

# Die Bedeutung der Stoff-Konstanten natürlicher Gesteine für Bauwesen, Geologie und Bergbau

Von

Dr.-Ing. K. Jochmus-Stöcke,  
Borkheide

Mit 29 Abbildungen im Text und 6 Tafeln

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Allgemeines . . . . .	66
Baustoffprüfung . . . . .	66
Natursteinprüfung . . . . .	66
Verfahren und ihre Ergebnisse, Relativwerte . . . . .	67
B. Bedeutung der Stoffkonstanten von Gesteinen . . . . .	69
a) Im Bauwesen . . . . .	69
I. Wetterbeständigkeit . . . . .	69
II. Technische Eigenschaften . . . . .	70
1. Gewichtsverhältnisse . . . . .	70
2. Druckfestigkeit . . . . .	70
3. Zug- und Biegefestigkeit . . . . .	74
4. Elastische Eigenschaften . . . . .	77
5. Elastische Eigenschaften — Wärmedehnung, Temperaturspannungen . . . . .	79
b) Für die Geologie . . . . .	82
I. Porengehalt und Erdölführung . . . . .	82
II. Bruchlose Verformung und tektonische Fragen . . . . .	83
III. Bruchtektonik und Festigkeitsfragen . . . . .	94
IV. Geophysik . . . . .	96
c) Für den Bergbau . . . . .	101
I. Allgemeines . . . . .	101
II. Auswirkung des Gebirgsdrucks auf die Abbaulücke . . . . .	103
III. Modellversuche . . . . .	104
IV. Plattenstatische Gesetze der Schichtverformung . . . . .	116
V. Gebirgsdruck und Gebirgsschlag . . . . .	118
C. Schlußbetrachtung . . . . .	123
Schrifttumsnachweis . . . . .	124

## A. Allgemeines

### Baustoffprüfung

In der Technik ist es üblich, vor Inangriffnahme einer Ingenieurarbeit über die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der zur Verwendung kommenden Baustoffe genaueste Klärung herbeizuführen. Diese Stoffkenntnis ist notwendig, da sie als Unterlage jeder Konstruktionsberechnung dient. Bei den Baustoffen, die in technologischen Prozessen gewonnen werden, ist der Ingenieur schon damit beschäftigt, den Werdegang des Baustoffes vom Rohstoff bis zum Bauelement so zu beeinflussen, daß ein für den jeweiligen Verwendungszweck geeigneter Baustoff „gezüchtet“ und diesem die höchste Widerstandsfähigkeit gegen die voraussichtlichen Kraftangriffe, denen die Baukonstruktion im Betriebe ausgesetzt werden soll, verliehen wird (z. B. Zement, Stahl).

### Natursteinprüfung

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse bei der Verwendung eines naturgegebenen Stoffes für technische Zwecke. Hier muß sich der Ingenieur entweder den natürlichen Eigenschaften des Baustoffes in seiner Konstruktionsarbeit anpassen, oder er muß unter den natürlichen Baustoffen den für einen bestimmten Verwendungszweck geeigneten aussuchen. Meist wird ein Abwägen zwischen beiden Extremen stattfinden, d. h. der Ingenieur wird bei bestimmter Vorstellung von Art und Lage — sagen wir seines Bauwerkes — sich auch einen Überblick verschaffen, wo — im vorliegenden, besonders zu behandelnden Falle der Natursteinnutzung — Natursteine in näherer oder wirtschaftlich erreichbarer Umgebung vorkommen, wie ihre Eigenschaften in technischer Beziehung sind, und ob sie dem geplanten Zweck entsprechen. Bei der Planung werden die Fragen des zu verwendenden Baustoffes und die endgültige Gestaltung des Bauwerkes einander anzugleichen sein.

Die Erforschung der technischen Eigenschaften von Naturstein hat sich auf diese Weise aus den Bedürfnissen des Bauwesens herausentwickelt; zunächst, losgelöst von den Fragen der Entstehung, d. h. des „technologischen“ Werdegangs eines Naturgesteins in der Erdgeschichte. Die Festigkeitseigenschaften (Widerstand gegen Druck, Zug, Biegung, Scheren), später auch die der Verformung (elastische, plastische Verformung, Elastizitätsmodul), die der Wärmedehnung und des Wärmedurchlasses sind so durch bekannte technische Verfahren ermittelt und für Bauzwecke nutzbar gemacht worden.

Die Bearbeitung der wichtigen Fragen, der Korrosion, d. h. der Gesteinsverwitterung, dagegen spielt schon stark aus dem Arbeitsgebiet der Mechanik in das der Mineralogie, Petrographie und Geo-

logie hinüber, und so sind hieran außer HIRSCHWALD (1908, 1912) Namen wie BERG (1931), BURRE, GRENGG (1931), GRÜN, HOPPE, KAISER, KIESLINGER, NIGGLI-QUERVAIN, SCHAFFER, SCHMÖLZER, STEUER, STINY, WAGNER u. a. geknüpft. Diese Forscher haben entweder als Geologen, Mineralogen oder Chemiker von der Seite der Erkenntnis des Erdgeschehens daß Thema behandelt, oder aber sie haben als Ingenieur-geologen und Gesteinstechniker gesehen, daß ohne die Kenntnis des erdgeschichtlichen Werdegangs des Baustoffes „Naturstein“ das Wesen dieses vielseitig zusammengesetzten, in seinem Gefüge, seiner Absonderungsweise, seinen Vorkommen so verschiedenartigen Stoffes nicht zu ergründen ist.

So entwickelte sich unter bewußt naturwissenschaftlicher Beeinflussung das Gebiet der „technischen Gesteinskunde“ und wurde maßgebend für die Prüfung und das Nutzbarmachen der Natursteinvorkommen.

Aus dem lebhaften Zusammenarbeiten der mehr technisch und vornehmlich naturwissenschaftlich Denkenden hat sich erst allmählich ein Verstehen und Zurechtfinden der Forscher der verschiedenen Richtungen entwickelt. Wichtig wurde der Ausgleich und das Hinüber und Herüber der vornehmlich im Labor experimentell arbeitenden Prüftechniker, der in der Natur beobachtenden Geologen und der konstruktiven Ingenieure, für deren Werk die beiden ersten die notwendigen rechnungsmäßig einzusetzenden Unterlagen liefern sollen (K. STÖCKE, 1938).

### **Verfahren und ihre Ergebnisse, Relativwerte**

Eine Tatsache müßte zunächst Allgemeingut werden:

Nachdem der technisch geschulte Geologe oder geologisch gut geschulte Techniker das Vorkommen des Baustoffes begutachtet hat, ist an einer Gesteinsprobe — einer Durchschnittsprobe, für die der Probenehmer einsteht — eine Prüfung auf

1. allgemeine gesteinskundliche und
2. physikalisch-technische Eigenschaften vorzunehmen.

