot R$)

$\sigma_2 = 3.4$ = Dichte in 60 km Tiefe.

$\sigma_3 = \begin{cases} 5.3 & \text{im Grenzfall A} \\ 6.8 & \text{,, ,, B} \end{cases}$ = Dichte in 2900 km Tiefe.

Dichtesprung ($R_1 = 0.5447 \cdot R$).

σ_4 = Dichte im Erdkern in 2900 km Tiefe.

σ_5 = „ „ Erdmittelpunkt.

Setzen wir für die Änderung der Dichte mit dem Abstände x vom Erdmittelpunkt innerhalb des Erdkerns die Formel*) an:

$$\sigma = \sigma_5 \left(1 - \frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\sigma_5} \frac{x^2}{R_1^2} \right) \text{ von } x = 0 \text{ bis } x = R_1 \dots \dots (1a)$$

so gibt diese zusammen mit den Ausdrücken:

$$\sigma = \sigma_3 - \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{R_2 - R_1} (x - R_1) \text{ von } x = R_1 \text{ bis } x = R_2 \dots (1b)$$

$$\sigma = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{R - R_2} (x - R_2) \text{ von } x = R_2 \text{ bis } x = R \dots (1c)$$

das vollständige Dichtegesetz an.

Die rechnerische Aufgabe besteht jetzt darin, die Unbekannten σ_4 und σ_5 so zu bestimmen, daß das Dichtegesetz den angegebenen Bedingungen für die beiden Grenzfälle in hinreichendem Maße entspricht.

Von den noch zu erfüllenden Bedingungen des Dichtegesetzes ist die *Bedingung 2 (mittlere Dichte der Erde)* die wichtigste. Sie lautet für stufenförmige Dichteunterschiede:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \sigma_m = \sum_{v=1}^{v=n} \frac{4}{3} \pi r_v^3 (\sigma_v - \sigma_{v+1}),$$

*) Dieser Ansatz ist — analog der Dichteformel von Roche — so gewählt, daß die Dichtefunktion der Druckzunahme entsprechend für $x = 0$ ein Maximum besitzt.

worin die r_v die Abstände der einzelnen Dichtestufen vom Erdmittelpunkt bedeuten. Unter Berücksichtigung der Gleichungen (1) erhalten wir daraus (wobei wir jetzt $R = 1$ setzen):

$$2\sigma_5 + 3\sigma_4 = \frac{5}{R_1^3} \left\{ \sigma_m - \sigma_3 (R_2^3 - R_1^3) + \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{4} (3R_2^3 - R_2^2 R_1 - R_2 R_1^2 - R_1^3) \right. \\ \left. - \sigma_1 (1 - R_2^3) + \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{4} (3 - R_2 - R_2^2 - R_2^3) \right\}. \quad (2)$$

Die *Bedingung 3* beruht darauf, daß der *Erdkörper die Figur des hydrostatischen Gleichgewichts* annimmt, woraus wir eine Beziehung erhalten zwischen dem Dichtegesetz, der Abplattung α der Niveauflächen, dem Verhältnis f/g_0 von Fliehkraft zur Schwerkraft am Äquator und der mittleren Dichte σ_m der Erde. Die Theorie, welche sich auf die Berücksichtigung der ersten Potenz der Abplattung beschränkt, ergibt rechnerisch sehr schwierig zu behandelnde Gleichungssysteme (Clairautsche Differentialgleichung), welche direkt nur in ganz besonderen Fällen lösbar sind. Nehmen wir die Dichteverteilung als aus n Dichtestufen bestehend an, so lautet die Gleichgewichtsbedingung für die Niveaufläche mit der Abplattung α_i im Abstände r_i vom Erdmittelpunkt innerhalb der Schicht von der Dichte σ_i (vgl. [4], S. 261):

$$\alpha_i \left\{ \sigma_i + \sum_{v=1}^{v=i-1} \left(\frac{r_v}{r_i} \right)^3 (\sigma_v - \sigma_{v+1}) \right\} \\ - \frac{3}{5} \left\{ \sum_{v=1}^{v=i-1} \left(\frac{r_v}{r_i} \right)^5 \alpha_v (\sigma_v - \sigma_{v+1}) + \sum_{v=i}^{v=n} \alpha_v (\sigma_v - \sigma_{v+1}) \right\} = \frac{f}{2g_0} \sigma_m. \quad (3)$$

Die Beziehung läßt sich einfach auf den oft behandelten Fall stetiger Dichtezunahme umformen. Ihre Behandlung richtet sich ganz nach der Form des den Berechnungen zugrunde liegenden Dichtegesetzes*). Diese wird im vorliegenden Falle, in welchem es sich um die Kombination mehrerer stetiger und unstetiger Dichtezunahmen handelt, besonders schwierig.

Die aus der *Theorie der Präzession* sich ergebende *Bedingung 4* lautet für eine sich aus n Dichtestufen zusammensetzende Erde (vgl. [4], S. 265):

$$\sum_{v=1}^{v=n} \sigma_v r_v^5 (\sigma_v - \sigma_{v+1}) = \frac{C - A}{C} \cdot \sum_{v=1}^{v=n} r_v^5 (\sigma_v - \sigma_{v+1}) \dots \dots \dots (4)$$

worin C das Trägheitsmoment der Erde in bezug auf die Rotationsachse, A dasjenige in bezug auf eine in der Äquatorebene liegende Achse bedeutet. Da das Verhältnis der Hauptträgheitsmomente $\frac{C - A}{C}$, welche man aus der Größe der

*) Seit Clairaut haben sich eine ganze Anzahl bedeutender Mathematiker mit diesem Gegenstand befaßt. Eine neuere, die verschiedenen Behandlungsmethoden zusammenstellende Darstellung von F. Hopfner befindet sich in [6], S. 272 ff.

