

Die rheologischen Eigenschaften der Erdkruste vom Standpunkt der neuen Erkenntnisse über den Herdvorgang bei grossen Erdbeben (*) (**)

L. HIERSEMANN

1. - EINLEITUNG UND DEFINITION DER RHEOLOGIE.

Die Geophysik, also auch die Seismologie, ist nicht Selbstzweck, sondern hat das Ziel, geologische Gedankengänge, wo immer es möglich ist, mit einem exakten physikalischen Inhalt zu erfüllen. Die neuen Erkenntnisse über den Herdvorgang bei Erdbeben liefern ein Kriterium, an dem man die Richtigkeit geologischer Vorstellungen über das rheologische Verhalten der Erdkruste kontrollieren kann.

Der Name *Rheologie* hat sich seit dem Jahre 1928 für den Zweig der Physik eingebürgert, der sich mit dem Verhalten der Materie unter dem Einfluss von formverändernden Kräften beschäftigt.

Leider werden auch in der Geophysik die *rheologischen Begriffe* wie z. B. Festigkeit, Fliessen, Kriechen sprödes oder plastisches Verhalten nicht immer einheitlich und oftmals unexakt gebraucht. Es sei daher gestattet, an Hand einiger allgemeiner Bemerkungen über Arbeitsweise und Arbeitsgebiet der Rheologie die Möglichkeiten zur rheologischen Deutung seismischer Daten aufzuzeigen.

2. - DIE RHEOLOGISCHE DEUTUNG SEISMOLOGISCHER DATEN.

2.1 *Allgemeines.*

Für die Deutung der rheologischen Eigenschaften der Erdkruste können die bekannten seismischen Messdaten wie Einsatzzeiten, Amplituden und Amplitudenrichtungen sowie die aus ihnen abgeleiteten Grossen herangezogen werden. Sie bilden das mehr oder weniger gesicherte Tatsachenmaterial, das die sonst in der Rheologie üblichen Messgrossen ersetzen muss, weil Laborversuche, wie sie bei der Materialprüfung wirtschaftlich wichtiger Baustoffe möglich sind, wegen des meist unbekanntem Modellfaktors nicht in Frage kommen. Ausserdem gilt es zu beachten, dass die *Erdkruste ein historisch gewordenes Gefüge* darstellt, in dem frühere Beanspruchungen irreversible Änderungen der inneren Struktur verursachen, wodurch eine Wiederholung des Vorganges mit dem gleichen Ausgangspunkt unmöglich gemacht wird. Schliesslich spielen sich die Deformationen des Krustenmaterials unter Bedingungen ab, die im Labor nur sehr schwer und meist gar nicht reproduzierbar sind. Diese Bedingungen sind nicht nur die *Temperatur* und der *hydrostatische Druck* sondern vor allem auch die *Dauer der Krafteinwirkung*, die den menschlichen Erfahrungsbereich und damit natürlich auch den seismischen Beobachtungsschatz weit überschreitet.

Die auf Grund seismischer Daten gewonnenen Erkenntnisse liefern aus den erwähnten Gründen mehr oder weniger nur ein *Augenblicksbild*, dem keine absolute Gültigkeit zukommt.

(*) Zusammenfassender Vortrag auf der Tagung der Commission Seismologique Europeenne vom 8.-12. 4. 1958 in Utrecht über die schon im Freiburger Forschungsheft C 24 (1956) und in der Geologischen Rundschau 46, (1957) veröffentlichten Arbeit.

(**) Veröffentlichung Nr. 56 des Instituts für Angewandte Geophysik der Bergakademie Freiberg, Direktor: Prof. Dr. O. MEISSER.

tigkeit für die Vergangenheit und die Zukunft zukommt. Es ist jedoch eine auch in geologischen Kreisen weit verbreitete Auffassung, dass Erdbeben als Fortsetzung schon lange in Gang befindlicher tektonischer Vorgänge anzusehen sind, so dass sie in der ursächlich verbundenen Kette einen ersten Anhaltspunkt auch für die Deutung von Erdkrustendeformationen früherer Epochen liefern.

2.2 Strukturmodelle.

Zum Studium und zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Baustoffen, wie Stahl und Beton benutzt man als erste Annäherung an die Wirklichkeit sogenannte

Wellen zeigt. Sie kann also in erster Näherung durch das Grundelement der elastischen Feder beschrieben werden. Die makroskopischen Beobachtungen liefern zusätzlich den Beweis, dass Erdbeben als Folge tektonischer Bewegungen mit *permanenten Deformationen* auftreten. Diese Eigenschaft wird zweckmässigerweise durch das rheologische Grundelement eines reibend gegen seine Unterlage verschiebbaren Gewichtes dargestellt. Die bessere Annäherung an die Wirklichkeit ist also eine *Kombination der Feder mit dem Gewicht* zu einem Strukturmodell, das in der Rheologie für das *plastische Fließen* bekannt ist. Bei einer Kraft, die kleiner ist als die *Festigkeit* der Kruste, im Modell also kleiner als die Rei-

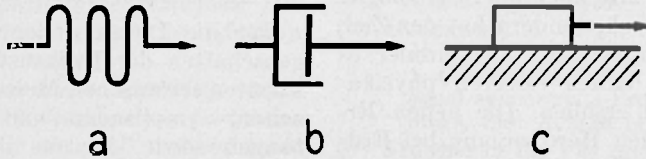


Abb. 1 — a) Vollkommen elastische Feder. — b) Perforierter Kolben, der sich in einem mit einer viskosen Flüssigkeit gefüllten Zylinder bewegt. — c) Gewicht, das reibend gegen seine Unterlage verschoben werden kann.