Die Bestimmung der Eigenschaften unter 1. mit Hilfe der in der Petrographie allgemein üblichen Methoden auf optischem Wege bis zur Dünnschliffuntersuchung und der Anwendung chemischer Verfahren liefert einmal allgemeine Unterlagen zur Beurteilung des Gesteins nach der technischen Seite und ermöglicht 2., insbesondere beim Erkennen des Mineralaufbaues, der Mineralerhaltung und charakteristischer Gefügeeigenschaften (Porosität), eine Diagnose hinsichtlich der voraussichtlichen Wetterbeständigkeit abzugeben.

Diese Bestimmungen haben bei aller wissenschaftlichen Zuverlässigkeit einen stark subjektiven Charakter, und die Methode läßt sich nicht bis in alle Einzelheiten festlegen. Daher kann das

Normenblatt DIN DVM 2101, das Probenahme und gesteinskundliche Untersuchung regelt, lediglich als Wegweiser angesehen werden.

Anders ist dies mit den übrigen vom Verband für Materialprüfung der Technik herausgegebenen Normenblättern zur Prüfung natürlicher Gesteine: hier sind die Bedingungen, nach denen die Untersuchungen auf die einzelnen Eigenschaften vorgenommen werden sollen, genauestens festgelegt. Diese Bestimmungen sind unbedingt einzuhalten, da die erhaltenen Werte nur unter der Voraussetzung der vollkommenen Übereinstimmung der Versuchsbedingungen vergleichbar sind.

Es ist nachweislich (GRENGG, 1927, BURCHARTZ und SAENGER) z. B. von ausschlaggebender Bedeutung für das Versuchsergebnis, ob die Prüfung auf Druckfestigkeit an zylindrischen oder würfelförmigen Versuchskörpern durchgeführt wird, ob ferner die Höhe der Zylinder gleich ist dem Durchmesser der Druckfläche oder der Quadratwurzel aus ihr. Das Druckfestigkeitsergebnis wird weiter von der Größe der Versuchskörper beeinflusst; mit zunehmender Körpergröße fällt die Festigkeit. Es ist bestimmend für das Ergebnis, ob die Flächen poliert oder geschliffen sind, ob die Widerlager, zwischen denen die Proben beim Versuch stehen, poliert, geschliffen oder fein geraugt sind, ob der Stahl der Druckplatten hohe oder geringe Brinellhärte hat, ob die Belastungsgeschwindigkeit beim Druckversuch klein oder groß ist, ob die Proben bergfeucht, lufttrocken oder getrocknet, ob wassergetränkte oder ausgefrorene Proben geprüft werden. Alle diese Einzelheiten sind daher in den Normenblättern festgelegt, und Prüfenieur und Konstrukteur, denen einmal die im Laboratorium ermittelten Zahlen dienen sollen, müssen sich stets klar darüber sein, daß die bei der Prüfung erhaltenen Ergebnisse „Relativ“-Werte, abhängig von ganz bestimmten Bedingungen, darstellen.

Durch Normenblätter ist geregelt: Die Ermittlung der

1. Gewichts- und Dichteverhältnisse (DIN DVM 2102),
2. Wasseraufnahme (2103),
3. Frostbeständigkeit (2104),
4. Druckfestigkeit (2105),
5. Schlagfestigkeit (2107),
6. Abnutzbarkeit der Schleifen (2108).

Darüber hinaus werden wichtige Bestimmungen vorgenommen, für die mit den großen Materialprüfstellen Abmachungen getroffen und die noch nicht zur Industrienorm geworden sind:

1. Biegezugfestigkeit,
2. Scherfestigkeit,
3. Elastische Eigenschaften,
4. Wärmedehnung,
5. Wärmeleitzahl.

Zu diesen reinen Stoffprüfungen kommen nun auch Prüfungen mehr konstruktiven Charakters, bei denen die Prüfung am Gesteinskörper der Form, in der er zur Verwendung kommt, vorgenommen wird. Sog. Gebrauchsprüfungen sind z. B. die von Schotter für Straßenbau, Gleisbettung und Betonzuschlag auf Kornzusammensetzung, Raummetergewicht, Schüttgewicht und Widerstandsfähigkeit von Schotter gegen Druck- und Schlagbeanspruchung (H. BREYER, 1931, 1937, STÜBEL, ROTHFUCHS, PICKEL, WALZ).

Ferner können ganze Konstruktionsteile, Säulen, Mauerwerkskörper auf ihre Festigkeitseigenschaften, Wärmespeichungsvermögen usw. zur Untersuchung kommen und leiten über zu den praktischen Verhältnissen in einem Bauwerk.

Im nachfolgenden soll nur von der Bedeutung gesprochen werden, die die unter ganz bestimmten Bedingungen gewonnenen Stoffkonstanten von Naturstein für verschiedene Gebiete — Bauwesen, Geologie und Bergbau — haben.

## **B. Bedeutung der Stoffkonstanten von Gesteinen**

### **a) Im Bauwesen**

Wie vorstehend ausgeführt, haben sich aus den Bedürfnissen des Bauwesens heraus bestimmte Prüfverfahren entwickelt, und der Bauingenieur greift auf die nach diesen Verfahren erhaltenen Werte zurück, um den als Baustoff genutzten Naturstein zu beurteilen.

Abgesehen von bestimmten Anforderungen an Form und Größe, sowie Bearbeitungsmöglichkeit verschiedener Gesteine sind je nach Verwendung einzelne Eigenschaften besonders wichtig. An sämtliche im Freien verwendete Gesteine wird insbesondere die Forderung der Widerstandsfähigkeit gegen atmosphärische Einflüsse gestellt. Außer den eigentlichen gesteinskundlichen Merkmalen sind besondere physikalische Faktoren maßgebend.

### **I. Wetterbeständigkeit**

Für die Beurteilung der Wetterbeständigkeit und insbesondere der Frostbeständigkeit als Teilgebiet der Wetterbeständigkeit spielt die Wasseraufnahme eine entscheidende Rolle. Gesteine, deren Wasseraufnahme bei normalem Luftdruck kleiner ist als als 0,5 Gew.-% bzw. 1,5 R.-% gelten wegen der damit verknüpften geringen Porosität als frostbeständig.

Ist die Wasseraufnahme bei normalem Luftdruck größer als 0,5 Gew.-%, so wird die Wasseraufnahme unter 150 atü nach vorherigem Entlüften bei 20 mm-Hg-Säule bestimmt. Bei diesem Vorgang werden sämtliche durch Wasser erreichbare Poren („wasserwegsame“ Poren = STINY) mit Wasser erfüllt. Ist diese

Wasseraufnahme wesentlich höher als die unter normalem Druck, so ist dies ein Beweis dafür, daß sich unter normalen Druckverhältnissen die Poren nicht vollkommen mit Wasser füllen. Etwa in den Gesteinsporen bei Frost entstehendes Eis kann sich ausdehnen und kann bei der Volumenvermehrung, die 9,8 Raum-% beträgt, in den noch freien Raum wandern. Daher gilt unter Zurechnung eines Sicherheitsfaktors dasjenige Gestein theoretisch noch als frostbeständig, bei dem das Verhältnis zwischen Wasseraufnahme normal und Wasseraufnahme bei 150 atü nach vorherigem Entlüften nicht größer ist als 80 % (DIN DVM 2103 und 2104, STÖCKE — 1932).

