

Gefügeregelung, Druckschieferung und Druckverformung von Gesteinen

Autor(en): **Sonder, Richard A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen
= Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie**

Band (Jahr): **28 (1948)**

Heft 1: **Festschrift P. Niggli zu seinem 60. Geburtstag den 26. Juni 1948**

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-23047>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Gefügeregelung, Druckschieferung und Druckverformung von Gesteinen

Von *Richard A. Sonder*, Oberrieden-Zürich

Summary

The elastic anisotropy of crystalline schists is described. A detailed series of investigations on this subject made by the Swiss Institute for Testing Materials, Zürich is here published for the first time, by kind permission of the Syndicate of the Urseren hydroelectric power development. The problems of orientated fabrics, schistosity and deformation possibilities of rocks are discussed. The conclusions are recapitulated at the end in English.

Zusammenfassung

Zuerst wird die Erscheinung der elastischen Anisotropie von metamorphen Gesteinen besprochen. Es kann eine neue sehr schöne Versuchsserie hier erstmalig publiziert werden über solche Untersuchungen an Schweizer Gesteinen aus dem Gotthardgebiet, welche an der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt in Zürich durchgeführt worden sind. Dank dem Entgegenkommen des Studiensyndikates der Urseren Kraftwerke, in deren Auftrag diese Untersuchung gemacht wurde, kann das Ergebnis hier publiziert werden, was umso erfreulicher ist, als bisher wenig Material zu diesen Fragen vorliegt und diese Untersuchungen besonders detailliert sind. Es sei hier dem Studiensyndikat bestens gedankt, dass es die Daten zur Publikation in dieser Festschrift zur Verfügung stellte. Ebenso möchte ich Herrn HALLER von der EMPA, unter dessen Aufsicht die Untersuchungen durchgeführt wurden, danken für die zusätzlichen Erklärungen.

Im weiteren Text werden andere Daten zusammengestellt, welche auf dieses Problem Bezug haben und speziell die Ursachen der Regelung und die Möglichkeiten der Gesteinsverformung unter dem Gebirgsdruck untersuchen. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in 8 Schlussfolgerungen zusammengefasst, welche sich am Schlusse der Arbeit finden.

Die elastische Anisotropie von kristallinen Schiefen

Die Gefügeregelung und ihre weite Verbreitung bei den Gesteinen ist schon lange bekannt. Sie wurde bisher kaum mit den elastischen Eigenschaften der Kristalle in Zusammenhang gebracht, son-

dern mehr mit Verformungsbewegungen unter Druck, sowie internen Scherungen in den gesteinsbildenden Kristallen. Ich habe in einer früheren Arbeit (SONDER 1933) die Bedeutung der elastischen Anisotropie der Gesteinskristalle hervorgehoben, die sich geltend machen muss, sobald ein Gestein unter gerichteten Druck kommt und irgendwie verformt wird. Die seinerzeitigen Überlegungen ergaben, dass unter einer gerichteten Spannung die Tendenz bestehen muss zu einer Einregelung der Kristalle auf das Druckfeld aus elastischen Gründen. Dabei wird sich die Richtung des kleinsten Elastizitätsmoduls im Kristall, d. h. also die Achse der grössten Kompressibilität, dem Drucke parallel zu stellen trachten. Aktive Impulse, welche eine Auswirkung dieser Regelungstendenz möglich machen, können bei einer aktiven Verformung (Mylonitisierung) des Gesteins auftreten oder aber auch im Falle einer Rekristallisation im Druckfelde. (Auf Einzelheiten des Prinzips sei hier nicht mehr eingetreten, sondern auf die zitierte Arbeit verwiesen.) Druckmetamorphe Gesteine müssen also elastisch anisotrop sein. Es war mir 1933 nicht möglich, mehr als zwei Beispiele in der Literatur zu finden, welche auf die Elastizitätsverhältnisse senkrecht zur Schieferung und in der Schieferungsebene Bezug nahmen. Seither sind weitere Beispiele bekannt geworden, so dass eine erneute Betrachtung erwünscht ist, welche auf viel konkretere Tatsachen aufbauen kann.

ZISMAN (1933) hat von verschiedenen Gesteinen Proben in senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen entnommen und sie auf deren Elastizität untersucht. Es hat sich dabei ergeben, dass die Elastizitätsmodule in richtungslosen Gesteinen gewissen Schwankungen unterworfen sind und auch von Ort zu Ort etwas verschiedene Elastizitätsmodule auftreten können. Sehr gross wurden die lokalen richtungsbedingten Elastizitätsunterschiede, sobald Gesteine mit deutlicher metamorpher Schieferung auftraten. Es stellte sich dabei heraus, dass senkrecht zur Schieferung die kleinsten Elastizitätsmodule zu beobachten waren, eine Tatsache, welche in Übereinstimmung steht mit den Feststellungen an den zwei druckgeschiefereten Gesteinen, welche in meiner ersten Arbeit erwähnt wurden. In der Schieferungsebene fanden sich wesentlich höhere Module, welche unter sich gewisse Unterschiede zeigen. In der nachstehenden Ta-

Gestein	E in kg/mm ² (Spannung ca. 10 kg/cm ²)	
	⊥ zur Schieferung	zur Schieferung
Gneis von Pelham	440	1450 1720
Marmor, Vermont	2360	3920 3500

belle sind zwei solche Messungsbeispiele von ZISMAN zusammengestellt. IDE (1936) hat die gleichen Messungen mit dynamischen Bestimmungsmethoden wiederholt und sie bestätigt bis in einem Fall, wo auch senkrecht zur Schieferung des Gneises von PELHAM ein hoher Modul gefunden wurde. Ich möchte annehmen, dass ZISMANS Bestimmungen richtig sind und das eine abweichende Ergebnis IDEs möglicherweise mit der dynamischen Messmethode zusammenhängt.

BIRCH (1942) gibt eine ausführliche Zusammenstellung von Elastizitätsmessungen an Gesteinen. Es figurieren darunter noch einige andere Beispiele von elastischer Anisotropie von Sandsteinen und Kalksteinen. Immer wurde gefunden, dass der kleinere Elastizitätsmodul senkrecht zur Schichtung steht. Angesichts dieses immer noch beschränkten Untersuchungsmaterials ist es darum umso willkommener, dass ich nachstehend dank dem Entgegenkommen des Studiensyndikates der Urseren Kraftwerke (siehe einleitende Zusammenfassung) die Ergebnisse einer weiteren Untersuchungsserie an Schweizergesteinen veröffentlichen kann, welche ebenfalls die Regel bestätigen, dass senkrecht zur Schieferung der kleinste Modul auftritt. Interessanterweise wurden auch Messungen unter Winkeln zur Schieferung gemacht, so dass man noch besser als bisher über die richtungsbedingten Elastizitätsverhältnisse von kristallinen Schiefen unterrichtet ist.

Die Versuchsergebnisse der EMPA sind in der beigegebenen Tabelle zusammengestellt, ebenso gibt die Tafel einige der Untersuchungsdiagramme wieder.