Präzessionskonstante erhält, sich nicht sehr erheblich von der Abplattung α , der Niveauflächen unterscheidet, so ist diese Bedingung nahezu identisch mit der Bedingung 3 des hydrostatischen Gleichgewichts für die Erdoberfläche. Rechnerisch ist die Gleichung (4) ebenfalls wegen der unbekanntenen α , der Niveauflächen im Erdinnern schwer zu behandeln.

Kombiniert man die letzten beiden Bedingungen, und zwar den Spezialfall $r_i = R$, $\alpha_i = \alpha_0$ der Gleichung (3) (d. i. die mit der idealen Erdoberfläche zusammenfallende Niveaufläche) mit der Gleichung (4), so erhält man folgende praktisch sehr einfach zu behandelnde Gleichung:

$$\sum_{v=1}^{v=n} \left(\frac{r_v}{R}\right)^5 (\sigma_v - \sigma_{v+1}) = \frac{5}{3} \left(\alpha_0 - \frac{f}{2g_0}\right) \sigma_m \frac{C}{C-A} \dots \dots \dots (5)$$

Diese Gleichung läßt erkennen, daß wegen der Größe des Faktors r_v^5 die inneren Schichtungen das Resultat bedeutend weniger beeinflussen als die äußeren Schichten. Daraus folgt, daß es in dieser *Bedingung hauptsächlich auf die Dichteverteilung in den äußeren Schichten der Erde ankommt*, so daß man ihr in dem vorliegenden Falle, in welchem es sich um die Berechnung der Dichten der innersten Schicht σ_4 und σ_5 handelt, ein geringeres Gewicht erteilen muß.

Unter Benutzung der Gleichungen (1) nimmt die Bedingungsgleichung (5) die Form an ($R = 1$ gesetzt):

$$\left. \begin{aligned} & (2\sigma_5 + 5\sigma_4 - 7\sigma_3) \frac{R_1^5}{7} + \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{6} \cdot \frac{R_2^6 - R_1^6}{R_2 - R_1} + (\sigma_2 - \sigma_1) R_2^5 \\ & + \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{6} (1 + R_2 + R_2^2 + R_2^3 + R_2^4 + R_2^5) + \sigma_0 = \frac{5}{3} \left(\alpha - \frac{f}{2g_0}\right) \sigma_m \frac{C}{C-A} \end{aligned} \right\} (6)$$

An numerischen Werten sind — außer den bereits angegebenen — einzusetzen:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{297} = 0.003367, \\ \frac{f}{g_0} &= \frac{1}{289} = 0.003467, \\ \frac{C-A}{C} &= \frac{1}{306} = 0.003268. \end{aligned}$$

(Mittel aus den von Oppolzer und Hansen gefundenen Werten.)

Die mathematische Formulierung der *Bedingung c* erhalten wir aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen (v_l) und transversalen (v_t) Erdbebenwellen im Erdkern. Die Analyse der Erdbebendiagramme hat über diese Frage aber noch keine völlige Klarheit ergeben: Nach den neuesten Feststellungen von B. Gutenberg und F. Richter [7] entspricht die Verteilung der Geschwindigkeit der Longitudinalwellen im Erdkern der graphischen Darstellung in Fig. 1. C. G. Dahm [17] findet als mittlere Geschwindigkeit der Longitudinalwellen im Erdkern den Wert 9.87 km/sec. Die Frage, ob Transversalwellen durch den

Erdkern gehen oder nicht, ist noch nicht mit Sicherheit geklärt. Man hat lange Zeit vergebens nach ihren Einsätzen in den Erdbebendiagrammen gesucht. Macelwane [12], Bastings [11] und Imamura [13] glauben die Existenz transversaler Erdbebenwellen im Erdkern gefunden zu haben. Endgültig geklärt sind diese Fragen noch nicht. Wir werden aber bei den folgenden Berechnungen dieser Feststellung Rechnung tragen, und nehmen daher an:

1. Die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen beträgt entsprechend den Feststellungen von B. Gutenberg und F. Richter: $v_l = 8$ km/sec in dem äußeren Teil des Erdkerns, zunehmend bis auf 11.3 km/sec im Erdmittelpunkt;

2. entsprechend dem Ergebnis von C. G. Dahm: $v_l = 9.87$ km/sec im ganzen Erdkern.

(Den Fall 1 nehme ich als den wahrscheinlicheren an.)

In jedem dieser beiden Fälle nehmen wir, was die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Transversalwellen im Erdkern anbetrifft, an:

a) Es existieren keine Transversalwellen im Erdkern;

b) das Verhältnis der Geschwindigkeit der Transversal- zu derjenigen der Longitudinalwellen ist im Erdkern dasselbe wie bei einer vollkommen elastischen Masse.

Zwischen den Elastizitätskonstanten und den elastischen Raumwellen bestehen folgende Beziehungen:

$$v_t = v_l \sqrt{\frac{m-2}{2(m-1)}} \dots \dots \dots (7a)$$

$$\mu = \sigma v_l^2 = \sigma v_l^2 \frac{m-2}{2(m-1)} \dots \dots \dots (7b)$$

$$k = \sigma \left(v_l^2 - \frac{4}{3} v_t^2 \right) = \sigma v_l^2 \frac{m+1}{3(m-1)} \dots \dots \dots (7c)$$

worin m die Poissonsche Konstante, μ den Modul der Richtigkeit und k den Kompressibilitätsfaktor bedeuten. Für eine vollkommen elastische Masse ist $m = 4$, für Flüssigkeiten $m = 2$, d. h. Transversalwellen sind in Flüssigkeiten nicht möglich. (Für das Innere der Erde außerhalb des Kerns steigt nach B. Gutenberg [8], S. 358 der Wert für die Poissonsche Konstante mit der Tiefe von etwa $\frac{1}{m} = 0.27$ bis auf $\frac{1}{m} = 0.30$ an.)