Beide Konstanten reichen oftmals zur sicheren Beurteilung der Frostbeständigkeit nicht aus, es werden noch weitere Prüfungen abgeschlossen. Ein vom Verfasser ausgearbeitetes und auf dem Internationalen Kongreß für Materialprüfung London 1937 vorgelegtes Schema mit dem Ablauf einer Frost- und Wetterbeständigkeitsprüfung sei eingefügt (Tafel I, STÖCKE 1937). Nach diesem Verfahren arbeitet Verfasser seit Jahren mit Erfolg.

## II. Technische Eigenschaften

Eine aus zehnjähriger Versuchsarbeit im Staatl. Materialprüfamt Berlin-Dahlem unter Benutzung von Ergebnissen anderer Prüfanstalten (Darmstadt, Dresden, München, Nürnberg, Stuttgart) zusammengestellte Tafel II gibt einen allgemeinen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der als Baustoff genutzten Natursteine.

### 1. Gewichtsverhältnisse

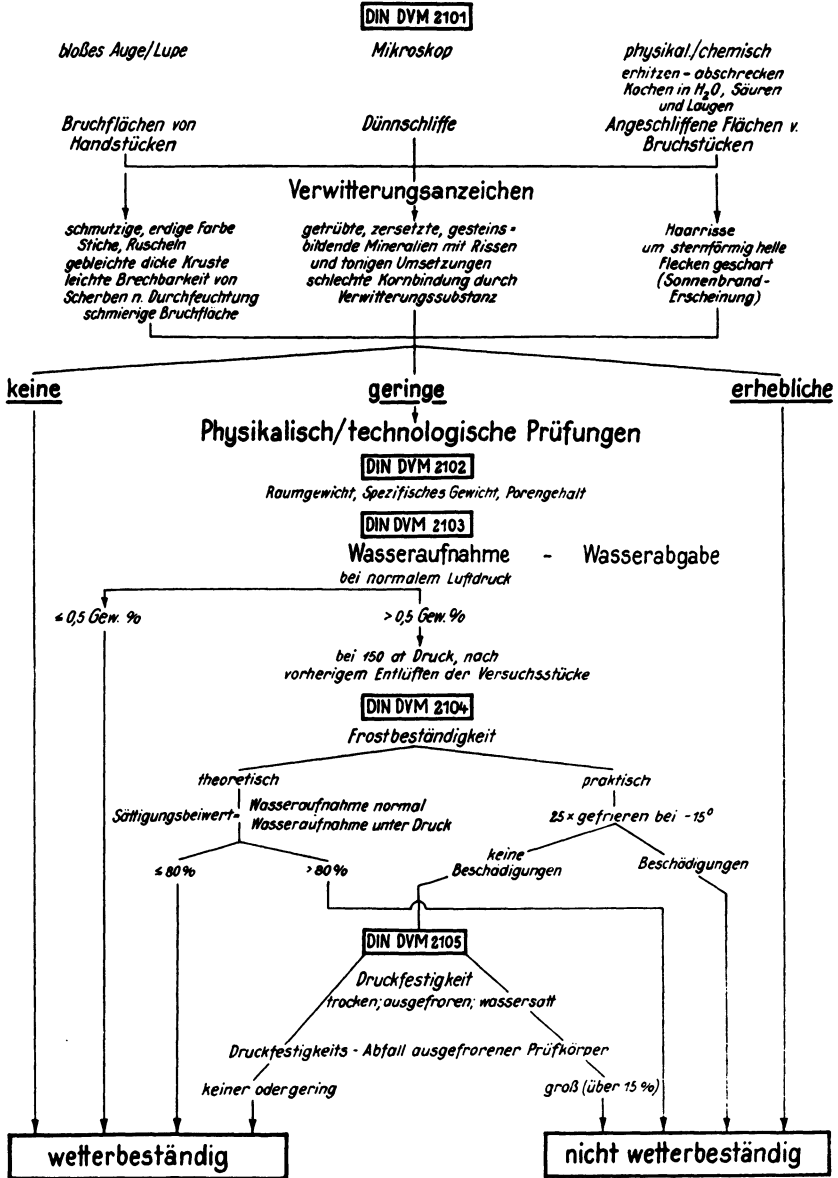
Die in Spalte 1 der Tafel II angegebenen Raumgewichte sind maßgebend für die Berechnung der Belastungen im Hochbau. Sie sind als Unterlagen benutzt worden für die Aufstellung der Belastungsannahmen durch den Ausschuß für einheitliche technische Baupolizeibestimmungen (Erb, DIN DVM 1055).

### 2. Druckfestigkeit

Bei der hohen Beanspruchungsmöglichkeit der meisten Natursteine auf Druck werden Natursteine hinsichtlich der Druckfestigkeit fast allen Anforderungen gerecht. Bedenkt man, daß Höchstbelastungen von gewachsenem Fels als Baugrund (DIN DVM 1054) und die zulässigen Druckspannungen für Quadermauerwerk (DIN DVM 1053) meist nur wenige 10er Potenzen ausmachen, — daß die Druckfestigkeiten unserer Erstarrungsgesteine zwischen 1800 und 4000 kg cm<sup>2</sup> liegen (vgl. Tafel II), und daß zum Bau verwendbare Sedimentgesteine meist Festigkeiten zwischen 500 und 2000 kg cm<sup>2</sup> besitzen: so werden im normalen Bruchstein-, Schichten- oder Quadermauerwerk diese Werte meist nicht annähernd erreicht.

# Wetterbeständigkeits- Prüfung von Naturgestein

## Petrographische Untersuchung



Tafel I.