Der untersuchte Aaregranit ist ein deutlich geschieferter Granitgneis, welcher an den Probekörpern ziemlich homogen erscheint. Obwohl die Proben von verschiedenen Stellen stammen, dürften sich die Ergebnisse vergleichen lassen und über die elastische Anisotropie längs und quer zur Schieferung gut orientieren. Eine Entscheidung, ob innerhalb der Schieferungsebene verschiedene Elastizitätsrichtungen auftreten, kann weder beim Aaregranitgneis noch beim Urserenigneis an Hand der vorliegenden Resultate getroffen werden, weil bei der Entnahme der Proben darauf nicht geachtet worden ist. Eine Anisotropie ist aber auch hier denkbar, weil in beiden Gesteinen eine leichte Differenzierung der Richtung innerhalb der Schieferungsebene im makroskopischen Bild angedeutet ist. Es wäre jedenfalls interessant und wohl auch nötig zur exakten Definition der Elastizitätsverhältnisse in druckmetamorphen Gesteinen, dass die Proben im Felde nach den drei möglichen Strukturrichtungen entnommen werden.

Tabelle der Versuchsergebnisse der EMPA, Zürich, an Gneisen aus dem Urserengebiet (Gotthardgebiet)

Gesteinsart und Winkel der Modulrichtung zur Schieferungsebene	spez. Gew. s	E kg/mm ²	M	kg cm ²		Wasser Gew. %	Schieferung
				β b	w β d		
<i>Aaregranitgneis</i>							
Nr.							
90° 163	2,76	1430	13,7	55,5	2132	0,44	gut
164	2,74	1460	18,4	55,0	2095	0,43	„
		1442	17,9	56,0	2132		
165	2,75	1353	34,1	46,6	2266	0,41	„
		1387	23,9	45,6	2458		
42° 167	2,74	2050	16,3	77,4	1962	0,39	„
41° 168	2,75	2870	8,4	80,9	2028	0,40	„
		1745	13,6	79,8	2019		
31° 166	2,75	2100	9,2	86,1	2141	0,46	„
0° 161	2,72	2505	8,3 l	138,0	1816	0,44	
162	2,71	2520	9,3 l	148,2	1836	0,45	
<i>Urserengneis</i>							
90° 346	2,72	1935	15,5	31,2	1559	0,36	gut
347	2,68	1930	15,5	25,4	1605	0,38	„
70° 350	2,68	1450	47*)	26,2	1605	0,33	leicht
		1505	18*)	30,7	1576		
35° 348	2,66	2715	-132*)	136,5	1466	0,37	„
		3015	12*)	144,5	1465		
25° 349	2,68	2910	70	141,3	1783	0,65	„
0° 339	2,68	3320	12,5 l	137,0 h	1542	0,41	„
340	2,75	4030	11,5 l	162,6 v	1258	0,38	gut
341	2,65	3190	22 l	147,4 h	1161	0,43	leicht
342	2,75	3480	16 l	163,2 v	1060	0,37	„
345	2,68	3020	22 l	97,1 v	1248	0,38	gut
343	2,68	4100	3,9 q	160,4 h	1188	0,41	leicht
344	2,72	4000	2,4 q	163,3 v	1210	0,34	„
171	2,72	3170	2,72*)	134,7 v	1508	0,63	schwach
		3000	7,94*)	143,9 v	1597		
172	2,67	3760	8,58	182,0 h	1486	0,38	
? 169	2,74	2624	10,95	110,2	2097	0,40	massig
170	2,75	2590	7,60	116,5	2160	0,38	„

Bemerkungen.

Nr. . . . Die angeführten Nr. sind die Nummern der Versuchsproben.

 E Elastizitätsmodul im Druckbereiche 205—5 kg/cm². (Nr. 340 105—5 kg/cm².)

- M Poisson'sche Zahl (Längsstauchung durch Querdehnung). (Querdehnung l in Schieferungsebene, q quer zur Schieferung.)
- βb Biegefestigkeit, (h Biegerichtung senkrecht, v parallel zur Schieferung) in kg/cm^2 . Biegeprismen wie Druckprismen orientiert.
- $w\beta b$ Würfeldruckfestigkeit in kg/cm^2 .
- Wasseraufnahme in Gewichtsprozenten nach Evakuieren und Lagerung von 90 Tagen in Wasser.

*) Soweit 2 Messungen gemacht wurden, wurde die 2. nach der ersten aufgeführt. In den mit *) bezeichneten Fällen wurde dabei die Stellung der Querdehnung und Längsstauchungsapparate vertauscht, so dass die Querdehnung sich auf eine andere Orientierung zur Schieferung bezieht. Wo nichts bemerkt, ist eine solche Vertauschung fraglich.

Der Urserengneis ist ein saurer Gneis vom Typus der Injektionsgneise, möglicherweise ein sogenannter Paragneis, der z. T. grosse Feldspatauge enthält. Da er in Struktur und lokaler Zusammensetzung nicht ganz so einheitlich ist wie der Aaregranitgneis und die Proben von verschiedenen Lokalitäten stammen, so ist eine etwas stärkere Streuung der Elastizitätswerte zu erwarten. Wenn also hier in einem etwas schiefen Winkel zur Schieferung der niedrigste Modul gemessen wurde, so will dies noch nicht heissen, dass der niedrigste Modul nicht doch senkrecht zur Schieferung steht. Oft ist die strukturelle Richtung in den geschnittenen Stücken nicht sehr deutlich zu erkennen.

Die Resultate bestätigen auf alle Fälle, dass der geringste Elastizitätsmodul annähernd senkrecht zur Schieferung liegt. Ebenso hat das Gestein in dieser Richtung die grössere Festigkeit. In der Schieferungsrichtung liegen die grössten gemessenen Module. Die Messungen wurden an rechteckigen Prismen von $16 \times 16 \times 36$ cm Kantenlänge durchgeführt, wobei jeweils die Längsstauchung als auch die Querdehnung an zwei einander entgegengesetzten Prismenseiten gemessen wurden. Diese beiden Messungen, welche voneinander manchmal merklich abwichen, wurden zur Ermittlung der angeführten Module verwendet. Die Tafel gibt Beispiele für einzelne Messungsergebnisse. Manchmal wurden auch an der gleichen Probe zwei Messungen durchgeführt. In einem Falle (Aaregranit Nr. 168) ist der Unterschied der Resultate sehr gross beim E-Modul. Es mag dies mit der Auslösung innerer Spannungen zusammenhängen und es sind solche Unregelmässigkeiten ja immer wieder bei Gesteinsuntersuchungen zu beobachten.

Die elastische Anisotropie muss sich auch in der Querdehnung auswirken. Die Poisson'sche Zahl muss ganz verschieden ausfallen je nach der Richtung, in der man misst. Diese Tatsache erklärt die

in der Tabelle auftretenden stark variierenden Poisson'schen Zahlen. Besonders gross müssen diese Unterschiede werden, wenn man die Proben längs der Schieferung staucht und die Querdilatation in der Schieferungsebene (l) und quer zur Schieferungsrichtung (q) misst. In der Tabelle finden sich die Fälle durch die Symbole l und q markiert, und man sieht, dass die q-Werte viel kleiner sind als die l-Werte. Immerhin traten bei den untersuchten Gneisen noch zusätzliche Komplikationen auf und zwar vorzugsweise dann, wenn der Druck mehr oder weniger senkrecht oder schief zur Schieferung erfolgte. Einige (nicht alle) Muster zeigten dann eine Querkontraktion. Das extremste Beispiel bietet der Urserengneis Nr. 348, dessen Verhalten durch ein Diagramm der Tafel illustriert wird. Die Untersucher von der EMPA nehmen an, dass hieran interne Spannungen Anteil haben.