Es sind also für den Erdkern folgende vier Fälle zu betrachten, sowohl für den Grenzfall A als für den Grenzfall B des Dichtegesetzes:

Fall 1a ($m = 2$):

$$v_t \text{ nach Gutenberg, } v_t = 0, \quad k = \sigma v_l^2, \quad \mu = 0;$$

Fall 2a ($m = 2$):

$$v_t \text{ nach Dahm, } v_t = 0, \quad k = \sigma v_l^2, \quad \mu = 0;$$

Fall 1b ($m = 4$):

$$v_t \text{ nach Gutenberg: } v_t = \frac{\sqrt{3}}{3} v_l, \quad k = \frac{5}{9} \sigma v_l^2, \quad \mu = \frac{1}{3} \sigma v_l^2 = \frac{3}{5} k;$$

Fall 2b ($m = 4$):

$$v_t \text{ nach Dahm: } v_t = \frac{\sqrt{3}}{3} v_l, \quad k = \frac{5}{9} \sigma v_l^2, \quad \mu = \frac{1}{3} \sigma v_l^2 = \frac{3}{5} k.$$

Fig. 1 zeigt das Bild der Verteilung der Geschwindigkeit der elastischen Raumwellen im Erdinnern, und zwar stellen die Kurven v_l und v_t außerhalb des

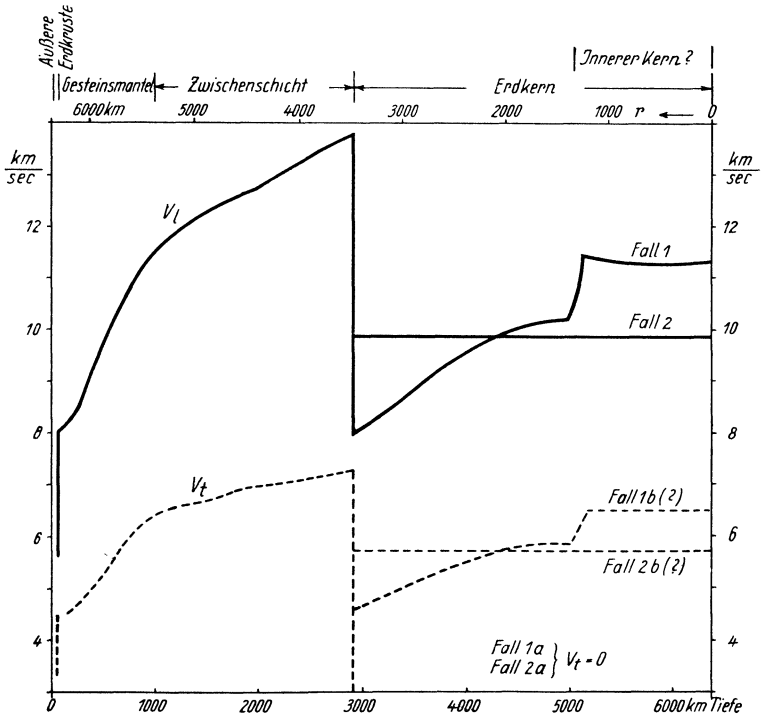


Fig. 1. Geschwindigkeit der longitudinalen (v_l) und transversalen (v_t) Erdbebenwellen als Funktion der Tiefe im Erdinnern

Erdkerns Mittelbildungen dar aus den Berechnungen von B. Gutenberg und F. Richter [8], H. Witte [14], K. Wadati und S. Oki [15] und C. G. Dahm [16]. Innerhalb des Erdkerns stellen die einzelnen Kurven dar: Fall 1 die Kurve von v_l nach der Berechnung von Gutenberg und Richter [7], Fall 2 die Kurve von v_l nach der Berechnung von C. G. Dahm [17], Fall 1b und Fall 2b die aus den entsprechenden v_l -Kurven nach Gleichung (7a) für $m = 4$ berechneten mutmaßlichen Kurven der Geschwindigkeit der Transversalwellen v_t , deren Realität aber sehr fraglich ist.

Aus der zwischen dem Kompressibilitätsfaktor k , der Druckänderung dp , der Dichte σ und ihrer Änderung $d\sigma$ bestehenden Beziehung:

$$\frac{dp}{k} = \frac{d\sigma}{\sigma}$$

folgt in Verbindung mit Gleichung (7c):

$$dp = v_l^2 \frac{m+1}{3(m-1)} d\sigma \dots \dots \dots (8)$$

Für die Größe der Schwerebeschleunigung g bzw. des Druckes p als Funktion des Abstandes x vom Erdmittelpunkt gelten allgemein die Formeln:

$$g = \kappa \frac{4\pi}{x^2} \int_0^x x^2 \sigma dx \dots \dots \dots (9a)$$

$$p = p_1 - \int_0^x g \sigma dx \dots \dots \dots (9b)$$

worin κ ($= 6.65 \cdot 10^{-8}$) die Gravitationskonstante und p_1 den Druck im Erdmittelpunkt bedeuten. Wenden wir diese Formeln auf den Erdkern, d. i. Gleichung (1a) an, so wird Gleichung (8), indem wir die Ausdrücke für dp und $d\sigma$ einsetzen:

$$v_l^2 \frac{m+1}{3(m-1)} (\sigma_5 - \sigma_4) = \kappa \frac{2}{3} \pi R_1^2 \left\{ \sigma_5^2 - \frac{8}{5} \sigma_5 (\sigma_5 - \sigma_4) \frac{x^2}{R_1^2} + \frac{3}{5} (\sigma_5 - \sigma_4)^2 \frac{x^4}{R_1^4} \right\}$$

Diese Gleichung gilt für alle Werte von x ; um die Bedingung für den ganzen Bereich von $x = 0$ bis $x = R_1$ gleichmäßig zu erfüllen, teilen wir ihn in n gleiche Abschnitte, setzen nacheinander für jeden Abschnitt die entsprechenden Werte von x und v_l (nach Fig. 1) ein und bilden aus den so erhaltenen $n + 1$ Gleichungen das Mittel. Praktisch ergibt sich nur ein geringfügiger Unterschied, ob man n groß oder klein wählt. Für $n = 10$ erhalten wir auf diese Weise als mathematischen Ausdruck für die Bedingung c :

$$\sum_{v=0}^{v=10} v_l^2 \cdot (\sigma_5 - \sigma_4) \frac{m+1}{3(m-1)} = \kappa \frac{2}{3} \pi R_1^2 \{0.578 \sigma_5^2 + 0.284 \sigma_5 \sigma_4 + 0.198 \sigma_4^2\}. \quad (10)$$