Tafel II. Richtzahlen für die Auswahl und Verwertung von Natursteinen. (Bereich der mittleren Häufigkeitswerte)

Gesteinsgruppen	1 Raum- gewicht r	2 Spezif. Gewicht DIN DVM 2102 s	3 „wahre“ Porosität in Raum % (1-r/s) · 100 in %	4 Wasser- Aufnahme DIN DVM 2103 Gow.-% %	5 „schein- bare“ Porosität Raum-%	6 Druckfestigkeit des trockenen Gesteins DIN DVM 2105 in kg/cm <sup>2</sup>	7 Biegezug- festigkeit in kg/cm <sup>2</sup>	8 Scher- festigkeit in kg/cm <sup>2</sup>	9 Elastizitäts- Modul kg/cm <sup>2</sup> · 10 <sup>8</sup> (Spannungs- bereich 0—100 kg/cm <sup>2</sup> )
1 Granit Syenit	2,60—2,80	2,62—2,85	0,4—1,5	0,2—0,5	0,4—1,4	1600—2400	100—200	100—150	500—600
2 Diorit Gabbro	2,80—3,00	2,85—3,05	0,5—1,6	0,2—0,4	0,5—1,5	1700—3000	100—220	130—180	800—1000
3 Quarzporphyr Keratophyr, Porphyrit, Andesit	2,55—2,80	2,58—2,83	0,4—1,8	0,2—0,7	0,4—1,5	1800—3000	150—200	—	500—700
4 Basalt (Melaphyr)	2,95—3,00	3,00—3,15	0,2—0,9	0,1—0,3	0,3—0,7	2500—4000	150—250	100—150	900—1200
Basaltlava	2,20—2,35	3,00—3,15	20—25	4—10	9—24	800—1500	80—120	—	400—500
5 Diabas	2,80—2,90	2,85—2,95	0,3—1,1	0,2—0,4	0,5—1,0	1800—2500	150—250	130—200	700—800
6 Kieselige Gesteine									
a) Gangquarze, Quarzite und Grauwacken	2,60—2,65	2,64—2,68	0,4—2	0,2—0,5	0,5—1	1500—3000	130—250	80—120	400—600
b) Quarzitische Sandsteine	2,60—2,65	2,65—2,70	0,4—2,0	0,2—0,5	0,5—1	1200—2000	120—200	—	300—400
c) sonst. Sandsteine	2,00—2,65	2,64—2,72	0,5—25	0,2—9	0,5—24	300—1800	30—150	20—60	50—300
7 Kalksteine									
a) Dichte, feste Kalke u. Dolomite (einschl. Marmore)	2,65—2,85	2,70—2,90	0,4—2,0	0,2—0,5	0,5—1,8	800—1800	60—150	50—100	400—700
b) sonst. Kalksteine (einschl. Kalkkonglomerate)	1,70—2,60	2,70—2,74	0,5—30	0,2—10	0,5—25	200—900	50—80	30—70	300—600
c) Travertin	2,40—2,50	2,69—2,72	5—12	2—5	4—10	200—600	40—100	60—80	—
8 Vulkanischer Tuffstein	1,80—2,00	2,62—2,75	20—30	6—15	12—30	200—300	20—60	15—40	30—150
9 Metamorphe Gesteine									
a) Gneis, Granulit	2,65—3,00	2,67—3,05	0,4—2	0,1—0,6	0,3—1,8	1600—2800	—	—	—
b) Amphibolit	2,70—3,10	2,75—3,15	0,4—2,0	0,1—0,4	0,3—1,2	1700—2800	—	—	—
c) Serpentin	2,60—2,75	2,62—2,78	0,1—0,6	0,1—0,6	0,3—1,8	1400—2500	—	—	—
10 Dachschiefer	2,70—2,80	2,82—2,90	1,6—2,5	0,5—0,6	1,4—1,8	—	500—800	—	700—1000



Gesteinsgruppen	10	11		12	13	14	15	16		17
	Temperaturdehnung je °C in Längeneinheiten 10 <sup>-6</sup>	Schlagfestigkeit DIN-Vornorm 2107 in cmkg/cm <sup>3</sup>	Anzahl der Schläge bis zur Zerstör.	Abnutzung bei Beanspruchung durch Schleifen 50 cm <sup>2</sup> Fläche in cm <sup>2</sup>	Abnutzung durch Sandstrahl 28 cm <sup>2</sup> Fläche in cm <sup>2</sup>	Kantenverschleiß von Würfeln in Gew.-%	Raummetergewicht von Schotter 30/60 mm eingefüllt DIN DVM 2110 t/m <sup>3</sup> Rf	Widerstandsfähigkeit von Schotter 30/60 mm Korn gem. Druck	Schlag Zertrümmerungsgrad DIN DVM 2109	
1 Granit Syenit	0,8	110—120	10—12	5—8	3,3—5,0	3,0—4,5	1,30—1,40	1,4—1,7 *(16—19)	0,7—1,1 *(9—13)	
2 Diorit (Diabro)	0,8	190—180	10—15		2,8—3,1	2,5—3,5	1,40—1,50	0,8—2,0 (13—15)	0,6—1,8 (8—20)	
3 Quarzporphyr Keratophyr, Porphyrit, Andesit	0,5	190—240	11—13		2,6—3,5	2,0—3,0	1,30—1,40	1,3—1,6 (14—17)	0,6—1,3 (8—17)	
4 Basalt (Melaphyr)	0,5	160—300	12—17	5—9	1,7—2,5	2,0—3,0	1,40—1,50	1,1—1,5 (12—16)	0,5—1,0 (6—12)	
Basaltlava	—	20—300	4—5	12—15	4,0—6,0	—	1,10—1,25	—	—	
5 Diabas	0,5	190—270	11—16	5—8	2,6—4,2	2,0—3,5	1,35—1,45	1,2—1,6 (13—17)	0,5—0,9 (6—11)	
6 Kieselige Gesteine										
a) Gang Quarze, Quarzite und Grauwacken	1,1	110—180	10—15	7—8	3,0—3,5	2,5—4,0	1,25—1,35	1,4—1,7 (16—19)	0,8—1,4 (10—16)	
b) Quarzitische Sandsteine	—	70—110	8—10							
c) sonst. Sandsteine	1,1	—	5—10							
7 Kalksteine										
a) Dichte, feste Kalk u. Dolomite (einschl. Marmore)	0,3	70—110	8—10	20—40	—	—	1,30—1,40	1,6—1,9 (17—20)	0,9—1,6 (11—17)	
b) sonst. Kalksteine einschl. Kalkkonglomerate	—		—	—	—	5,6—8,5	—	—	—	
c) Travertin	0,4		—	—	—	—	—	—	—	
8 Vulkanischer Tuffstein	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9 Metamorphe Gesteine										
a) Gneis, Granulit	—	—	6—12	4—10	—	—	1,30—1,50	—	0,7—1,2 (9—14)	
b) Amphibolit	—	—	10—16	6—12	—	—	1,40—1,50	—	0,5—0,8 (6—20)	
c) Serpentin	—	—	6—15	8—18	—	—	1,30—1,40	—	—	
10 Dachschiefer	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

\* Durchgang durch das 10 mm-Lochsieb in Gewichtsprozenten.

Bei Gewölben und Widerlagern ist schon eine genauere Kenntnis von Natursteinfestigkeiten notwendig, da die hier auftretenden Spannungen unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors, besonders bei wechselnden oder schwingenden Lasten, dicht an die Druckfestigkeit herankommen können.