Strukturmodelle. Sie beschreiben das rheologische Verhalten des Materials mit Hilfe von 3 *rheologischen Grundelementen*, die entweder hintereinander oder parallel zu *Strukturmodellen* kombiniert werden können. Die Bezeichnung «Strukturmodell» darf nicht zu der irrigen Vorstellung führen, dass seine Grundelemente reelle Gefügebestandteile darstellen. Die Strukturmodelle beschreiben als Ganzes den Integraleffekt des rheologischen Verhaltens, ohne dass ihre Elemente reelle Analoga besitzen müssen.

Es erscheint auch für das Studium der rheologischen Eigenschaften der Erdkruste zweckmässig, ein Strukturmodell zu finden, das den beobachteten seismischen Daten gerecht wird. Unter *Erdkruste* sei im folgenden stets der Bereich bis ca. 700 km Tiefe verstanden, in dem noch Erdbebenherde auftreten. Für kurz andauernde Kräfte, die ihre Festigkeit nicht überschreiten, verhält sich die Erdkruste *vollkommen elastisch*, wie die Ausbreitung der seismischen

Welle zeigt. Wenn die Kräfte grösser sind, wird das Krustenmaterial nur elastisch deformiert, bei einer grösseren plastisch. Natürlich stellt dieses Strukturmodell der Erdkruste, wie überhaupt alle Modelle eine Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar.

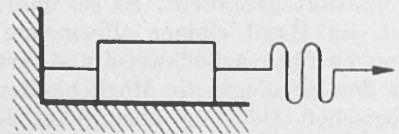


Abb. 2 — Strukturmodell für plastisches Fließen.

Unter Berücksichtigung der Eigenschaft der *elastischen Nachwirkung*, d. h. also eines zeitabhängigen Deformationsrückganges, hat Benioff für seine Kriechtheorie der Nachbeben ein *Strukturmodell der Erdkruste* entworfen, das den seismischen Beobachtungen weitgehend gerecht wird.

In seinem Modell entspricht f dem Gewicht bzw. der Verschiebungsfläche in der Natur. — Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass über das *im Herd wirkende Kraftsystem* heute noch zwei Auffassungen bestehen, die aus den Schwierigkeiten bei der Bestimmung

Körper mit elastischer Nachwirkung entspricht. Das parallel zum Ganzen liegende viskose Element R_1 hat einen grosseren Widerstand als R_2 und wirkt säkular. Es bestimmt die Deformation des gesamten Systems.

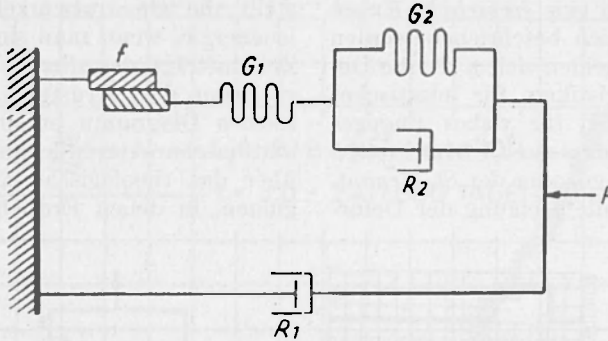


Abb. 3 — Benioffs Strukturmodell für die tieferen Regionen der Erdkruste.

von Amplitude und Richtung des ersten Einsatzes der Transversalwellen resultieren. Geologische Erwägungen, wie auch die Arbeiten unserer sowjetischen Kollegen machen es jedoch wahrscheinlich, dass der *Verschiebungsmechanismus*, d. h. also ein im Herd wirkendes *Kräftepaar mit Moment* bei

2.3 *Deformationscharakteristiken und empirische Kriechfunktionen.*

2.3.1 *Allgemeines.*

Auf der Grundlage seines Strukturmodells hat Benioff eine Theorie über die Entstehung der Nachbeben entwickelt, die es

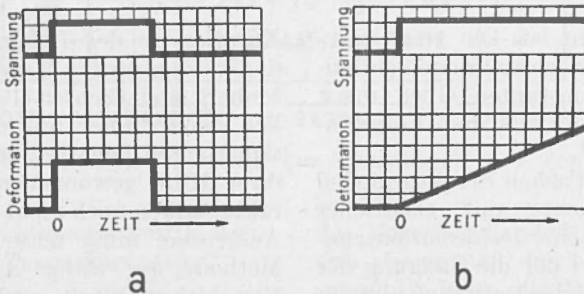


Abb. 4 — a) Deformationscharakteristik für rein elastisches Verhalten (Hooke'scher fester Körper). — b) Deformationscharakteristik für flüssiges Verhalten (Newton'sche Flüssigkeit).