Zur Bestimmung der beiden Unbekannten σ_4 und σ_5 des Dichtegesetzes stehen uns die Gleichungen (2), (6) und (10) zur Verfügung. Die Unbekannten sind also überbestimmt. Der Gleichung (6) ist aber nach S. 6 geringeres Gewicht zu erteilen. Gleichung (10) ist dagegen, da es das Verhältnis der gesuchten Dichten σ_4 und σ_5 zueinander angibt, für die Berechnung gut geeignet. Wir bestimmen daher σ_4 und σ_5 aus den Gleichungen (2) und (10) und prüfen dann an Hand der Gleichung (6), ob die gefundenen Werte dieser in hinreichendem Maße gerecht werden.

Setzen wir in (2) und (10) die angegebenen numerischen Werte ein, so erhalten wir:

$$\text{Gleichung (2): } 2\sigma_5 + 3\sigma_4 = \begin{cases} 64 & \text{im Grenzfall A,} \\ 49 & \text{,, ,, ,, B.} \end{cases}$$

$$\text{Gleichung (10): } \begin{cases} 61.3 (\sigma_5 - \sigma_4) = \underbrace{0.578 \sigma_5^2 + 0.284 \sigma_4 \sigma_5 + 0.138 \sigma_4^2}_{\text{im Falle 1 a,}} \\ 34.1 (\sigma_5 - \sigma_4) = & \text{,, ,, 1 b,} \\ 58.1 (\sigma_5 - \sigma_4) = & \text{,, ,, 2 a,} \\ 32.3 (\sigma_5 - \sigma_4) = & \text{,, ,, 2 b.} \end{cases}$$

Aus den Gleichungen (2) und (10) folgt:

	Grenzfall A		Grenzfall B	
	σ_4	σ_5	σ_4	σ_5
Fall 1 a	11.6	14.6	9.1	10.9
„ 1 b	10.2	16.7	8.4	11.9
„ 2 a	11.6	14.6	9.1	10.9
„ 2 b	10.0	16.9	8.3	12.0

Man erkennt aus diesem Ergebnis folgendes: Es ist für die vorliegende Berechnung des Dichtegesetzes gleich, ob man die von B. Gutenberg festgestellte Geschwindigkeitsverteilung (Fall 1) der Longitudinalenwellen im Erdkern oder den von C. Dahm gefundenen mittleren Wert (Fall (2) der Rechnung zugrunde legt.

Bedeutend größer ist der Unterschied, wenn man erstens annimmt, daß keine Transversalwellen durch den Erdkern gehen (Fall a), oder zweitens, daß deren Geschwindigkeit zu derjenigen der Longitudinalwellen in der gleichen Beziehung steht wie bei einer vollkommen elastischen Masse (Fall b). Wir sind von der Voraussetzung ausgegangen, daß die Zunahme der Dichte innerhalb des Erdkerns nur eine Folge der Kompression infolge des zunehmenden Druckes ist. Für den Fall a erhalten wir eine Dichtezunahme von 3 Einheiten im Grenzfall A und von 1.8 Einheiten im Grenzfall B, für den Fall b aber eine Dichtezunahme von 6.8 bzw. 3.6 Einheiten! Eine solche Kompression der Eisenatome bei einem Druckanstieg von etwa $1\frac{1}{2}$ bis auf rund 4 Millionen Atm. (vgl. Fig. 4) muß als sehr unwahrscheinlich angesehen werden. Wiechert ([1], S. 256) hatte z. B. angenommen, daß die wachsende Verdichtung der Substanz infolge des zunehmenden Druckes innerhalb des Erdkerns höchstens eine Einheit betragen könnte! Ich möchte daher in diesem Ergebnis der Berechnung einen Hinweis erblicken, daß der Fall b aus physikalischen Gründen auszuschließen ist; d. h. daß sich *die Materie im Erdkern wahrscheinlicher wie eine Flüssigkeit als wie eine elastische feste Masse verhält*. Als *Endergebnis der Berechnung* setzen wir daher:

$$\text{Grenzfall A: } \begin{cases} \sigma_4 = 11.6 \\ \sigma_5 = 14.6, \end{cases}$$

$$\text{Grenzfall B: } \begin{cases} \sigma_4 = 9.1 \\ \sigma_5 = 10.9. \end{cases}$$

Setzen wir diese Werte auf der linken Seite der Gleichung (6) ein, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{Grenzfall A: } 4.4 &= \left\{ \frac{5}{3} \left(\alpha - \frac{f}{2g_0} \right) \sigma_m \frac{C}{C-A} = 4.6. \right. \\ \text{„ B: } 4.7 &= \end{aligned}$$

Die linke Seite der Gleichung (6) wird also mit den angegebenen Werten im Grenzfall A ein wenig kleiner, im Grenzfall B ein wenig größer als der aus den Beobachtungen sich ergebende Wert; ein zwischen den beiden Grenzfällen liegendes