### 3. Zug- und Biegefestigkeit

Gefährlich werden für den Naturstein alle Zugspannungen, auch die Biegezug- und Scherspannungen, denn Zug-, Biegezug- und Scherfestigkeit betragen je nach Struktur des Gesteins nur  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{1}{50}$  der

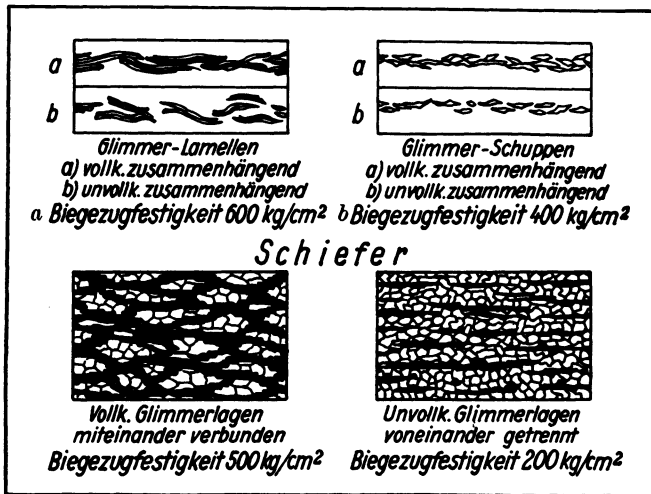


Abb. 1. Gefügetypen und Biegezugfestigkeit.

Druckfestigkeit (GABER). Die von HIRSEHWALD angegebenen Verhältniswerte — Druckfestigkeit : Scherfestigkeit : Zugfestigkeit = 100 : 10 : 5 — können nur als ganz grobe Faustwerte angesehen werden, — nach dieser Richtung ist für die Forschung noch ein weites Gebiet offen. Bei der immer weiteren Verwendungsnotwendigkeit von Naturstein an Stelle von Eisen (SPEER) ist die Kenntnis der dem Stein zumutbaren Zug-, Biege- und Scherspannungen besonders wichtig. Das gegenwärtig wegen nur mangelhafter Kenntnis dieser Eigenschaften übliche Überdimensionieren aus Sicherheitsgründen ist wirtschaftlich nicht zu vertreten.

Sehr hohe Zugspannung kann Glimmer aufnehmen (2500 bis 3000 kg/cm<sup>2</sup>), daher ist der Dachschiefer mit durchgehenden Glimmerlagen (BERG, 1933, STÖCKE, 1934, MOHR) ein höchst zug- und biegefestester Baustoff. Deutlich ist der Einfluß der Strukturunterschiede auf die Festigkeit zu erkennen (Abb. 1).

Im allgemeinen werden Biegezugfestigkeitsversuche mit Hilfe des abgebildeten Gerätes (Abb. 2) bei den angegebenen Abmessungen

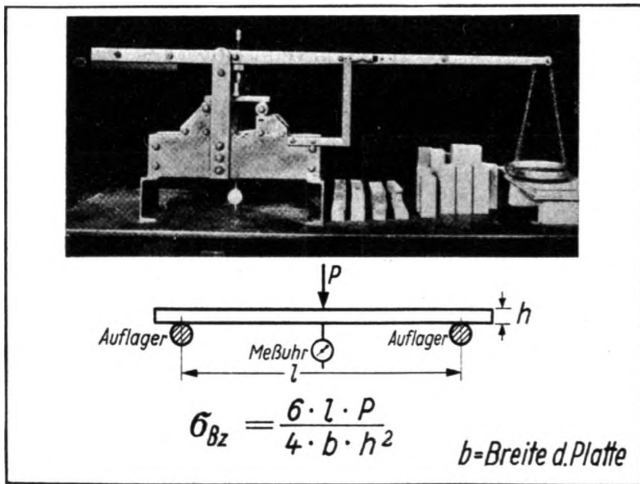


Abb. 2. Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Biegefestigkeit.

durchgeführt; bei Dachschiefer wird eine Sondereinrichtung (Abb. 3) (ALBRECHT) benutzt und die Biegefestigkeit berechnet nach

$$B_z = \frac{4,5}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{2r}{3R}\right) \cdot \frac{P}{h^2}.$$

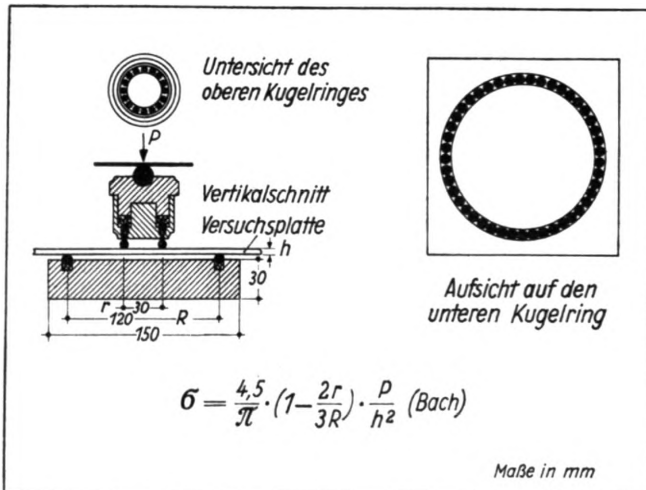


Abb. 3. Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Biegefestigkeit.

Während bei normalen Tonschiefern, die vom Verfasser untersucht wurden, Biegezugfestigkeiten zwischen 75 und 200 kg/cm<sup>2</sup> er-

mittelt wurden, steigt die Biegezugfestigkeit bei Dachschiefern auf  $800 \text{ kg/cm}^2$ .

Ähnliche durch das Gefüge bedingte Festigkeitsunterschiede sind auch bei anderen Gesteinen nachgewiesen. Z. B. hat Sandstein a  $30 \text{ kg/cm}^2$  Biegezugfestigkeit, während die des Sandsteins b auf  $100 \text{ kg cm}^2$  gestiegen ist (Abb. 4 a und b).

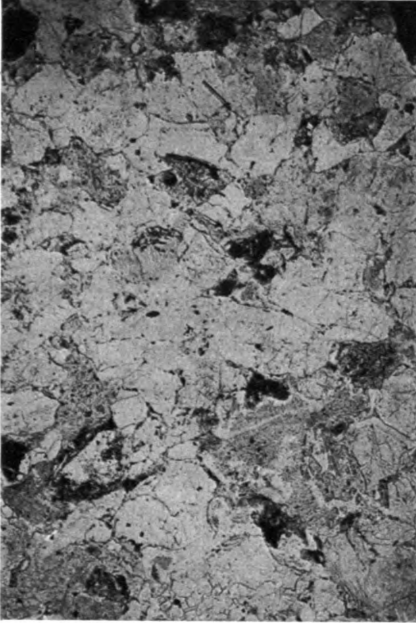


Abb. 4. Sandstein (Vergrößerung 40fach // Nicols)

a)

Mittelkörniges, richtungsloses Gefüge, mergeliges Bindemittel.  
 Druckfestigkeit:  $180 \text{ kg/cm}^2$   
 Biegefestigkeit:  $30 \text{ kg/cm}^2$   
 E-Modul:  $25 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$   
 von  $10 \text{ kg/cm}^2$  Spannung schon  $10\%$  plastischen Verformungsanteil, der bis auf  $20\%$  wächst

b)