den meisten Beben überwiegt. Die hier von Benioff eingeführte Annahme wird also auch durch die neueren Untersuchungen über den Herdvorgang gerechtfertigt. — Das plastische Strukturmodell ist bei Benioff mit einem Modell in Reihe kombiniert, das einem

erlaubt, Deformationscharakteristiken für die unzugänglichen Teile der Erdkruste zu gewinnen. Diese Deformationscharakteristiken sind zusammen mit den empirischen Kriechfunktionen eine weitere Möglichkeit, die rheologischen Eigenschaften des Kru-

stenmaterials zu beschreiben. Dabei verstehe ich unter einer *Deformationscharakteristik* ein Diagramm, in dem die Deformation als Funktion der Zeit aufgetragen ist.

Bei diesen Kurven hat immer eine ganze Schar gemeinsame Merkmale, die charakteristisch für die betreffende Art der Deformation sind und durch eine *empirische Kriechfunktion* mathematisch beschrieben werden können. So unterscheiden sich z. B. die Deformationscharakteristiken für plastisches Verhalten von denen für viskoses flüssiges Verhalten dadurch, dass nach Überschreiten der Festigkeit, oder genauer der *St. Venant-Nachgespannung*, die Steigung der Defor-

ation eines Bebens *proportional der elastischen Deformation* des Krustenmaterials ist, die dem Beben vorausgeht. Dabei ist vorausgesetzt, dass die Deformation durch die Herdverschiebung vollständig auf Null zurückgeht. Wird die Deformation erst allmählich durch eine Reihe von Nachbeben beseitigt, so stellt die Quadratwurzelsumme der Wellenenergie, wenn man sie als Funktion der Zeit aufträgt, den *allmählichen Deformationsrückgang* des Krustenmaterials dar. Ein solches Diagramm entspricht einer Deformationscharakteristik und gibt Aufschluss über das rheologische Verhalten der Regionen, in denen Erdbeben auftreten. Die

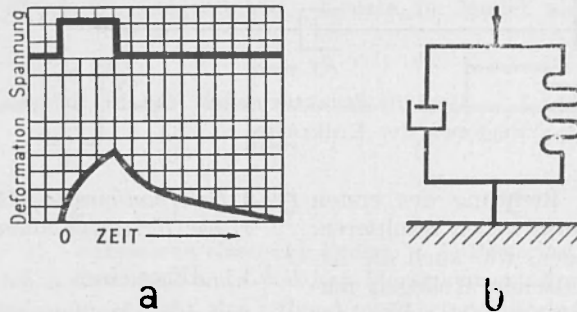


Abb. 5 - a) Deformationscharakteristik.
b) Strukturmodell für den Kelvin'schen festen Körper.

mation nicht konstant ist. Die von Griggs (1939) gefundenen Kriechfunktionen enthalten neben einem konstanten Glied meist noch ein Glied, das sich mit dem Logarithmus der Zeit ändert.

Die in dem Benioff'schen Strukturmodell enthaltene Komponente mit elastischer Nachwirkung würde eine Deformationscharakteristik haben, bei der die Steigung der Deformation während der Belastung allmählich abnimmt, und die Deformation nach der Entlastung langsam auf Null zurückgeht.

2.3.2 Deformationscharakteristiken aus Erdbebenmagnituden.

Deformationscharakteristiken für die tieferen Regionen der Erdkruste gewinnt man mit Hilfe der Herdzeit und der Amplituden im Seismogramm. Es lässt sich zeigen, dass die *Quadratwurzel der ausgestrahlter Energie*

Energiewerte der Beben gewinnt man aus der *instrumentellen Magnitudenskala* von Gutenberg und Richter (1942). Sie sind natürlich noch immer mit den bekannten Unsicherheiten behaftet, so dass auch die mit ihrer Hilfe gewonnenen Deformationscharakteristiken noch nicht ganz fehlerfrei sind. Ausserdem muss man bedenken, dass die Methode, die *richtige Auswahl* der zu einer Verschiebungsfläche gehörigen Nachbeben erfordert, was zweifellos nicht immer gewährleistet ist. Schliesslich geht in die Kurve noch das *Relaxationsfliessen*, d. h. also ein allmählicher Abbau der Spannung bei konstant gehaltener Deformation, ein, so dass die Annäherung nur dann vollständig ist, wenn sich das Material wie ein fester Körper mit elastischer Nachwirkung verhält. Die aus Erdbebenmagnituden gewonnenen Deformationscharakteristiken erlauben somit nur eine Entscheidung, ob sich die Erdkruste

in den beobachteten Zeiträumen wie ein fester Körper oder wie eine viskose Flüssigkeit verhält; denn das plastische Verhalten ist in der Kurve für den festen Körper mit enthalten.