Alle bisherigen Messungen der elastischen Anisotropie von druckmetamorphen Gesteinen bestätigen somit:

1. Druckmetamorphe Gesteine sind elastisch stark anisotrop.
2. Der kleinste Elastizitätsmodul steht immer senkrecht zur Schieferung. In der Schieferungsebene liegen die höchsten Elastizitätsmodule des Gesteins. Schief zur Schieferung findet man Zwischenwerte.
3. Die Unterschiede in den Modulen sind so gross (häufig 1:2 bis 1:3), dass sie normalerweise den Elastizitätsunterschieden entsprechen, oder dieselben noch übertreffen, welche bei Kristallen in den verschiedenen Richtungen auftreten (Angaben siehe SONDER 1933). Man kann deshalb annehmen, dass die vorhandene Regelung der Kristalle so ist, dass die Kristallachsen mit dem grössten Elastizitätsmodul vorzugsweise in der Schieferungsebene liegen *).

Ältere Autoren neigten, vermutlich mehr gefühlsmässig, zu der Ansicht, dass bei druckgeschieferten Gesteinen der die Schieferung erzeugende Druck senkrecht zur Schieferung gestanden habe. Manche Beobachtungen, wie z. B. die steilstehende Schieferung der alpinen Zentralmassive könnten eine solche Auffassung unterstützen. Später wurde das geologisch-tektonische Denken immer mehr beherrscht von der Vorstellung einer mechanisch-plastischen Verformung der Gesteine unter dem gerichteten gebirgsbildenden Drucke. Damit würde

*) Ist ein Körper aus Lamellen aufgebaut, welche einen verschiedenen Elastizitätsmodul besitzen, so ist derselbe senkrecht zur Lamellierung stärker kompressibel als parallel der Lamellierung. Dieses Prinzip kann aber kaum zur Erklärung der elastischen Anisotropie der kristallinen Schiefer beigezogen werden, weil die resultierenden Unterschiede im mittleren Modul in den beiden Richtungen bei einem solchen Lamellenbau nicht sehr gross sind. Selbst wenn der Elastizitätsmodul der beiden Stoffe sich wie 1:2 verhält, so wäre das Verhältnis der mittleren Richtungsmodüle nur 1:1,125.

die Vorstellung herrschend, dass die Schieferung in erster Linie auf Bewegungs- und Schervorgänge im Gesteine zurückzuführen sei und deshalb vermutlich sich in einem Winkel von ungefähr 45° zum gebirgsbildenden Drucke ausgebildet habe. Dieser Auffassung habe ich 1933 die These entgegengestellt, dass das massgebende Regelungsprinzip durch die elastische Anisotropie der Einzelkristalle gegeben sei. Theoretische Überlegungen sprechen dann dafür, dass die Richtung des regelnden Druckes in den metamorphen Produkten durch die Orientierung des geringsten Elastizitätsmoduls angezeigt ist. Gemäss den beobachtbaren Elastizitätsrichtungen kommt man so wieder zurück zur Auffassung, dass der Druck senkrecht zur Schieferung stand. Die Anhänger der Scherschieferungslehre können nun allerdings einwenden, dass mit den Elastizitätsrichtungen nichts erwiesen ist, weil aus kristallographischen Gründen senkrecht zur grössten Kompressibilität auch Ebenen leichter Schermöglichkeiten liegen. Die feststellbare elastische Anisotropie verstösst deshalb nicht gegen die Schertheorie.

Experimentelle Ergebnisse zur Regelungsfrage

Ich glaube nicht, dass man unbedingt zwischen der einen oder andern Alternative entscheiden sollte. Vielleicht hat bald das eine, bald das andere Prinzip seine Berechtigung. Ziemlich aussichtslos scheint es mir jedoch, an Hand von petrographischen Regelungsfeststellungen eine Klärung zu suchen. Der die Regelung erzeugende Druck ist ja verschwunden und kaum eindeutig rekonstruierbar in seiner genauen Richtung. Viele Regelungsdiagramme, die wir in natürlichen Gesteinen finden, mögen nicht das Produkt einer eindeutigen Stressorientierung sein, da ja die Druckrichtung während der Metamorphose gewechselt haben kann. Es kann deshalb wohl nur die experimentell theoretische Forschung den ganzen Fragenkomplex eindeutiger abklären, und wir kennen bereits heute einige Experimente, welche wichtige Aufklärungen enthalten.

BRIDGMAN (1937) (siehe BIRCH 1942) untersuchte den internen Scherwiderstand verschiedener Silikate, so z. B. von Quarz in pulverisierter Form. Das Quarzpulver lag zwischen zwei Stahlscheiben, welche mit Drucken bis zu $50\,000\text{ kg/cm}^2$ aneinandergespreßt und gleichzeitig gegeneinander rotiert wurden. Nach dem Experiment zeigte sich eine vorzugsweise Einordnung der trigonalen Achsen der Quarze in die Ebene zwischen den Stahlscheiben. Längs der trigonalen Achse beträgt der Elastizitätsmodul des Quarzes

10 300, senkrecht dazu 7850 kg/mm². Ein rundes Korn, das mit der Achse in dieser Ebene liegt, kann nur mit Widerstand, d. h. unter Aufnahme einer höheren inneren Spannung sich so drehen, dass sich die Achse senkrecht zur Plattenebene, also parallel zum Drucke stellt. Die beobachtete Einregelung ist also an Hand der Elastizitätsverhältnisse der Körner ohne weiteres verständlich. Es dürfte schwieriger sein, diese Einregelung des Quarzes mit Schervorgängen zu erklären, weil die Festigkeit der Quarzkristalle nach anderweitigen Versuchen so gross ist, dass interne Scherungen längs bevorzugten Gleitebenen bei solchen Bedingungen kaum zu erwarten sind.

GRIGGS (1940) führte eine mechanische Stauchung eines geregelten Marmors durch. Vor der Stauchung lagen die optischen Achsen der Calcite vorzugsweise senkrecht zur Richtung des Stauchdruckes. Nach dem Experiment konnte eine ganz ausgesprochene Umregelung festgestellt werden, indem nun die optischen Achsen parallel zur Druckrichtung lagen. Parallel zur optischen Achse des Calcits hat man einen Elastizitätsmodul von 5840, senkrecht dazu von 8980 kg/mm². Dieses Experiment zeigt also ganz eindeutig eine Einregelung der Achsen der grössten Kompressibilität parallel zur Stauchrichtung, in Bestätigung naheliegender theoretischer Überlegungen. (Näheres siehe SONDER 1933). Man kann in diesem Zusammenhang auch darauf hinweisen, dass die Elastizitätsunterschiede des Calcits sich ungefähr wie 1:1,5 verhalten und damit ungefähr gleich sind wie die experimentell gemessenen Elastizitätsunterschiede des druckgeregelten Marmors von Vermont (siehe S. 363).