Feinkörniges ausgerichtetes Gefüge mit fester unmittelbarer Kornbindung.  
 Druckfestigkeit:  $500 \text{ kg/cm}^2$   
 Biegefestigkeit:  $100 \text{ kg/cm}^2$   
 E-Modul:  $300 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$   
 bis  $100 \text{ kg/cm}^2$  Spannung vollkommen elastisch ab  $200 \text{ kg/cm}^2$   $5\%$  plastischen Verformungsanteil, der bis kurz vor dem Bruch nicht zunimmt

In diesem Zusammenhang interessiert die Untersuchung zweier Granite, bei denen die Bestimmung der Biegezugfestigkeit eine besondere Rolle spielte, da eine hohe Beanspruchung der aus Granit zu fertigenden Werkstücke geplant und die vornehmlich die Zerstörung herbeiführenden Kräfte als Zugspannungen anzunehmen waren. Aus dem Granit sollten Stelzenlager nebenstehender Form und Abmessung (Abb. 5) hergestellt werden. Diese Natursteinlager wurden im Erlaß vom 12. 7. 1937 vom Generalinspektor für das Deutsche Straßenwesen

für Brücken kleiner und mittlerer Stützweite empfohlen (HANSEN und STÖCKE).

Zur Auswahl standen zwei Granite, deren Gefügebilder in Abb. 6a und b wiedergegeben sind. Die große Überlegenheit des Granits a

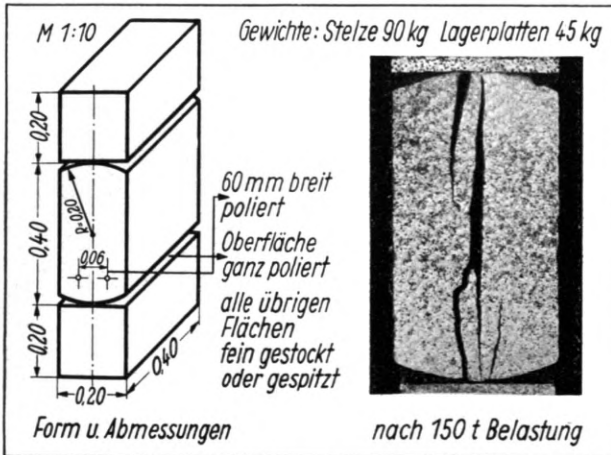


Abb. 5. Stelzenlager. Abmessungen und nach Belastung.

liegt in der bedeutend besseren Kornbindung der Aufbaumineralien. Diese spiegelt sich in der Druckfestigkeit und in der Biegezugfestigkeit wieder.

Gestein	Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>
Granit a	2090	260
Granit b	1480	90

Bei dem ausgewählten Granit a zeigte sich außerdem noch eine große Gleichmäßigkeit der Einzelprüfungen und ein nur kleiner Unterschied zwischen Werten, die bei Wiederholungsprüfungen, die zwei Jahre auseinander lagen, festgestellt wurden.

Durch Versuche mit Fertiglagerern ergab sich eine Bruchlast der Stelzen von 150 t Gesamtlast. Auch bei Berücksichtigung der Vergrößerung der rechnungsmäßigen Drucke durch die Stoßzahl ist bei den großen Massen von Eisenbetontragwerk derartiger Brücken, das den Verkehrsdruck auf die Lager abgibt und mit 10--20% anzusetzen ist, eine genügende Sicherheit vorhanden.

#### 4. Elastische Eigenschaften

Seit den Arbeiten von H. BREYER im Jahre 1929 und den späteren von SAENGER und STÖCKE kümmert man sich nach älteren Einzelversuchen von BAUSCHINGER auch bei der Natursteinprüfung mehr

um die Verformungserscheinungen unter Belastung und um das Rückformungsvermögen nach Entlasten, sowie die Bedeutung, die das elastische Verhalten für das fertige Bauwerk hat.

Die Grundbegriffe für die Verformung von Gesteinen bei Druck- und Biegebeanspruchungen sind in der Tafel VI zusammengestellt und zeichnerisch erläutert (vgl. Abschnitt „Bergbau“ Seite 105).

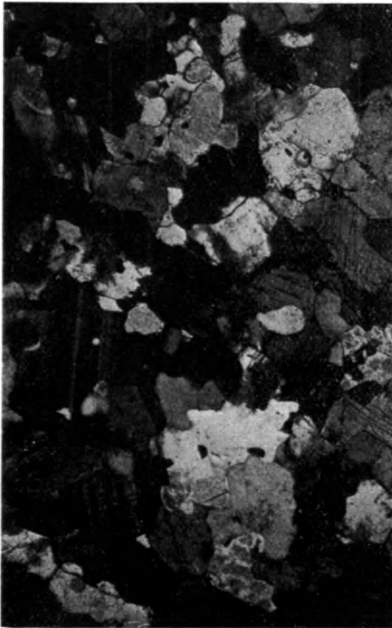


Abb. 6. (Vergrößerung 40fach + Nicols)

a)

**Mittelkörniger Granit**  
 mit guter Mineralverzahnung.  
 Druckfestigkeit: 2090 kg/cm<sup>2</sup>  
 Biegefestigkeit: 260 kg/cm<sup>2</sup>  
 E-Modul: 60.10<sup>4</sup> kg/cm<sup>2</sup>  
 bis 300 kg/cm<sup>2</sup> Spannung nur 5% bleiben-  
 der Anteil von der Gesamt-Verformung.

b)

**Grobkörniger Granit**  
 mit schlechter Mineralverzahnung.  
 Druckfestigkeit: 1480 kg/cm<sup>2</sup>  
 Biegefestigkeit: 90 kg/cm<sup>2</sup>  
 E-Modul: 30.10<sup>4</sup> kg/cm<sup>2</sup>  
 bei 50 kg/cm<sup>2</sup> schon 5% bleibender Ver-  
 formungsanteil, bei 300 kg/cm<sup>2</sup> 20%

Im Bauwesen kann das elastische Verhalten ausschlaggebend sein, bei Großbauten, z. B. bei großen Gewölben und Gewölbebrücken, auch im Straßenbau, z. B. bei Pflasterdecken, deren Fugen mit Zement vergossen sind. Die elastischen Eigenschaften des als Betonzuschlag verwerteten Natursteins beeinflussen die Verformbarkeit des Fertigbetons ebenfalls erheblich.

Theoretisch wäre derjenige Baustoff, der bei weitgehender vollkommen elastischer Verformbarkeit eine hohe Druck- und Zug-

festigkeit besitzt, der idealste, da sich in ihm auftretende Spannungen vollkommen ausgleichen können. Beim Naturstein ist durch oben erwähnte Arbeiten eindeutig übereinstimmend nachgewiesen, daß die im allgemeinen druckfesteren dunklen basischen Gesteine, z. B. Gabbro und Basalt, „härter“-elastisch sind als die hellen sauren Gesteine, z. B. Granit und Quarzporphyr; d. h. unter gleichen Lasten verformen sich erstere weniger als die letzteren. Beigefügte Tafel II gibt Häufigkeitswerte verschiedener Gesteinsgruppen im Auszuge wieder.