Kurve besser mit den vorhin gezeigten Charakteristiken vergleichen zu können, müsste man bei ihr eigentlich oben und unten vertauschen. Es zeigt sich dann sehr deutlich, dass der *erste Ast* die *elastische Nachwirkung*

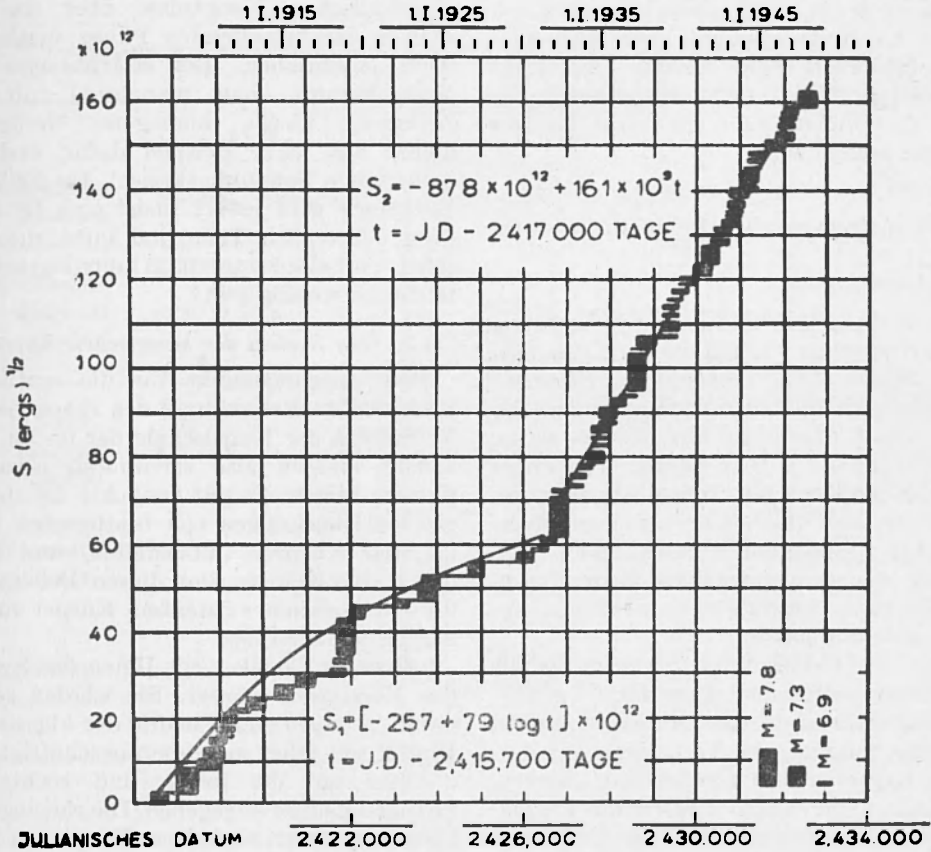


Abb. 6 - Deformationscharakteristik der Tiefenbeben von Tonga-Kermadec.

2.3.3 Die Deformationseharakteristik der Tiefenbeben von Tonga-Kermadec.

Ich darf Ihnen hier als besonders anschauliches Beispiel eine Charakteristik von Benioff (1954) vorführen. Es handelt sich um die Beben mit *Herdtiefen von 70-680 km* des Gebietes *Tonga-Kermadec*. Auf der Ordinate ist die Quadratwurzelsumme der Wellenenergie aufgetragen, die sich aus der Magnitudengleichung ergibt und auf der Abszisse die Zeit. In dem Diagramm sind *zwei empirische Formeln* angegeben, die den Deformationsrückgang beschreiben. Um die

des Materials darstellt. Die Tatsache, dass sich dieser Ast durch eine Funktion beschreiben lässt, die keinen Term enthält, der der Zeit direkt proportional ist, bedeutet eine Aufspeicherung elastischer Deformationen ohne merkliches Fließen für ein Zeitintervall von 24 Jahren. Der *zweite Ast* der Charakteristik stellt die *lineare Bewegung der Verschiebungsblöcke mit der Zeit dar*, nachdem die Blockierungsstelle mit dem grossen Beben vom 26. Mai 1932 gebrochen war.

Das soeben vorgeführte Beispiel zeigte, dass das *rheologische Verhalten der Erd-*

kruste bis 680 km Tiefe dem eines festen Körpers mit elastischer Nachwirkung entspricht. Wenn diese Eigenschaft auch nur für ein Zeitintervall von 24 Jahren Gültigkeit hat, so zeigt sie doch, dass die Erdkruste auch in grösseren Tiefen eine Festigkeit besitzt und auch bei geologisch langen Kraffteinwirkungen nur noch plastisch deformiert werden kann. Dies steht im Widerspruch zu vielen Hypothesen, die schon in geringen Tiefen ein viskos flüssiges Material annehmen.

2.4. Vereinfachte und exakte Strukturtheorien

2.4.1 Allgemeines.

Die dritte Möglichkeit zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens der Erdkruste sind *vereinfachte und exakte Strukturtheorien*, die schliesslich die beste Annäherung an die Wirklichkeit darstellen. Es ist das ferne, wahrscheinlich nur sehr schwer erreichbare Ziel, die beobachteten Tatsachen, in unserem Falle also die seismologischen Messdaten, so miteinander zu verknüpfen, dass sie sich wieder aus wenigen elementaren, mathematisch formulierten Gesetzmässigkeiten ableiten lassen.