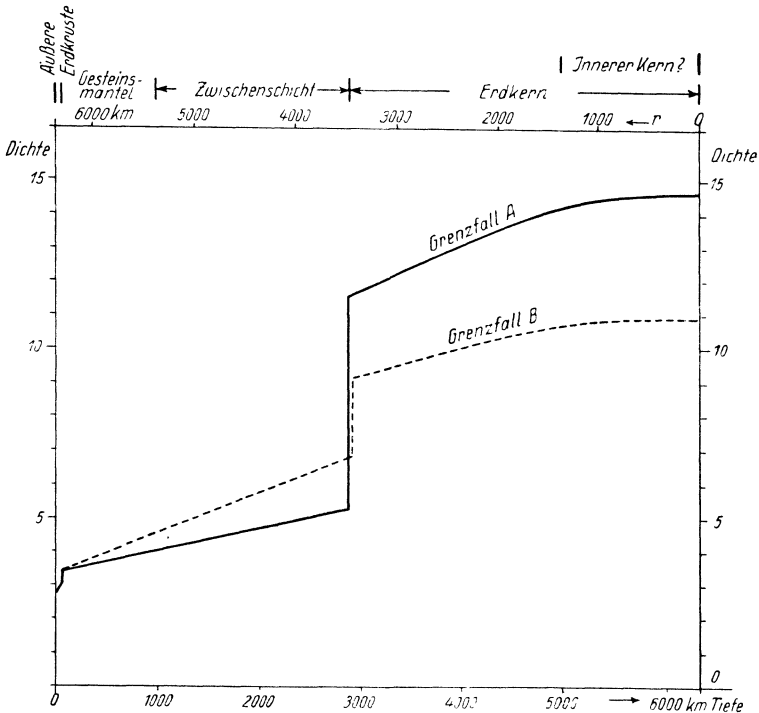


Fig. 2. Verteilung der Dichte im Erdinnern als Funktion der Tiefe

Dichtegesetz würde also die Bedingungsgleichung noch genauer erfüllen. Im übrigen läßt sich durch eine geringfügige Änderung der angenommenen Werte für die oberflächennahen Dichten eine vollständige Übereinstimmung der beiden Seiten der Gleichung (6) leicht erreichen; *d. h. mit den für σ_4 und σ_5 in den beiden Grenzfällen gefundenen Werten genügt das Dichtegesetz den sich aus der Größe der Präzessionskonstanten und der Abplattung der Gleichgewichtsfigur der Erde ergebenden Bedingungen in hinreichendem Maße.*

In graphischer Darstellung erhalten wir den in Fig. 2 für die beiden Grenzfälle dargestellten Verlauf der Dichtefunktion.

Das aufgestellte Dichtegesetz entspricht der Ableitung nach sämtlichen aufgestellten Bedingungen. Die wirkliche Dichteverteilung im Erdinnern muß nach S. 3 innerhalb der beiden Grenzfälle A und B liegen. Die lineare Dichtezunahme mit der Tiefe bis zum Erdkern ist nur zur Vereinfachung der Rechnung angenommen worden. Wahrscheinlich ist, daß die Dichtekurve sich in einigen Tiefenstufen unstetig — möglicherweise auch etwas sprunghaft — ändert; ebenso würde die Annahme eines inneren Erdkerns mit einer unstetigen Dichteänderung in etwa 5000 km Tiefe gut mit der berechneten Dichtefunktion zu vereinbaren sein. In jedem Falle muß man den inneren Teil des Erdkerns als ziemlich homogen ansehen, und es wäre denkbar, daß die fragliche Unterteilung des Erdkerns in Wirklichkeit nicht unstetig ist, sondern nur durch den Verlauf der Dichtezunahme infolge der Kompression hervorgerufen wird. Jedenfalls liegt kein Grund vor, in 5000 km Tiefe eine Substanzänderung anzunehmen. Es ist nicht möglich, aus den von der Dichteverteilung im Erdinnern abhängigen Beobachtungserscheinungen genauere Feinheiten in der Dichtefunktion abzuleiten.

Vergleichen wir die ältere von Legendre-Laplace und die neuere von E. Wiechert begründete Ansicht über die Ursache der Dichtezunahme im Erdinnern, so müssen wir feststellen, daß unsere heutige Anschauung zwischen diesen beiden — jedoch näher der Wiechertschen Ansicht — liegt: Die Materialverschiedenheit erscheint als die Hauptursache, besonders, da sie den Dichtesprung in 2900 km Tiefe bedingt. Aber auch die aus der Kompression infolge der Druckerhöhung sich ergebende Dichtezunahme muß dem obigen Berechnungsergebnis nach als größer angenommen werden, wie Wiechert für möglich gehalten hatte. Irgendwelche Bedenken, ob die errechneten hohen Dichtewerte für den Erdkern mit der in der Geophysik allgemein anerkannten und hinreichend sicher begründeten Ansicht, daß der Erdkern im wesentlichen aus Eisen (mit geringen Beimengungen von Nickel und anderen unwesentlichen Metallen) besteht, zu vereinbaren ist, bestehen m. E. nicht. Eine so starke Kompression der Eisenatome muß bei Drucken in der Größenordnung von 2 bis 4 Millionen Atmosphären (siehe Fig. 4) als möglich angesehen werden.

Von den praktischen Größen, welche von der Massenverteilung im Erdinnern abhängen, können wir den *Verlauf der Schwerkraft auf der Erdoberfläche*, die *Erdfigur* und die *Hauptträgheitsmomente der Erde* aus geophysikalischen, geodätischen und astronomischen Messungen bestimmen, *ohne daß das Dichtegesetz bekannt zu sein braucht*. Dagegen ist die Kenntnis der Dichtefunktion Voraussetzung, wenn man den Verlauf der Größe der *Schwerebeschleunigung*, des *Druckes* und der *Elastizitätskonstanten für das Erdinnere* bestimmen will.

Für die Größe der *Schwerebeschleunigung* g als Funktion des Abstandes x vom Erdmittelpunkt erhalten wir nach Gleichung (9a) unter Benutzung der Gleichungen (1) die Formeln:

a) Für $x = 0$ bis $x = R_1$:

$$g = \kappa \frac{4}{3} \pi \left\{ \sigma_5 - \frac{3}{5} (\sigma_5 - \sigma_4) \frac{x^2}{R_1^2} \right\} x;$$

b) für $x = R_1$ bis $x = R_2$:

$$g = g_1 \frac{R_1^2}{x^2} + \kappa \frac{4}{3} \pi \left\{ \left(\sigma_3 + \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{R_2 - R_1} R_1 \right) x - \left(\sigma_3 + \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{R_2 - R_1} \cdot \frac{R_1}{4} \right) \frac{R_1^3}{x^2} - \frac{3}{4} \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{R_2 - R_1} x^2 \right\};$$

c) für $x = R_2$ bis $x = R$:

$$g = g_2 \frac{R_2^2}{x^2} + \kappa \frac{4}{3} \pi \left\{ \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{R - R_2} R_2 \right) x - \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{R - R_2} \cdot \frac{R_2}{4} \right) \frac{R_2^3}{x^2} - \frac{3}{4} \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{R - R_2} x^2 \right\},$$

worin g_1 die Schwerkraft im Abstände $x = R_1$, g_2 die Schwerkraft für $x = R_2$ bedeuten.