Bei den Verformungsversuchen von Gesteinen zeigen sich kataklastische Erscheinungen. In dieser Hinsicht sind die Resultate der Experimente nicht vergleichbar mit der Struktur metamorpher Gesteine, welche wohl am besten als Kristallisationsschieferung charakterisiert werden kann. Es scheint dabei eine Rekristallisation unter Druck eingetreten zu sein.

Ich hatte vor einigen Jahren Gelegenheit, an der Columbia Universität New York die Demonstration eines Filmes zu sehen, welcher die Deformierung von Eis unter polarisiertem Licht zeigte. Leider ist mir der Name des Autors entfallen. Das Experiment ist aber von Bedeutung für die hier diskutierten Fragen, so dass ich es kurz beschreiben will. Unter dem polarisierten Lichte liessen sich die einzelnen Kristallindividuen gut erkennen. Sie stellten vor der Deformierung ein unregelmäßiges Gefüge dar. Während des Deforma-

tionsvorganges liess sich beobachten, wie einzelne Kristalle erhalten blieben oder wuchsen auf Kosten von andern, welche sich verkleinerten und teilweise ganz aufgezehrt wurden. Nach der Deformation lag ein geregeltes, also gewissermassen ein metamorphes Eis vor. Der Experimentator konnte nicht genau angeben, ob die kristallographischen Achsen, welche sich dabei parallel zum Drucke stellten, auch die Achsen der grössten Kompressibilität des Eises waren, glaubte aber, dass dies gemäss den Strukturverhältnissen der Eiskristalle wahrscheinlich sei. Theoretisch ist nach der hier vertretenen Regelungstheorie anzunehmen, dass diejenigen Kristalle aufgelöst wurden, welche die geringere Kompressibilität zur Druckrichtung zeigten, weil sie dadurch automatisch unter höheren Druck gerieten und so schmelzen mussten. Natürlich konnte das Schmelzwasser sofort wieder an den Nachbarkristallen anderer Orientierung kristallisieren.

Eine direkte Parallele zu der Rekristallisation und zur Metamorphose von Gesteinen ist bei diesem Beispiel insofern nicht ganz möglich, als die metamorphe Regelung der Gesteine sich häufig weit unter Schmelztemperaturen vollzogen haben muss. Es ist vielleicht denkbar, dass bei erhöhten Temperaturen und unter hohen Druck- und Spannungszuständen eine Umlagerung zwischen benachbarten festen Phasen eintreten könnte. Man wird dabei an die neueren Erfahrungen von Pulverreaktionen unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen denken (HEDVALL).

Allerdings kann die Petrographie ohne eine solche Annahme auskommen, indem ja schon lange angenommen wurde, dass bei den metamorphen Rekristallisationen der Austausch der kristallinen Phasen über eine vermittelnde flüssige Phase erfolgt ist, welche in Form der Gesteinsfeuchtigkeit vorhanden sein kann. Nach dem RIECKE'schen Prinzip, muss eine vorhandene flüssige Phase Kristallsubstanz an Druckstellen lösen und im Druckschatten wieder absetzen. Nun ist klar, dass bei Pressung des Gesteins diejenigen Kristalle, welche der Druckrichtung die Achse der geringsten Kompressibilität entgegenstellen, mehr Druck aufnehmen müssen als die Nachbarn, welche eine andere kristallographische Orientierung zum Stress haben und somit im Druckschatten stehen. Das Resultat einer Rekristallisation unter Druck, gleichgültig wie der genaue Mechanismus ist, wird dahin tendieren, dass sich das innere Spannungsfeld möglichst homogenisiert. Die Kristalle mit ungünstiger Orientierung lösen sich auf, und die Substanz lagert sich an Kristallkeimen besserer Orientierung an. Sie wird so in eine gleichsinnige elastische

Orientierung eingeregelt, welche dem Stresse vorzugsweise die Achse der grössten Kompressibilität entgegenstellt. Eine Rekristallisation eines Kristallaggregates unter Druck muss also gleichsinnige Regelungstendenzen verfolgen wie eine Kornregelung unter mechanischer Verformung, wobei das Gestein mylonitisiert wird und intergranularen Bewegungsprozessen unterliegt.

Die bisherigen Experimente an kristallinen Silikatgesteinen haben gezeigt, dass die plastische Deformationslehre von Gesteinen unrichtig ist, soweit sie behauptet hat, der Tiefendruck setze die Festigkeit der Gesteine herab und bringe sie in einen plastischen Zustand. Die Experimente von v. KARMÁN, ADAMS, GRIGGS und anderen haben klar erwiesen, dass das genaue Gegenteil der Fall ist. Die innere Festigkeit der Gesteine wird durch den Tiefendruck gewaltig heraufgesetzt. Während an der Oberfläche Gesteine unter 1000—2000 kg/cm² Druck zerbrechen, kann eine Verformung kristalliner Silikatgesteine in Tiefen von 10 km und mehr anscheinend nur mit zusätzlichen gerichteten Druckspannungen von 10 000 kg/cm² und mehr erreicht werden. Man kann nicht einmal behaupten, dass solche Bedingungen die Gesteine plastisch verformbar machen, wenn man darunter versteht, dass auch die Einzelkristalle unter dem Drucke sich verformen und fliessen. Die Verformungsexperimente an Silikatgesteinen zeigten durchwegs Mylonitisierungen der Gesteinsstruktur, wobei die einzelnen Kristalle zersplitterten, aber nicht innerlich flossen. Die Gesteinskörner bewegten sich bei der Verformung gegeneinander.

Bezeichnend für die internen Festigkeitsverhältnisse der gesteinsbildenden Silikatkristalle dürfte das Festigkeitsdiagramm von Quarz sein (Fig. 1), welches klar und eindeutig zeigt, dass von einer plastischen Verformbarkeit von Quarzkristallen unter Druckbedingungen, wie sie in der Kruste vorkommen, nicht die Rede sein kann. Man kann also die Theorie der bruchlosen plastischen Verformung mit zunehmender Erdtiefe nur noch insofern aufrecht erhalten, als man das Eintreten der durchgängigen plastischen Verformbarkeit mit der steigenden Tiefentemperatur zu erklären sucht. Es ist anzunehmen, dass die steigende Temperatur Sprödigkeit und Festigkeit von Silikatkristallen allmählich herabsetzt. Die Schmelztemperaturen sind aber so hoch und die bereits heute schon experimentell erhärtete Festigkeit von Silikatmassen bei erhöhten Temperaturen so gross, dass man nicht annehmen kann, eine derartige Plastizität sei wesentlich in den obersten 20 km, ja vielleicht 30 km der Erdkruste. Viele, wenn nicht fast die meisten, der uns zugänglichen

metamorphen Gesteine wurden sicherlich innerhalb dieser oberen Krustenzonen metamorphisiert.