Hat der Bauingenieur die elastischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteine erkannt, so wird er sich von Fall zu Fall entscheiden, ob er geringere Festigkeit für höhere elastische Verformbarkeit hinnehmen kann, wenn in dem geplanten Bauteil die Anforderung der Verformungsmöglichkeit im Vordergrund des Interesses steht.

Wie maßgeblich auch Beton durch die elastischen Konstanten besonders des groben Zuschlages beeinflusst wird, setzt HUMMEL auseinander. Er stellt einen Basaltbeton und einen Quarzitbeton gleicher Mischung, mit gleicher Kornform und Zusammensetzung des Zuschlages einander gegenüber: der Basaltbeton ist mit einem E-Modul von 421 000 kg/cm<sup>2</sup> annähernd doppelt so starr wie der Quarzitbeton mit einem E-Modul von 235 000 kg/cm<sup>2</sup> bei gleicher Druckfestigkeit beider Betone von 400 kg/cm<sup>2</sup>.

##### 5. Elastische Eigenschaften — Wärmedehnung — Temperaturspannungen

Die in einem Bauwerke durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Spannungen, d. h. die Temperaturspannungen, sind das Produkt der Faktoren: Elastizitätsmodul und Wärmedehnungszahl.

Die Wärmedehnung wird ermittelt an zylindrischen Probekörpern, die abwechselnd erhitzt und wieder abgekühlt werden, und deren Längenänderung man auf eine bestimmte Meßlänge mit Hilfe von MARTENSSCHEN Spiegelgeräten mißt<sup>1)</sup>. Die Wärmedehnung je Grad ist ein sehr kleiner Wert; in der Tafel II, Spalte 10 sind die bisher aus dem Schrifttum (STINY, SCHULZ) und die vom Verfasser (STRÖCKE, 1932) ermittelten Häufigkeitswerte für einige Natursteingruppen angegeben.

Da die Temperaturdehnung nur ein sehr kleiner Wert, andererseits der Elastizitätsmodul aber stets ein sehr großer Wert ist, so kann der absolute Dehnungsbetrag erhebliche Ausmaße annehmen und große Spannungen hervorrufen, die bei Nichtbeachtung von Vorichtsmaßregeln Schäden im Bauwerk verursachen können.

Ein vom Verfasser behandelter Schadenfall sei als einfaches, aber drastisches Beispiel angeführt.

Auf dem Flachdach eines großen öffentlichen Bauwerkes zog sich als Abschluß um den gesamten Dachgarten eine Brüstung von auf

<sup>1)</sup> Zeitschrift für Instrumentenkunde 45, 374 (1925).

Ballustern ruhenden Sandsteinplatten. Die Sandsteinplatten waren durch Eisenklammern miteinander verbunden, die Stoßfugen zwischen den Platten mit Zementmörtel ausgefüllt. Die Brüstung stand zwischen zwei massiven Mauerwerkstürmen, in der Mitte befand sich eine Auskragung. Es hatten sich schwere Schäden eingestellt: einige Balluster in der Nähe der Auskragung waren gerissen, einige standen schief und zwei waren auf den Gehsteig der Straße gefallen. Es ergab sich folgender Sachverhalt:

Im Spätherbst wurde das Dach stets auf Schäden untersucht. Dabei war festgestellt worden, daß die Sandsteinplattenverankerung an verschiedenen Stellen gelöst war und daß die Fugen offen standen. Die Fugen wurden mit Zementmörtel gedichtet, um das Eindringen von Wasser, Eis und Schnee zu verhindern. Jahr für Jahr wiederholte sich diese Ausbesserung. Nach 20 Jahren wurden die erwähnten Schäden wahrgenommen.

Als Ursache wurden Längenänderungen durch abwechselnde Temperaturdehnung und -zusammenziehung festgestellt. Die im Sommer sich dehnenden Platten zogen sich in kühlerer Jahreszeit wieder zusammen, die hierdurch entstehende Schrumpfungslücke wurde mit Zementmörtel ausgefüllt, und allmählich verschob sich die ganze Brüstung zwischen den als Widerlager dienenden festen Türmen nach der Auskragung und Ausweichstelle hin.

Die mittlere lineare Ausdehnung des Sandsteines, parallel zur Schichtung, war mit rund  $13 \times 10^{-6}$  ermittelt worden.

Bei einer Temperaturspanne  $-20$  bis  $+40^\circ$  hat sich bei 30 m Länge der Sandsteinbrüstung ein Gesamtverschiebungsbetrag von  $0,000013 \times 60 \times 3000 = 2,34$  cm ergeben.

Dadurch, daß die Fugen wiederholt mit Zementmörtel ausgefüllt wurden, fand eine Gesamtverschiebung um einen weit höheren Betrag statt. Obgleich ein Teil der Dehnung durch die Konstruktion als Spannung aufgenommen und ausgeglichen werden konnte, so ist dennoch der Schaden entstanden.

Plastischer, leicht verformbarer Fugenverguß wurde nach Instandsetzung unter Berücksichtigung der notwendigen Dehnungsfugenbreite zur Dichtung gewählt, so daß eine Wiederholung des Schadens ausgeschaltet wurde.

Aus dem ausführlich beschriebenen Beispiel ist zu erkennen, wie groß Dehnungsbeträge auch bei Naturstein sein können. Im vorliegenden Falle war eine Ausweichmöglichkeit vorhanden. Bei fester Einspannung und der Unmöglichkeit des Ausdehnens zwischen zwei blockierten Einspannstellen äußern sich diese Dehnungen in Spannungen, die das Material bis zur Elastizitätsgrenze, die bei Naturstein sehr dicht an der Bruchgrenze liegt, aufnimmt. Wird diese überschritten, so tritt die Zerstörung des Bauteils ein.



Aus dem Abschnitt über die elastischen Eigenschaften haben wir gesehen, daß die Längenänderungen zum Hervorrufen bedeutender Spannungen um so kleiner zu sein brauchen, je schwerer das Gestein verformbar ist, oder, wie man sich auch ausdrückt: je „härter“-elastisch das Gestein, oder je höher der Elastizitätsmodul des Gesteins ist. Vorausgesetzt ein Basalt hat eine Druckfestigkeit von  $3000 \text{ kg/cm}^2$ , so würde bei fester Einspannung bei seinem hohen E-Modul von  $1\,000\,000 \text{ kg/cm}^2$  die Längenänderung

$$l = \frac{1}{30} \text{ cm auf } 10 \text{ cm Meßlänge oder } 0,33 \%$$

betragen; diese würde aber schon genügen, um die Zerstörung herbeizuführen.