In graphischer Darstellung erhalten wir das in Fig. 3 dargestellte Bild des Verlaufs der Schwerebeschleunigung vom Erdmittelpunkt bis zur Erdoberfläche.

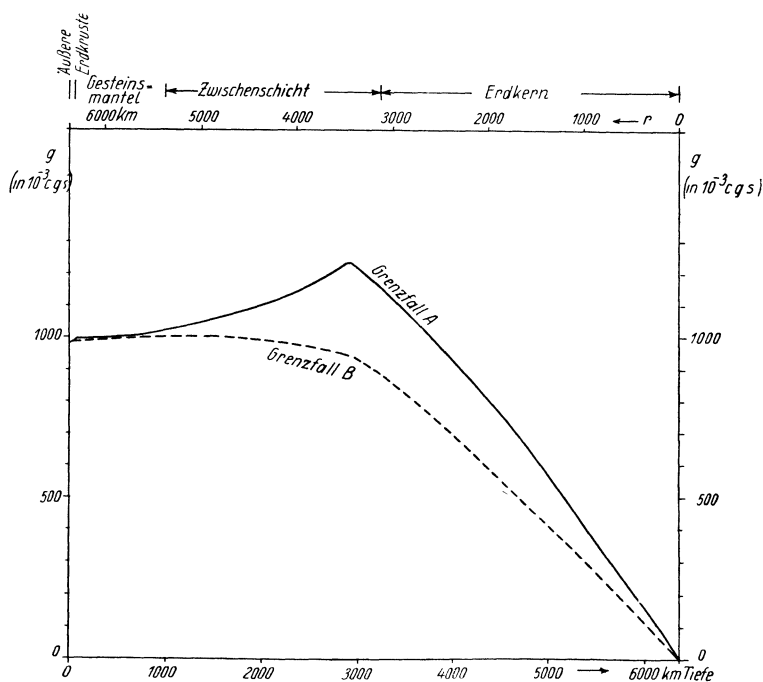


Fig. 3. Abhängigkeit der Schwerebeschleunigung von der Tiefe

Der Druck p im Innern der Erde nimmt mit dem Abstände vom Erdmittelpunkt ab nach Gleichung (9b). Den etwas umständlichen rechnerischen Weg zur Bestimmung des Druckverlaufs — indem man die obigen Ausdrücke für g und die in den Gleichungen (1) angegebenen Ausdrücke für σ in Gleichung (9b) einsetzt und dann die Integration durchführt —, ersetzt man einfacher — und mit hinreichender Genauigkeit — durch eine mechanische Integration, wobei man für konstante kleine Intervalle Δx die zugehörigen Werte von g und σ den

in Fig. 2 und 3 dargestellten Kurven entnimmt. Fig. 4 zeigt das Ergebnis der Rechnung in graphischer Darstellung; der Druck ist in 10^{12} cgs-Einheiten (1 Atm. = $0.987 \cdot 10^6$ cgs) angegeben. — Die errechneten Maximaldrucke im Erdmittelpunkt sind etwas größer, als nach den bisherigen Dichtegesetzen angenommen wurde.

Den Verlauf der *Elastizitätskonstanten*, also des Moduls μ der Richtigkeit und des Kompressibilitätsmoduls k , erhalten wir aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen und der transversalen Erdbebenwellen in Verbindung mit

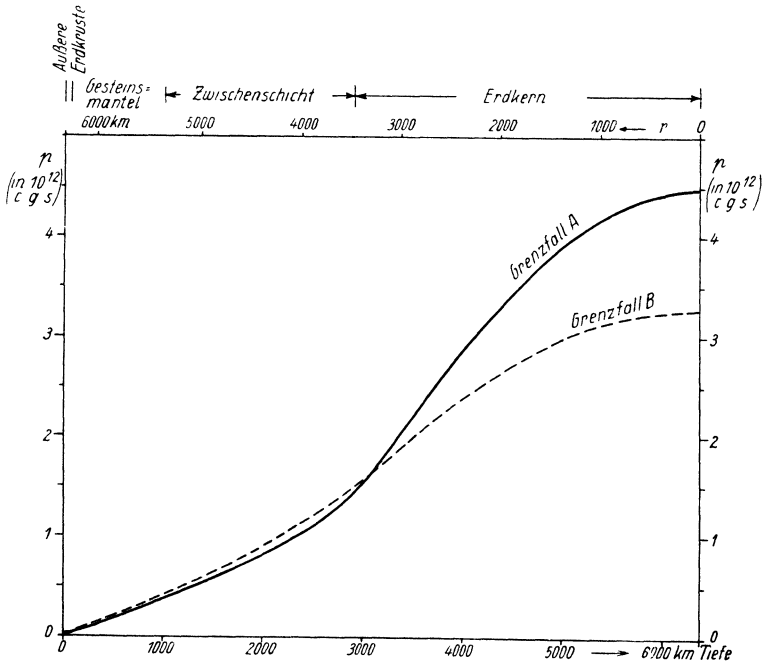


Fig. 4. Druckzunahme mit der Tiefe im Erdinnern

dem Dichtegesetz nach den Gleichungen (7b) und (7c). Die Werte für v_l , v_t und σ entnehmen wir den Fig. 1 und 2 und erhalten damit für μ und k eine Verteilung mit der Tiefe, wie sie in der Fig. 5 graphisch dargestellt ist (Fall 1 ist der wahrscheinlichere).