Man muss also für diese obere Gesteinszone von 20—30 km Mächtigkeit die alten Gedankengänge über eine mechanisch-plastische Verformung (dynamische Scherschieferung) aufgeben und nach gänzlich andern Erklärungswegen der Schieferungsstruktur suchen, welche eine Formumprägung durch Kristallisationsschieferung ist. Die Voraussetzungen einer mechanischen Fließverformung,

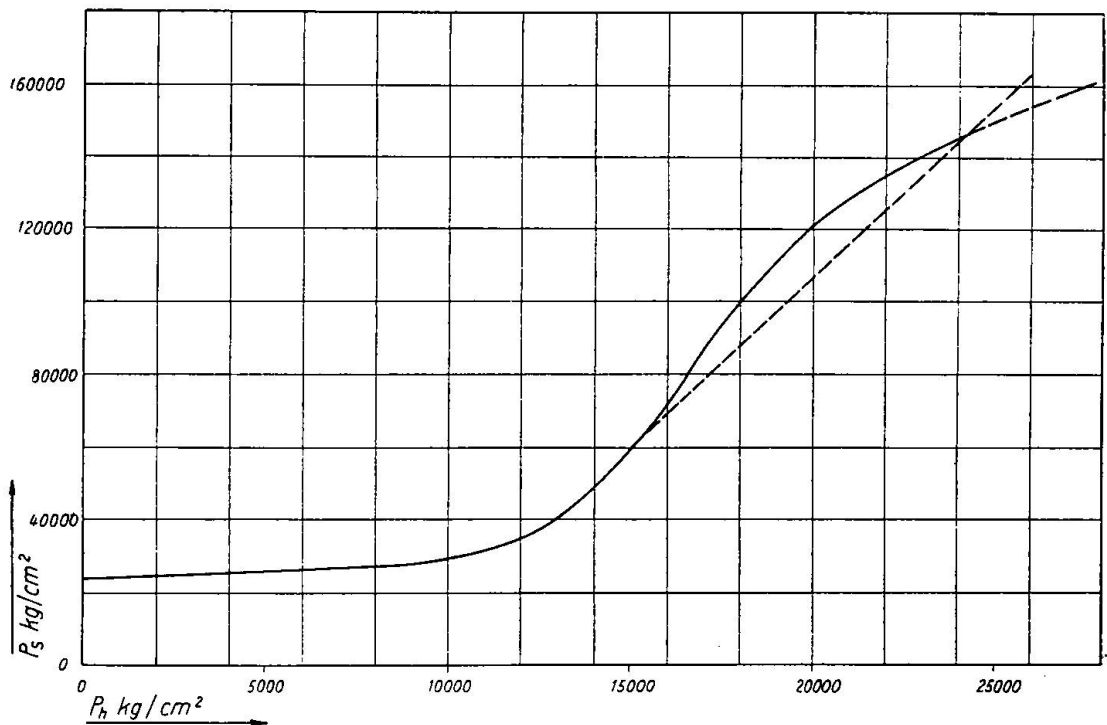


Fig. 1. Kurve der Bruchfestigkeit (P_s) von Quarzkristallen längs der c-Achse nach Experimenten von SOSMAN, GRIGGS und BRIDGMAN in Abhängigkeit vom hydrostatischen Umgebungsdruck (P_h). Die Kurve ist bei höheren Drucken nicht genau festgelegt (entweder ungefähr wie die ausgezogene Linie oder wie die gestrichelte Linie), weil die Messgenauigkeit in diesen Druckbereichen gering ist und die Resultate von verschiedenen Autoren stammen.

wobei die Schieferungsebene ca. 45° zum gerichteten Drucke steht, scheinen nach den experimentellen Ergebnissen in den meisten Fällen kaum vorhanden zu sein. Die aussichtsreichste Annahme ist anscheinend die Postulierung einer Rekristallisation im Spannungsfelde, wobei durch die dabei auftretenden Umlagerungen möglicherweise auch eine merkbare totale Verformung eintreten kann. Für

diese Auffassung ist es naheliegend, die alte These von der Rolle der Gesteinsfeuchtigkeit bei diesen Umlagerungen beizuziehen.

Das Ergebnis der Untersuchungen von GRIGGS (1938, 1940) über Verformungsmöglichkeiten von Gesteinen in Gegenwart einer wässrigen flüssigen Phase stützt diese These auch experimentell. GRIGGS stauchte Marmor unter einem Umgebungsdruck von 10 000 Atmosphären und bei einer Temperatur von 150°C zuerst trocken, dann umgeben von CO_2 -haltigem Wasser. Im ersten Falle benötigte die Stauchung einen zusätzlichen Stress von 8100 kg/cm^2 . Im zweiten Falle erfolgte die Verformung sehr viel leichter bei einem zusätzlichen Druck von nur 1500 kg/cm^2 . Es zeigte sich im zweiten Falle, dass die Struktur des verformten Körpers nicht die extremen Gleitungen, Verzwilligungen und mechanischen Verformungsanzeichen aufwies, welche für trockene Verformung typisch sind. Die Stauchung erfolgte unter gleichzeitiger Rekristallisation, so dass das Strukturbild der Originalstruktur eines Marmors ziemlich ähnlich war. Das Ausgangsmaterial besass ein geregeltes Gefüge, mit bevorzugter optischer Achsenrichtung parallel zum Druck. Darin trat durch die Stauchung keine Änderung ein, was auch nicht zu erwarten ist nach der hier vertretenen Regelungstheorie, da diese Achse die des kleinsten Elastizitätsmoduls ist. Auch für Quarz konnte GRIGGS nachweisen, dass bei einer Immersion des Untersuchungskristalles in Na_2CO_3 -haltigem Wasser von 400° und ca. 300 Atmosphären Druck die Festigkeit des Kristalles nachliess, so dass er nach einiger Zeit schon unter einem Stress von 4000 kg/cm^2 zerbrach.

Über den Mechanismus der Druckmetamorphose und der Gesteinsverformung

Obige Resultate machen es äusserst wahrscheinlich, dass bei Rekristallisationen unter Druck in den oberen 20–30 km der Erdkruste die vorhandene Gesteinsfeuchtigkeit eine merkliche Rolle spielt. Die mechanische Scher- und Verformungstheorie tritt eher zurück, weil bei Silikatkristallen interne Verformungsmöglichkeiten durch Drucke experimentell bisher kaum begründet werden konnten. Der Vorgang der Rekristallisation ist grundsätzlich und in seinem ganzen Mechanismus ein anderer als die mechanische Verformung, weshalb sich dabei ohne weiteres eine Schieferung senkrecht zum Drucke einstellen kann.