Wenn wir bisher durch Strukturmodelle und Deformationscharakteristiken gleichsam das «makroskopische» Materialverhalten, d. h. die Summe des Verhaltens der einzelnen Komponenten beschreiben konnten, so erfordert die exakte Theorie die *Einführung der Gefügebestandteile*. Die Erdkruste ist nicht homogen isotrop, sondern sie stellt ein *mehrphasiges Gefüge* dar. Eine theoretische Behandlung ihrer Rheologie erfordert also von der Seismik die Auswertung und Hinzuziehung der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen und ihrer Unstetigkeiten wie auch der räumlichen Anordnung der Bebenherde sowie die eindeutige Bestimmung der Verschiebungsebenen und Richtungen. Die Zukunftsaufgabe der Seismologie, die vielleicht an unüberbrückbaren Schwierigkeiten scheitern wird, besteht dann darin, diese *skalaren und vektoriellen Gefügedaten* in äquivalenten Termen rheologischer Gleichungen auszudrücken, um so zunächst über vereinfachte zu exakten Strukturtheorien zu gelangen. Dabei ver-

steht man unter *rheologischer Gleichung* eine Gleichung zwischen dem Deformationstensor e und dem Spannungstensor p , die das rheologische Verhalten eines Körpers charakterisiert. Das rheologische Verhalten *einphasiger Gefüge* lässt sich mit Hilfe der physikalischen Kenntnisse über das Verhalten der betreffenden Phase mathematisch beschreiben. Bei *mehrphasigen Gefügen* kommt man manchmal mit der Zerlegung ideale homogene Gefügeelemente aus. (Ein Beispiel dafür sind die Mohr'schen Spannungskreise). Im Falle der Erdkruste wird jedoch meist eine Betrachtung der reellen Teile und ihres rheologischen Verhaltens innerhalb inhomogener Bereiche notwendig sein.

2.4.2. Das System der klassischen Körper.

Den Ausgangspunkt für die mathematisch exakte Behandlung des rheologischen Verhaltens der Kugelschale der festen Erdkruste, müssen also *vereinfachte Strukturtheorien* bilden. Es gilt zunächst die rheologischen Gleichungen von bestimmten idealisierten Körpern aufzustellen, und dann durch eine Kombination dieser Gleichungen die der wirklich existenten Körper immer mehr anzunähern.

Die erste Tabelle zeigt Ihnen das System der *klassischen Körper*. Sie werden so genannt, weil sich die Theorie der klassischen Physik seit jeher mit ihnen beschäftigt hat.

Links sind die festen und rechts die flüssigen Körper angegeben. Die rheologische Gleichung geht für jeden Körper in zwei Gleichungen für die Hauptdiagonalglieder und die Nichtdiagonalglieder des Spannungstensors über.

Das feste Extremum ist der *starre oder Euklidische Körper*, dessen einzelne Teile immer gleichen Abstand bewahren. Unabhängig von Betrag und Richtung der Kräfte entstehen keine Deformationen. Der Deformationstensor e ist gleich Null. Nach Euklid ist dieser Körper deshalb benannt, weil die Euklidische Geometrie auf der hypothetischen Existenz eines solchen Körpers beruht. Es hat sich allgemein eingebürgert, die dem unterschiedlichen rheologischen Verhalten entsprechenden Körper mit Namen von Wissenschaftlern zu belegen, die sie als erste näher beschrieben haben.

Das flüssige Extremum ist die sogenannte *Pascal'sche Flüssigkeit*. Es ist ein Körper, der einer reinen Formänderung ($e_v = 0$) ohne Volumenänderung keinen Widerstand entgegensetzt. Das Fehlen der Formelasti-

traditionelle Definition der Scherung zurückzuführen. Die Deformationscharakteristik und das Strukturmodell für den Hooke'schen Körper zeigte ich Ihnen schon in einem früheren Bild. Die Theorie der seis-

Tabelle 1. - DAS SYSTEM DER KLASSISCHEN KÖRPER (NACH REINER).

Bezeichnung des Materials		fest		flüssig		
		Euklid	Hooke	Newton	Pascal	
Rheologische Gleichung	Hauptdiagonalglieder	$e_v = 0$	$p_m = \kappa e_v$	$p_m = \kappa e_v + \eta_v e_v$	$e_v = 0$	$\eta =$ Viskosität (Scher-) $\eta_v =$ Volumenviskosität
	Nichtdiagonalglieder	$e_o = 0$	$p_o = 2\gamma e_o$	$p_o = 2\eta e_o$	$p_o = 0$	$\sigma =$ Poisson'sche Konst. $\lambda^* =$ Koeffizient des viskosen Zuges von Trouton
Fundamentale Konstanten		$\infty \leftarrow \kappa$ $\infty \leftarrow \gamma$		$\kappa \rightarrow \infty$ $\eta \rightarrow 0$		$\gamma =$ Scherungsmodul Formelastizität Torsionsmodul Starrheitsmodul Schiebungsmodul Righeit
Abgeleitete Konstanten		für $\varepsilon = \frac{9\kappa\gamma}{3\kappa + \gamma}$ $\kappa = \infty$ $e^* = 3\gamma$ $\sigma^* = \frac{1}{2} \sigma - \frac{3\kappa - 2\gamma}{6\kappa + 2\gamma}$		für $\eta_v = \infty$ $\lambda^* = 3\eta$		$\kappa =$ Kompressibilität $=$ Volumelastizität $=$ Elastizitätsmodul $\varepsilon =$ Young'scher Modul Längenelastizität (Elastizitätsmodul)

zitat bewirkt ein Verschwinden aller Tangentialspannungen ($p_o = 0$).