Die Elastizitätskoeffizienten von Stahl sind zum Vergleich rund:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.8 \cdot 10^{12} \text{ cgs,} \\ k &= 1.6 \cdot 10^{12} \text{ cgs.} \end{aligned}$$

An der Grenzfläche des Erdkerns ist die Materie also etwa $3^{2/3}$ bis 7 mal, im Erdmittelpunkt etwa $6^{1/2}$ bis $10^{1/2}$ mal so „inkompressibel“ wie Stahl; ihre Richtigkeit (d. i. der Widerstand gegen Formveränderungen) ist wahrscheinlich

gleich oder nahezu gleich Null. Die Unsicherheit, welche diesem Ergebnis anhaftet, rührt davon her, daß die Frage, ob transversale Erdbebenwellen durch den Erdkern gehen, und damit die Frage, ob die Materie im Erdkern sich wie eine Flüssigkeit oder wie eine elastische feste Masse verhält, noch nicht sicher gelöst ist. Die erstere Ansicht, welche zuerst von C. G. Knott ausgesprochen und dann von E. Wiechert übernommen wurde, würde mit der Feststellung einiger Seismologen, welche Einsätze transversaler, durch den Erdkern gehender Wellen

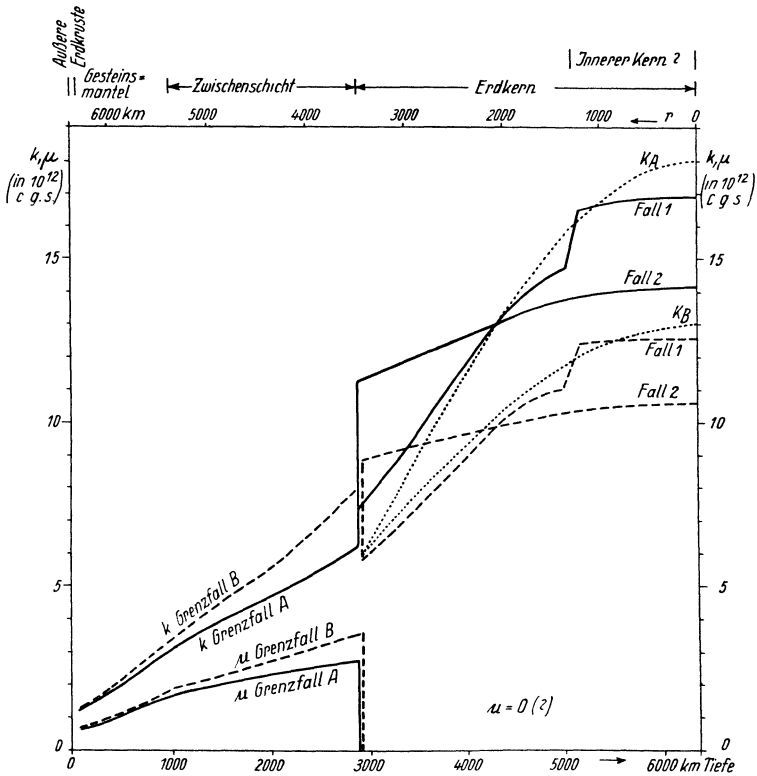


Fig. 5. Die Elastizitätskonstanten im Erdinnern als Funktion der Tiefe

beobachtet zu haben glauben (vgl. S. 6 u. 7), nicht zu vereinbaren sein. Nehmen wir diese Feststellung als gegebene Tatsache an, so ergibt jedoch die Theorie eine unwahrscheinlich große Dichtezunahme innerhalb des Erdkerns (vgl. S. 10). Unsere Vorstellung von der Wirksamkeit der beiden Faktoren, von welchen der Aggregatzustand eines Stoffes abhängt, Temperatur und Druck, geht dahin, daß die Wärmebewegung der Moleküle bzw. Atome bei sehr hoher Temperatur ihre freie Verschiebbarkeit zur Folge haben können. Jedoch wirkt der Druck verfestigend auf die Masse und es wäre denkbar, daß trotz der starken thermisch-kinetischen Bewegungen der Moleküle diese bei außerordentlich hohen Drucken

so zusammengepreßt werden, daß eine vollkommen freie Verschiebbarkeit nicht mehr möglich ist. Theoretisch sind also alle Möglichkeiten und Übergangszustände denkbar. Die von G. Linck [18] zuerst ausgesprochene Ansicht, daß Temperatur und Druck im Erdinnern so groß sind, daß die Bildung von Molekülen nicht mehr möglich ist, daß also die Materie im Erdkern — wie bei Metaldämpfen — aus freien Atomen besteht, ist zwar mit allen Möglichkeiten vereinbar, entspricht aber zweifellos am ersten der Annahme der freien Verschiebbarkeit der Atome. Der in Fig. 5 punktiert (Kurve K) eingetragene Verlauf des Kompressibilitätsfaktors ist auf Grund dieser Annahme auf atomtheoretischem Wege [19] berechnet worden. Die Übereinstimmung mit dem Fall 1a, d. h. der Geschwindigkeitsverteilung der Longitudinalwellen im Erdkern nach B. Gutenberg

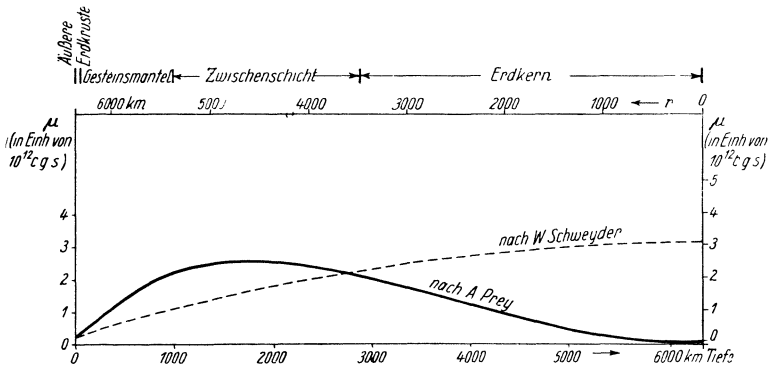


Fig. 6. Verlauf des Moduls μ der Richtigkeit im Erdinnern, berechnet aus den Beobachtungen der Gezeiten des festen Erdkörpers

und F. Richter und der Annahme, daß keine Transversalwellen durch den Erdkern gehen, ist augenscheinlich. Diese Übereinstimmung würde also ebenfalls für die letztere Annahme sprechen.