Neue wichtige Fragen treten auf, welche ich zum Schlusse hier nur kurz streifen kann. Man kann an Hand der gemachten Fest-

stellungen gewissermassen von einer Rekristallisationsplastizität der Gesteine sprechen. GRIIGS ist geneigt, diese als sehr gross anzunehmen und zwar auch für die Bedingungen der Erdkruste. Er hat deshalb die Ansicht vertreten, dass in der Erdkruste keine sehr hohen gerichteten Spannungen auftreten können und schätzte die Verformungsdrucke, welche Gesteinsmetamorphose erzeugen, sowie den gebirgsbildenden Druck im allgemeinen auf die Grössenordnung von ca. 1000 kg/cm². Ich glaube, dass hier ein Fehlschluss vorliegt, weil die Ergebnisse der GRIIGS'schen Untersuchungen über Rekristallisationsfluss mit reichlichem Lösungsmittel und den bestehenden grossen Möglichkeiten von Ausweichablagerungen ganz und gar nicht den Bedingungen entsprechen dürften, welche in der Erdkruste herrschen.

Im Prinzip wird der Tiefendruck die Gesteinsporen zu schliessen trachten, so dass der Feuchtigkeitsgehalt der Gesteine in grösseren Tiefen normalerweise minim bis vielleicht fast null ist, solange ein relativer Ruhezustand herrscht. Irgendwelche Zirkulationsmöglichkeiten der Gesteinsfeuchtigkeit sind kaum vorhanden. Entsteht nun in der Kruste aus irgendwelchen Ursachen ein wachsender einseitiger Stress, so wird bei Vorhandensein einer gewissen Feuchtigkeit das thermodynamische Phasengleichgewicht gestört werden. Es setzen lokale Umlagerungen und Rekristallisationen ein mit entsprechender Gefügeregelung, welche eine Homogenisierung des Spannungszustandes im Kristallverband anstrebt. Es dürfte sich sehr rasch ein neues Gleichgewicht einstellen, weil grössere Ausweichtransporte unmöglich sind. Vielleicht sind mit der Anpassung gewisse permanente Formänderungen von kleinerem Ausmasse anzunehmen (Ausweichen zur Druckrichtung). Es scheint aber ganz unwahrscheinlich, dass das Gestein unter solchen Umständen schon bei geringen Stressen in einen langsamen Dauerfliesszustand übergeht, welcher den Spannungsanstieg fortlaufend eliminiert. Im Gegenteil, das Gestein wird unter den Veränderungen druckfester und druckwiderstandsfähiger werden, wie dies auch an Experimenten erkannt werden kann. Durch einen einfachen Druckanstieg werden unter solchen Bedingungen auch kaum genügend Veränderungen sich einstellen können, dass schon ein ausgesprochener kristalliner Schiefer resultieren könnte.

Vermutlich wird der Druck solange ansteigen, bis die innere Festigkeit der Kristalle überschritten wird, so dass sie unter der Spannung zu springen anfangen. Das bildet dann den Beginn zur mechanischen Verformung durch Mylonitisierung, Ausbildung von

Scherungen usw. Es ist wahrscheinlich, dass die dazu nötigen Spannungen gleich hoch sind wie bei trockenen Deformationsexperimenten. Das heisst, dass in Tiefen von 10—20 km Stresse auftreten und auch geologisch lange gespeichert werden können, welche den Wert von $10\,000\text{ kg/cm}^2$ erreichen oder auch merklich übersteigen. Mit Erreichen der Festigkeitsgrenze und Eintreten von Mylonitisierungen und tektonischen Bewegungen verändert sich die Situation. Mit grösserer Gefügeunruhe erhält die allfällig vorhandene Gesteinsfeuchtigkeit grössere Zirkulationsmöglichkeiten. Zudem werden wässrige Lösungen, seien sie nun azzendierend von magmatischen Intrusionen oder deszendierend von der Erdoberfläche, in zunehmendem Masse in das durch die tektonische Unruhe gelockerte Porengefüge eindringen. Die Gesteinsfeuchtigkeit wird erhöht, resp. es tritt eine Durchfeuchtung durch Ansaugen flüssiger Phasen ein, soweit das Gefüge vorgängig trocken gewesen war. Damit kann dann die Umkristallisation und die Gesteinsmetamorphose erst richtig wirksam werden.

Erst wenn ein Gesteinskörper richtig von tektonischer und mechanischer Unruhe erfasst ist, dürften Bedingungen eintreten, welche vielleicht noch nicht den Bedingungen der GRIGGS'schen Experimente mit Rekrystallisationsfluss entsprechen, aber denselben doch einigermaßen nahe kommen. Es ist deshalb anzunehmen, dass während der Gebirgsbildung eine gewisse „Erweichung“ der sonst so hochstarrten, schwer verformbaren kristallinen Silikatgesteine eintritt, welche bei Ruhe vermutlich rasch wieder nachlassen dürfte, weil Rekrystallisation auch zementierende Einflüsse haben wird. Es braucht deshalb immer erneute mechanische Bewegungsunruhen und Spannungsumstellungen, um den Vorgang der Rekrystallisation in Fluss zu halten und um zu verhindern, dass definitive Erstarrung und Verfestigung eintritt.

Um die Höhe des gebirgsbildenden Druckes zu schätzen, wird man allerdings nicht allein auf so schwer beurteilbare Bedingungen der Tiefe abstellen, sondern sich auch nach andern Kriterien umsehen. Mechanische Überlegungen und Schätzungen müssen dabei in den Vordergrund gestellt werden. Der Gebirgsgürtel wird immer diejenigen Stauchverformungen erleiden, welche den geringsten mechanischen Kraftaufwand benötigen. Das Studium der Gebirgskörper zeigt nun, dass zwar gewisse „plastische Verformungen“ des gesamten Gesteinskörpers stattgefunden haben, dass aber die Hauptstauchung durch weitreichende Scherverschiebungen erreicht worden ist, deren Ausmass offenbar die plastische Stauchung gewaltig

übertrifft. Also war der Scherwiderstand geringer als der plastische Verformungswiderstand. Die Längen der Scherflächen, welche in Frage kamen, muss man wohl auf mindestens 100 km schätzen. Berücksichtigt man die Scherwiderstände, welche BRIDGMAN (1937) experimentell wenigstens in der Grössenordnung annähernd bestimmt hat, und nimmt man einen glatten ebenen Schub unter günstigsten Bedingungen an, so ergibt sich eine minimale Grössenordnung des gebirgsbildenden Druckes von 2000—3000 kg/cm². Die erstmalige Ausbildung der Scherflächen benötigte vermutlich ein Vielfaches dieses Druckes. Man darf ferner die Mylonitisierungserscheinungen nicht übersehen, welche da und dort in den Gebirgskörpern auftreten und stellenweise ganze Gesteinsmassive erfassen wie z. B. die Gotthardgneise mit ihren Quarzkristallen, welche Trümmerquarznester darstellen. Da diese Zertrümmerungen in gewisser Tiefe und damit unter entsprechendem Tiefendruck erfolgt sein müssen, ergeben die experimentellen Resultate, dass solche Effekte des gerichteten gebirgsbildenden Druckes tausende von kg/cm² einseitige Pressung erforderten (Fig. 1). Die sichtbaren und theoretisch nachrechenbaren Effekte des gebirgsbildenden Druckes ergeben somit nicht eine Grössenordnung von 1000 kg/cm², sondern viel eher eine Grössenordnung von 10 000 kg/cm² oder noch höher. Es ist dies gerade die Grössenordnung, welche gemäss den Festigkeitsexperimenten mit Gesteinen für die Tiefenzonen von 10 km und mehr festgelegt werden können.