Damit kennen wir die beiden Extrema, zwischen denen alle wirklich existenten Körper, also auch die Erdkruste liegt. Es sind physikalisch mathematische Idealisierungen, die in der Natur nicht vorkommen.

In der Tabelle sind noch zwei weitere klassische Körper angegeben. Der *Hooke'sche feste Körper* genügt dem Gesetz, dass für eine lineare Deformation die Spannung proportional der Deformation ist. Wegen der Unabhängigkeit der Haupt- und Nichtdiagonalglieder wird das *elastische* Verhalten durch zwei unabhängige Materialkonstanten, die Kompressibilität κ und den Scherungsmodul γ ausgedrückt. Der Faktor 2 bei den Nichtdiagonalgliedern ist auf die

mischen Wellen zeigt, dass wir die Erdkruste in erster, grober Näherung als Hooke'schen festen Körper auffassen können.

Die *Newton'sche Flüssigkeit* ist ein Körper, bei dem der Fließwiderstand proportional der Relativgeschwindigkeit seiner Teile ist. Ein solcher Körper verhält sich unter allseitig gleichem, konstantem, hydrostatischem Druck wie ein Hooke'scher fester Körper, d. h. seine Dichte nimmt in umkehrbarer Weise zu. Ein solches Material lässt sich wieder durch zwei unabhängige Konstanten beschreiben, die Scherviskosität η und die Volumenviskosität η_v . Letztere wird meist vernachlässigt. Das Strukturmodell und die Deformationscharakteristik dieses Körpers zeigte ich Ihnen ebenfalls schon im Bild.

2.1.3 Die rheologischen Körper im engeren Sinne.

Durch eine Kombination der Gleichungen für den Hooke'schen Körper und die Newton'sche Flüssigkeit (Auflösung nach e_o und Addition) erhält man einen rheologischen

Art kombinieren. Als *Kelvin'schen festen Körper* bezeichnet man ein Material mit der charakteristischen Eigenschaft der *elastischen Nachwirkung*. Sein Strukturmodell und seine Deformationscharakteristik hatte ich Ihnen ebenfalls schon in einem früheren Bild gezeigt.

Tabelle 2. - DAS SYSTEM DER LINEAREN KÖRPER (NACH REINER).

Bezeichnung des Materiales	fest		Allgemeiner linearer Körper	flüssig	
	Klassische Körper aus Tabelle 4	Kelvin		Maxwell	Klassische Körper aus Tabelle 4
Deviationskomponente der rheologischen Gleichung		$p_o = 2\gamma e_o + 2\eta \dot{e}_{s_o}$	$\vartheta_o + a_1 e_o + a_2 \dot{e}_o + a_3 p_o + a_4 \dot{p}_o = 0$ ($p_o = \vartheta$ St. Venant-Körper)	$\dot{e}_o = -\frac{p_o}{2\gamma_e} + \frac{\dot{p}_o}{2\eta}$	
Fundamentalkonstanten		γ $\leftarrow \eta_s$	$\vartheta_o, a_1, a_2, a_3, a_4$	$\gamma_e \rightarrow \infty$ η	
Abgeleitete Konstanten		$\epsilon = 3\gamma$ $\leftarrow \lambda_s^* = 3\eta_s$		$\epsilon_e = 3\gamma_e$ $\lambda^* = 3\eta$ $\tau = \eta/\gamma_e$	

$\vartheta =$ Nachgebesspannung

Körper im engeren Sinne, die sogenannte *Maxwell'sche Flüssigkeit*. Diese Flüssigkeit zeigt die charakteristische Eigenschaft der *Relaxation*, d. h. der allmählichen Abnahme der Spannung bei konstanter Deformation.

Für die Erdkruste bedeutet das, beim Vorhandensein einer Maxwell-Komponente, dass die durch Blockierung der Herdverschiebung aufgespeicherten Spannungen, teilweise durch Relaxation abgebaut werden können. Ich erwähnte schon, dass dieser Faktor in die Deformationscharakteristiken aus Erdbebenmagnituden mit eingeht.

Man kann die rheologischen Gleichungen für den Hooke'schen Körper und die Newton'sche Flüssigkeit noch in einer anderen

Die Charakteristik der Tiefenbeben von Tonga-Kermadec hatte uns gezeigt, dass sich die Erdkruste bei Annahme eines im Herd wirkenden Kräftepaars mit Moment, für Zeiten in der Grössenordnung von 25 Jahren wie ein Kelvin'scher fester Körper verhält, also durch die in der Tabelle angegebene Gleichung mathematisch beschrieben werden kann.