Zum Vergleich könnte man noch die aus den Beobachtungen der *Lot- bzw. Polhöheschwankungen* gewonnenen Ergebnisse mit heranziehen: W. Schweydar [20] findet aus seinen Messungen der Gezeiten des festen Erdkörpers unter Annahme der Dichteformel von Roche einen Verlauf des Moduls μ der Richtigkeit, wie ihn Abb. 6 zeigt. A. Prey [21] hat die Berechnungen wiederholt unter der Annahme, daß im Erdmittelpunkt die Richtigkeit gleich Null ist, d. h. daß sie mit der durch die Erdbebenforschung gewonnenen Ansicht in Einklang gebracht wird. Das Ergebnis ist ebenfalls in Fig. 6 wiedergegeben. Beide Ergebnisse entsprechen also den Beobachtungen der Ebbe- und Flutbewegung des festen Erdkörpers und den Polhöheschwankungen. Vergleichen wir sie mit dem in Fig. 5 angegebenen, auf seismophysikalischem Wege gefundenen Verlauf der Elastizitätskonstanten μ , so kann man feststellen, daß die für μ gefundenen Werte in der Mantel- bzw. Zwischenschicht hinreichend miteinander übereinstimmen. Über die Rigkeit

im Erdkern können wir aber aus den Beobachtungen der Lot- und der Polhöheschwankungen keinen sicheren Anhalt gewinnen. Das ist sehr verständlich, da bei diesen Erscheinungen die Elastizität des ganzen Erdkörpers, am wenigsten aber diejenige der innersten Schichten, eingeht.

Eine endgültige Entscheidung der Frage, ob die Materie im Erdkern sich wie eine Flüssigkeit oder wie eine elastische Masse verhält, etwa auf direktem Wege dadurch, daß es gelingt, die Existenz oder Nichtexistenz transversaler Erdbebenwellen im Erdkern sicher nachzuweisen, ist kaum zu erwarten, da dem Auffinden und der Deutung schwacher Einsätze inmitten der Aufzeichnungen der Fernbeben eine zu große Unsicherheit anhaftet.

Literatur

- [1] E. Wiechert: Über die Beschaffenheit des Erdinnern. Nachrichten d. Göttinger Akad. 1924, S. 251—256.
- [2] W. Klußmann: Über das Innere der Erde. Gerl. Beitr. z. Geophys. **14** (1915).
- [3] B. Gutenberg: Die elastischen Konstanten im Erdinnern. Phys. Zeitschr. **24**, 296 (1923).
- [4] H. Haalck: Über die Lagerung der Massen im Innern der Erde. Zeitschr. f. angew. Geophys. **1**, 257ff. (1924).
- [5] Williamson u. Adams: Journ. of the Washington Acad. **13**, 413 (1923).
- [6] F. Hopfner im Handbuch der Geophysik von B. Gutenberg, Bd. I, Abschnitt III, Berlin 1936.
- [7] B. Gutenberg u. C. F. Richter: P' and the Earth's Core. M. N. R. A. S. Geophys., Suppl. 4, S. 363 (1938).
- [8] B. Gutenberg u. C. F. Richter: On seismic waves. Gerl. Beitr. z. Geophys. **45**, 280—360 (1935); **54**, 94—136 (1939).
- [9] J. Lehmann: Bur. Centr. Séism., Série A, Trav. Sci. **14**, 87—115 (1936).
- [10] H. Jeffreys: The Time of the Core Waves. M. N. R. A. S. Geophys. Suppl. 4, S. 548 ff. (1939).
- [11] L. Bastings: Shear Waves Through the Earth Core. Nature **134**, 216 (1934).
- [12] J. B. Macelwane: The South Pacific Earthquake of June 26th 1924. Gerl. Beitr. z. Geophys. **28**, 165—227 (1930).
- [13] Imamura: Proc. Imp. Acad. Tokyo **8**, 354 (1932).
- [14] H. Witte: Beitr. zur Berechnung der Geschwindigkeit der Raumwellen im Erdinnern. Nachr. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Heft 2, 199—241 (1932).
- [15] K. Wadati u. S. Oki: On the Travel Time of Earthquake Waves (Part IV). The Geophysical Magazine VII, S. 149—160, August 1933.
- [16] C. G. Dahm: Velocity of P Waves in the Earth Calculated from the Macelwane P Curve, 1933. Bull. Seism. Soc. Am. **26**, 1—11, January 1936.
- [17] C. G. Dahm: New Values for Dilational Wave Velocities through the Earth. Transact. Geophys. Union **13**, Annual Meeting, S. 80, Washington 1934.
- [18] G. Linck: Aufbau des Erdballs. Jena, Fischer, 1924.
- [19] H. Haalck: Das Gleichgewicht der Kräfte im Innern des Erdkerns und die sich daraus ergebenden Folgerungen. Zeitschr. f. Geophysik 1941 (zur Zeit im Druck).
- [20] W. Schweydar: Lotschwankung und Deformation der Erde durch Flutkräfte. Zentralbüro d. Int. Erdm. N. F. **38** (1921).
- [21] A. Prey: Über die Elastizitätskonstante der Erde. II. Mitt. Gerl. Beitr. z. Geophys. **44**, 59—80 (1935).

Potsdam, Geophysik. Abt. d. Geodät. Instituts.