Sucht man unter Beziehung solcher mechanischer Vorstellungen sich ein Bild zu machen von den Bedingungen, unter denen sich die Gesteinsmetamorphose vollzogen hat, so scheinen die folgenden Überlegungen wichtig. Es liegt im Wesen von Schervorgängen, dass sie die Tendenz haben, ruckweise vor sich zu gehen, was plötzliche starke Abfälle der lokalen elastischen Spannung nach sich zieht. Vermutlich wird die Spannung dann wieder sukzessive anschwellen bis zum nächsten Ruck. In den kritischen Verformungszonen ist deshalb die gerichtet elastische Spannung im Kristallaggregat zahlreichen Fluktuationen unterworfen, wobei die Spannungsvariationen hunderte, ja manchmal vielleicht tausende von kg/cm² ausmachen können. Elastische Entspannungen in Nachbargebieten lösen immer wieder momentane elastische Schütterwellen aus. Diese Faktoren halten das Korngefüge in ständiger Unruhe und Lockerung. Nicht nur mag sich so die Porenfeuchtigkeit erhöhen durch Ansaugen zirkulierender Lösungen, sie wird auch in ständiger Unruhe gehalten und zum Zirkulieren gebracht. Die internen Phasengleichgewichte im Gestein wer-

den durch die Spannungspulsationen beständig neu gestört, besonders wenn, wie anzunehmen, der pulsierende Druck mit leichten Winkeldiskordanzen wiederkehrt. Dies halte ich für massgebliche Bedingungen der Gesteinsmetamorphose.

Unter solch beständig fluktuierenden Bedingungen können an kritischen Druckstellen mit der Zeit sehr wohl weitgehende Gefügeänderungen eintreten, welche einer aktiven Verformung plastischer Natur, Stauchung oder Ausquetschung senkrecht zur Druckrichtung vergleichbar werden. Vielleicht könnte man an Hand solcher Vorstellung auch dazu kommen, den Vorgängen der Migmatisierung und Tiefeninjektion wenigstens z. T. eine andere Deutung zu geben als bisher. Der Impuls zu stofflichen Wanderungen und Umsätzen mag im Rahmen einer modernen, mechanisch begründeten Gebirgsbildungstheorie möglicherweise statt von thermisch-magmatischer Quelle von den Spannungspulsationen der gebirgsbildenden Kraft kommen, welche die Gesteinsfeuchtigkeit in Wanderung bringt und damit den distanzlichen Stoffaustausch möglich macht. Die Gesteinslösung steht annähernd im Lösungsgleichgewicht mit ihrer Umgebung. Aszendierende wässrige Destillationsprodukte des Magmas sind so, was gelöstes Material anbelangt, einigermassen ähnlich wie deszendierende Lösungen, welche die gleiche Umgebungstemperatur angenommen haben. Wichtig ist für die umsetzenden Wirkungen bei der Lösungsphasen, der aszendierenden wie auch der deszendierenden, dass sie durch das Gesteinsgefüge wandern können, womit erst die oft erstaunlichen Durchdringungsphänomene des Stofftransportes erklärbar werden. Ein ruhiges hochgepresstes Korngefüge wird sicher sehr austauschresistent sein, auch wenn Temperaturgefälle existieren. Hier schafft vielleicht erst die Gefügeunruhe, welche durch die tektonische Aktivität ausgelöst wird, die notwendigen Bewegungsmöglichkeiten, ja vielleicht auch die eigentlichen Wanderungsimpulse.

Zusammenfassung der Schlussfolgerungen

1. Druckmetamorphe Gesteine sind elastisch stark anisotrop und senkrecht zur Schieferung viel kompressibler als quer dazu. Die Elastizitätsunterschiede sind so gross, dass eine weitgehende Einregelung der Einzelkristalle angenommen werden muss, dergestalt, dass sich die Achsen des kleinsten Moduls senkrecht zur Schieferungsebene gestellt haben.

2. Theoretische Überlegungen lassen vermuten, dass in gerichteten Druckfeldern sowohl bei mechanischen Durchbewegungen wie auch bei Rekristallisationen sich die Achse des kleinsten Elastizitätsmoduls der Kristalle parallel zur Druckrichtung zu stellen trachtet, so dass man nach Punkt 1 vermuten muss, der Druck habe senkrecht zur Druckschieferung gestanden.

3. Bei Experimenten, wo Regelungserscheinungen unter gerichtetem Drucke beobachtet werden konnten, scheinen die Resultate durchwegs die unter 2 angeführte Regelungsregel zu bestätigen.

4. Die alte Ansicht, dass Druck allein die Gesteine plastisch verformbar machen kann, hat sich experimentell insofern nicht bestätigen lassen, als das interne Gefüge von Silikatkristallen solchen plastischen Verformungen nicht zugänglich zu sein scheint. Verformung von Gesteinen durch Mylonitisierung oder durch Rekristallisation im Beisein einer flüssigen Phase sind die bisher allein erkennbaren Möglichkeiten der Verformung in der obern Erdkruste.

5. Gemäss vorgängigen Feststellungen ist die verbreitete Schertheorie der Regelung und der Schieferung weitgehend in Frage gestellt. Sie mag aber in manchen Fällen doch richtig sein.

6. Die in Gebirgskörpern auftretenden Mylonitisierungen, das Ausmass der beobachtbaren Scherungen im Gebirgskörper und anderes mehr führen zur Annahme, dass der gebirgsbildende Druck viele tausend kg/cm^2 betragen haben muss. Wahrscheinlich erreicht er die Grössenordnung der Trockenfestigkeit von Silikatgesteinen unter Tiefendruck, d. h. 10000 kg/cm^2 oder mehr.

7. Rekristallisationsexperimente mit Gesteinen unter gerichtetem Drucke haben die Möglichkeit von Rekristallisationsverformungen unter relativ niedrigen Stressen von der Grössenordnung von 1000 kg/cm^2 dargetan (GRIGGS).

8. Da Punkt 7 den Überlegungen von Punkt 6 widerspricht, ist anzunehmen, dass die Bedingungen von Punkt 7 in der Erdkruste nicht verwirklicht sind, wofür sich auch noch andere Gründe anführen lassen. Die Rekristallisations- und Metamorphisierungsvorgänge, welche in den Gebirgen beobachtbar sind, müssen deshalb vermutlich aus den speziellen physikalisch-mechanischen Bedingungen erklärt werden, denen die Gesteine von Faltungszonen während der tektonischen Umwälzung unterworfen sind. Es wird angenommen, dass starke, in der Richtung wechselnde häufige Stresspulsationen, eine stärkere Durchfeuchtung der Gesteine infolge Gefügelockerung usw. die weitgehende Metamorphose auslösen und zu einer Rekristallisationsschieferung führen.

Summary of conclusions

1. Metamorphic rocks show great elastic anisotropies, the compressibility being stronger perpendicular to the schistosity than parallel to it. The differences in the elastic moduli are so great, that most crystals must be orientated in such a way, that their axis of lowest Young modulus stands perpendicular to the plane of schistosity.