Eine Verallgemeinerung der rheologischen Gleichungen stammt von Hohenemser und Prager (1932):

$$\vartheta_v + a_1 e_o + a_2 \dot{e}_o + a_3 p_o + a_4 \dot{p}_o = 0.$$

Sie umfasst alle bisher besprochenen rheologischen Gleichungen und darüber

hinaus noch einige, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden kann. α_1 bis α_4 sind die rheologischen Koeffizienten (η und η_s , γ und γ_e). Wenn sie wie bisher konstant sind, so spricht man von *linearen oder speziellen* Körpern. Meist sind sie jedoch bei den *allgemeinen Körpern* mit dem Spannungs- oder Deformationszustand variabel. Das ϑ_0 in der Gleichung von Hohenemser und Prager bedeutet die *St. Venant-Nach-*

das Studium des Herdvorganges tektonischer Erdbeben eine wichtige Rolle. Es ist bei bekanntem Herdmechanismus möglich, Deformationscharakteristiken für die Erdkruste zu gewinnen, die wiederum die Grundlage für vereinfachte Strukturtheorien bilden. Exakte Strukturtheorien erfordern die Einbeziehung noch anderer, seismischer und geologischer Daten, wodurch die Problemstellung zur Zeit noch zu

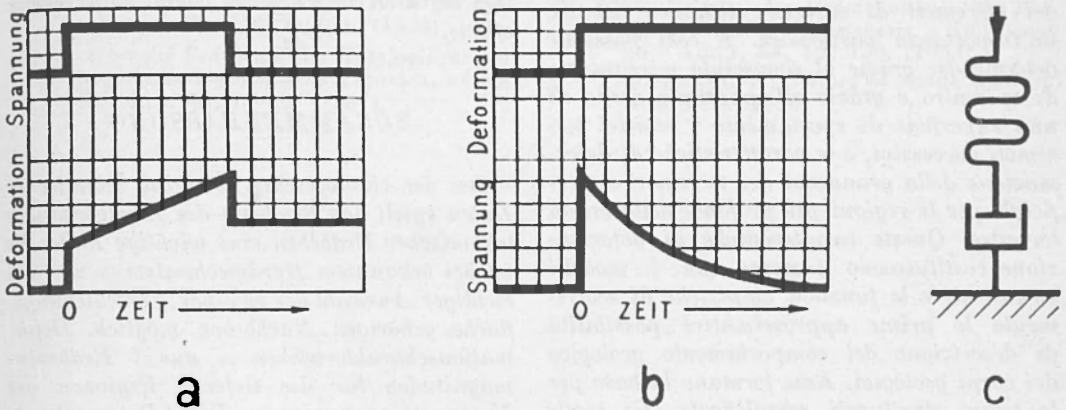


Abb. 7 - a) Deformationscharakteristik. — b) Relaxationskurve. — c) Strukturmodell für die Maxwell'sche Flüssigkeit.

gebesspannung, weil die meisten Körper, wie auch die Erdkruste, die man für kleine Spannungen als festen Körper ansehen kann, anfangen nachzugeben und plastisch zu fließen, wenn eine gewisse Spannung, eben diese Nachgebesspannung, erreicht ist. Der Spezialfall $p_0 = \vartheta$ ist die rheologische Gleichung für den *St. Venant-Körper*.

Wenn die Nachgebesspannung verschwindet, so hat man die Klasse der Flüssigkeiten. Die Materialien, bei denen die Spannung, die einen Bruch bewirkt, vor dem Nachgebepunkt erreicht wird, bilden die Klasse der *spröden* festen Körper. Im umgekehrten Falle spricht man von *plastischen* Körpern.

3. - SCHLUSSBEMERKUNGEN.

Mein Vortrag sollte Ihnen die Möglichkeiten der rheologischen Deutung seismischer Daten aufzeigen. Bei dieser Deutung spielt

kompliziert wird. Aber auch die aus Erdbebenmagnituden gewonnenen Deformationscharakteristiken sind noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Es empfiehlt sich zur Überwindung dieser Fehlerquellen:

1. die instrumentelle Magnitudenskala so weiter zu entwickeln, dass die von ihr gelieferten Energiewerte als gesichert angesehen werden können.
2. die Lösungen für die Herdvorgänge durch Auswertung der ersten Einsätze der Transversalwellen eindeutig zu machen.
3. die Parameter der Herdverschiebungen (Lage der Verschiebungsfläche, Betrag und Richtung des Verschiebungsvektors) mit Hilfe der stereographischen Projektion zur statistischen Ermittlung zusammengehöriger Beben heranzuziehen.

Wenn auch die rheologische Deutung der seismischen Messergebnisse noch am An-

fang stellt, so verspricht sie doch für die Zukunft, dem Geologen ein umfangreiches Tatsachenmaterial zu liefern, das ihn davor bewahrt, falsche Anschauungen über die Dynamik der Erdkruste zu entwickeln.