2. Theoretical considerations (SONDER 1933) suggest that in orientated pressure fields, the elastic axis of the crystal with the lowest Young modulus will during movements or during a recrystallisation tend to orientate itself parallel to the stress axis. According to point 1 pressure would therefore stand perpendicular to the plane of developing schistosity.

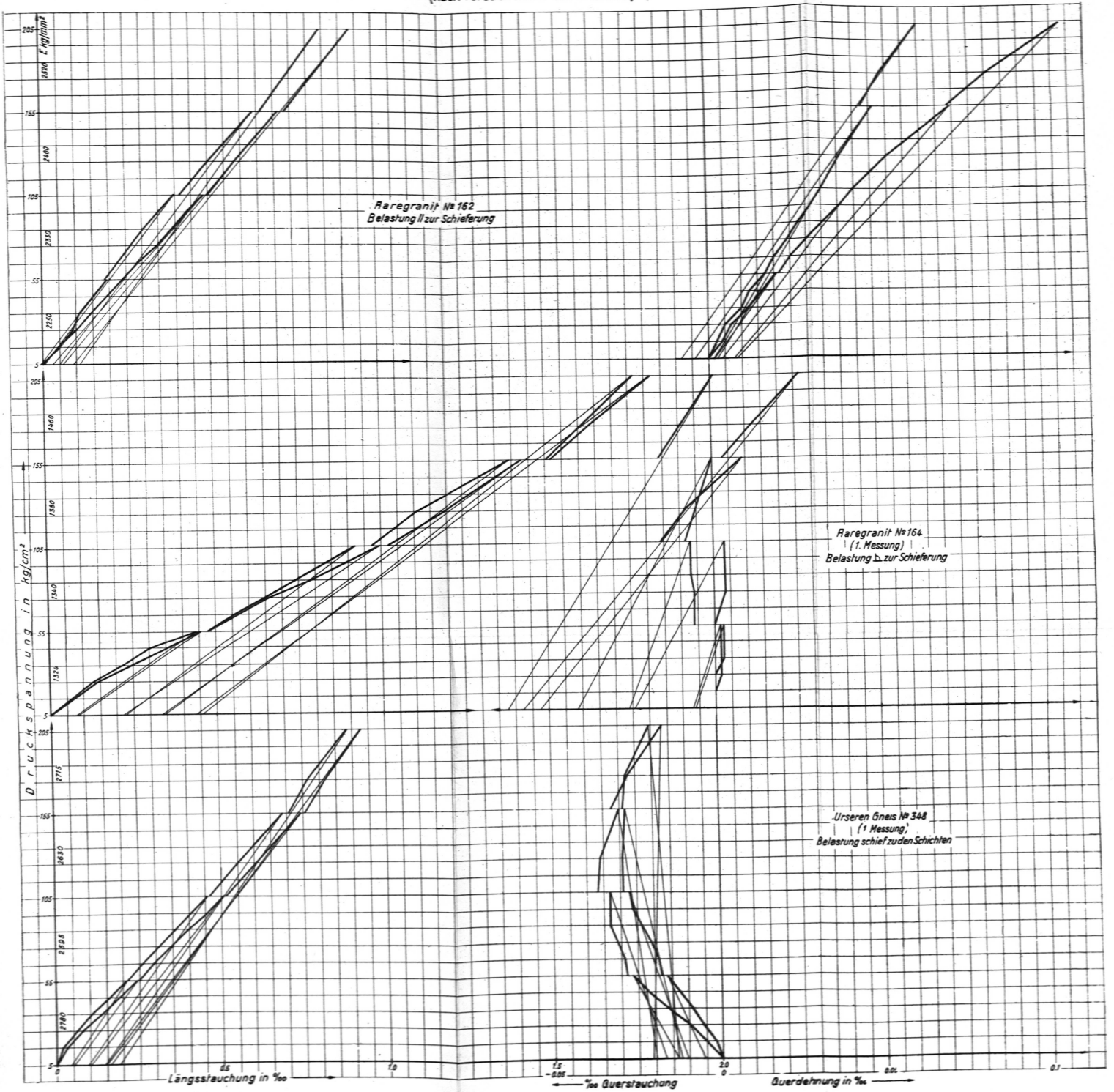
3. Experiments have so far confirmed the conclusion of point 2.

4. The older view that pressure makes rocks „plastic“ is not confirmed by existing experiments, as no silicate crystals have yielded even to extreme pressures by plastic deformation. Crushing combined with intergranular move-

Belastungs-Entlastungsdiagramme

parallel, senkrecht und schief zur Schieferung an geschiefertem Raregranit und Ursernigneis

links Längskompression, rechts Querdilatation (resp. Kontraktion!)
(nach Versuchen der EMPA Zürich)



Leere Seite
Blank page
Page vide

ments or recrystallisation in presence of a liquid phase seem to be the only possibilities of rock deformations in the upper crust (20—30 kms deep).

5. The previous points make the well-known shear theory of schistosity and orientated fabrics somewhat doubtful. This theory may nevertheless be right in certain cases.

6. The crushing effects visible in mountain structures and the observable large scale shear phenomena oblige us to the conclusion, that the forces building the mountains must amount to many thousands of atmospheres. Probably the occurring stresses may be as high as the strength of dry rocks under high confining pressures. In other words the order of magnitude of these forces is near to 10 000 atmospheres or more.

7. GRIGGS has shown by experiments that in presence of water, rocks may flow by recrystallisation at pressures possibly not far higher than 1000 atmospheres.

8. As point 7 contradicts point 6, it seems that the conditions of GRIGGS' experiments do not exist within the Earth's crust. It is supposed therefore that rock metamorphism depends on the special mechanical-physical conditions which must be assumed for folding belts during active movements. Pulsations (strong and frequent) of the stress, with light angular deviations, loosening of the fabric increased moisture and so on are considered to be of prime importance for metamorphic changes.

Literatur

- BIRCH, F. and others, Handbook of Physical Constants. Geol. Soc. of Amer. Special Papers 36 (1942).
- BRIDGMAN, P. W., Shearing phenomena at high Pressures. Proc. Amer. Acad. Art & Sc. 71 (1937) 387—459.
- GRIGGS, D. T., Experimental Flow of Rocks under Conditions favoring Recrystallisation. Bull. Geol. Soc. Am. 51 (1940) 1001—1022.
- GRIGGS, D. T. and BELL, J. F., Experiments bearing on the orientation of quartz in deformed rocks. Bull. Geol. Soc. Am. 49 (1938) 1723—1746.
- IDE, J. M., Comparison of statically and dynamically determined Young's Modulus of Rocks. Proc. Nat. Acad. Science 22 (1936) 81—92.
- SONDER, R. A., Über die Spannungsverteilung in beanspruchten Kristallverbänden und deren Bedeutung für Gefügeregelung und Gesteinsmetamorphose. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 13 (1933) 471—490.
- ZISMAN, W. A., Young's Modulus and Poisson's ratio with reference to geophysical applications. Proc. Nat. Acad. Science 19 (1933) 653—665 ff.

Eingegangen: 28. November 1947.