RIASSUNTO

Grazie alla interpretazione reologica dei dati sismici, lo studio dell'andamento di epicentro dei terremoti di carattere tettonico assume un'importanza particolare. È così possibile determinare grazie al conosciuto meccanismo di epicentro e grazie all'opportuna scelta di una superficie di spostamento i relativi terremoti successivi, e le caratteristiche di deformazione della grandezza dei terremoti superficiali per le regioni più profonde della crosta terrestre. Queste caratteristiche di deformazione costituiscono insieme con i modelli strutturali e le funzioni empiriche di scorrimento le prime approssimative possibilità di descrizione del comportamento geologico dei corpi geologici. Esse formano la base per le teorie strutturali semplificate. Le esatte teorie strutturali necessitano l'apporto di ancora altri dati sismici e geologici, con il che la impostazione del problema viene, per il momento, ancora complicata. La valutazione finora fatta dei risultati delle misure sismologiche mostra che la crosta terrestre, in un periodo di venticinque anni, fino alla profondità di circa 700 km, si comporta come un corpo solido di Kelvin con effetti elastici.

ABSTRACT

Thanks to the rheological interpretation of seismic data, the study of the trends of epicentres in earthquakes of tectonic character is acquiring particular importance. In this manner, owing to the known mechanism of the epicentre and to a suitable choice of the surface of shifting, it becomes possible to determine the subsequent earthquakes involved and the features of the deformation of the size of superficial earthquakes in the deeper regions of the earth's crust. These deformation features, together with the structural models and empirical functions of shifting, constitute

the first approximate possibility of describing the geological behaviour of geological bodies. They constitute bases for simplified structural theories. Exact structural theories require the contribution of other seismic and geological data, and, thus, the posing up of the problem is still complex. The study of the results of seismic measurements, carried out so far, has shown that the crust of the earth, during the past 25 years, and to the depth of about 700 kilometres, has been behaving as a Kelvin's solid body with elastic effects.

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der rheologischen Deutung seismischer Daten spielt das Studium des Herdvorganges tektonischer Erdbeben eine wichtige Rolle. Es ist bei bekanntem Herdmechanismus und bei richtiger Auswahl der zu einer Verschiebungsfläche gehörigen Nachbarbeben möglich, Deformationscharakteristiken aus Erdbebenmagnituden für die tieferen Regionen der Erdkruste zu gewinnen. Diese Deformationscharakteristiken sind zusammen mit Strukturmodellen und empirischen Kriechfunktionen die erste angenäherte Möglichkeit zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens geologischer Körper. Sie bilden die Grundlage für vereinfachte Strukturtheorien. Exakte Strukturtheorien erfordern die Einbeziehung noch anderer seismischer und geologischer Daten, wodurch die Problemstellung zur Zeit noch zu kompliziert wird. Die bisherige Auswertung seismologischer Messergebnisse zeigt, dass sich die Erdkruste bis ca. 700 km Tiefe in einem Zeitintervall von 25 Jahren wie ein Kelvin'scher fester Körper mit elastischer Nachwirkung verhält.

LITERATUR

- (1) BENIOFF, II., *Orogenesis and deep crustal structure—additional evidence from seismology.* « Bull. Geol. Soc. Am. », 65, 5, 385-400, (1954). (Dt. Übers.: Bergakademie 11 und 12, 488-495 und 542-546) (1954).
- (2) — *Earthquakes and rock creep.* « Bull. Seism. Soc. Am. », 41, 1, 31-62 (1951).

- (3) GRIGGS, D., *Creep of rocks*. « Journ. Geol. », 47, 225-251, (1939).
- (4) GUTENBERG, B.-RICHTER, C., *Earthquake magnitude intensity, energy and acceleration*. « Bull. Seism. Soc. Am. », 32, 163-191, (1942).
- (5) HENCKY, H., *Zur Theorie plastischer Deformation und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen*. « Ztschr. f. angew. Math. u. Mech. », 4, 323-334, (1924).
- (6) HIERSEMANN, L., *Geologisch-geophysikalische Theorien über den Aufbau und die Dynamik der Erdkruste*. « Freiburger Forschungsheft C 24 », 154, (1954).
- (7) — *Über die Bedeutung der Rheologie für geophysikalisch-geologische Theorien*. « Geol. Rdsch. », 46, 69-86, (1957).
- (8) — *Die neuen Erkenntnisse über den Herdvorgang bei grossen Erdbeben und ihre Bedeutung für die Geotektonik*. (Zusammenfassendes Referat). « Bergakademie », 5, (1958).
- (9) HOHENEMSER, K.-PRAGER, W., *Fundamental equations and definitions concerning the mechanics of isotropic continua*. « J. Rheol. », 3, 16-22, (1932).
- (10) NADAI, A., *Theory of flow and fracture of solids*. New York (1950).
- (11) REINER, M., *Twelve lectures on theoretical Rheology*. Amsterdam (1949).
- (12) SCHEIDEGGER, A., *Examination of the physics of theories of orogenesis*. « Bull. Geol. Soc. Am. », 64, 127-150, (1953).
- (13) TIMOSHENKO, S., *Theory of elastic stability*. New York, 1936.