Für große Gewölbe, Pflaster mit Zementfugenverguß und alle Bauteile, in denen Temperaturdehnungen auftreten können, werden daher vorzugsweise Gesteine mit niedrigem E-Modul genommen, da die auftretenden Dehnungen vom Gestein „weich“-elastisch, „federnd“, aufgenommen und die Temperaturspannungen dementsprechend niedriger gehalten werden.

Auf die Verhältnisse im Straßenbau sei noch mit einigen Worten eingegangen, da vielfach in Schlesien in den Städten verwendetes Großpflaster und auf den Reichsautobahnen Kleinpflaster mit Zementfugenverguß hergestellt wird. Der Granit als saures Ergußgestein gehört zu den leichter verformbaren Gesteinen. Die Erfahrungen, die mit ihm gemacht worden sind, sind durchweg gute, auf schlesischen Straßen. Es sind aber Fälle bekannt geworden, bei denen die Pflasterdecke sich gewölbt hat und unter der Verkehrsbeanspruchung geborsten ist. Den Grund hierfür gibt folgende Überlegung:

Werden die Decken im Spätherbst verlegt und mit Zementmörtel vergossen, so erleiden die Einzelsteine bei Sonnenbestrahlung im Sommer eine Wärmeausdehnung, die zu dem Maß, das sie im kühlen Herbst hatten, in ungleich hohem Verhältnis steht. Werden nun noch basische Gesteine mit hohem Elastizitätsmodul, von dunkler Farbe und hohem Wärmeschluckvermögen verarbeitet, so können bei lebhafter Sonnenbestrahlung die fest eingespannten Fahrbahndecken nur nach oben ausweichen, und es kommt zu explosionsartigen Aufbrüchen.

Von Fall zu Fall wird es daher notwendig sein, Dehnungsfugen anzubringen. Besonders wichtig sind diese Dehnungsfugen auch bei kombinierten Beton-Natursteinbauweisen, wo der Naturstein nur als Verblendplatte vorgesetzt ist. Gerade bei der Schrumpfung in kalter Jahreszeit werden die Bauglieder auf Zug beansprucht, und dem „zugempfindlichen“ Naturstein ist eine genügende und leichte Ausweichmöglichkeit zu geben. Gegen diese Regel wird bei Natursteinverblendungen noch oft verstoßen, Dehnungsfugen werden häufig vom

Stein überbrückt und beiderseitig blockiert, so daß ein Zerreißen der Verblendung unumgänglich ist <sup>1)</sup>).

Die angeführten Beispiele, die sich beliebig vervielfachen lassen, dürften wohl den Nutzen der Kenntnis der Stoffkonstanten des als Baustoff verwendeten Natursteins erkennen lassen. Beim Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Eigenschaften können durch Vernachlässigung Schäden und Gefahren entstehen. Der Baustoff „Naturstein“ ist niemals in seiner Güte zu normalisieren; wegen seiner vielseitigen Verwendung sind seine vielseitigen technischen Eigenschaften weiter eingehend zu erforschen, damit sie bis zur Leistungsgrenze ingenieurmäßig ausgenutzt werden. Überdimensionieren ist bequem, aber vom Ingenieur und vom Wirtschaftler aus unsachgemäß. Unterdimensionieren ist gefährlich und schadenbringend. Für eine wirkliche werkgerechte Nutzung des Natursteins, die den Ansprüchen nach jeder Richtung hin genügt, ist daher eine weitgehende Kenntnis der einzelnen Stoffkonstanten eine unumgängliche Notwendigkeit.

### b) Für die Geologie

Wie der Geologie durch die Kenntnis der Stoffkonstanten der Natursteine genutzt werden kann, soll hier nur behandelt werden, soweit es sich um „Festgesteine“, also nicht um lockere Böden, handelt. Die Bearbeitung der letzteren gehört in das Sondergebiet der Bodenmechanik.

Bei allen orogenetischen Vorgängen wird die Gesteinskruste auf ihre Festigkeit beansprucht, und man muß sich stets fragen: „Was für mechanische Eigenschaften und Beanspruchungen können der Erdkruste zugeschrieben bzw. zugemutet werden?“

Daß man sich in der Geologie auch mit der technischen Beanspruchungsmöglichkeit der Gesteinsschichten befaßt, um tektonische Vorgänge zu erläutern, ist maßgeblich durch die Arbeiten von CLOOS (1928, 1931, 1936), SEIDL (1930 und 1934), SCHMIDT (1932), TROMP u. a. gefördert worden.

### I. Porengehalt und Erdölführung

Nicht nur auf reine Festigkeitsbegriffe ist die Wichtigkeit der Stoffkonstanten beschränkt, schon einfache physikalische Eigenschaften: z. B. Gewichts- und Porositätsverhältnisse können praktische Bedeutung erlangen.

<sup>1)</sup> Wärmeleitzahl Granit 2,7—3,5

Basalt 1,1—2,4

Spezifische Wärme 0,20—0,22

Absorptionsverhältnis 0,45—0,75 (Asphalt 1,0).

(Aus G. Weil: „Untersuchungen über das Entstehen und Verschwinden von Glatteis.“ Straßenbau-Jahrbuch 1937/38, S. 189; Verlag: Volk und Reich, Berlin 1938.

## Gewichts- und Porositätsverhältnisse

Die Erdölgeologie z. B. legt seit einiger Zeit Gewicht auf die Bestimmung der Porosität der Gesteine, um sich ein Bild über die Möglichkeit und Größe der Erdölführung verschiedener Schichten zu machen. Es ist hierbei notwendig, das Raumgewicht des Gesteins, d. h. das Gewicht 1 cm<sup>3</sup> einschließlich Poren, und das spezifische Gewicht, d. h. 1 cm<sup>3</sup> porenfreie Masse, zu bestimmen, um aus dem Quotienten, r/s den Gehalt an Gesamtporen in Prozenten zu errechnen.

$$P = (1 - r/s) \cdot 100.$$

Dieser Gehalt an Poren („wahre“ Porosität) nutzt an sich noch nicht viel für die Beurteilung der Erdölführung und -bewegung, da er keinen Aufschluß darüber gibt, ob die Poren untereinander Verbindung haben, oder ob sie vollkommen abgeschlossen sind.

Diese Feststellung ist durch die Bestimmung der Wasseraufnahme und zwar unter normalem Luftdruck und unter 150 Atmosphären Druck nach vorherigem Entlüften zu machen („scheinbare“ Porosität). (Vgl. Abschnitt „Bauwesen“ S. 72.)

Verfasser ist der Ansicht, daß der Wert der verschärften Wassersättigung als Richtwert einzusetzen ist, da Druck, Temperatur und lange Zeiträume die Porenfüllung vollkommener zustandebringen, als eine normale Luftdruck-Flüssigkeitslagerung. Tafel III a und b zeigt vom Verfasser in den Jahren 1937/38 ermittelte Werte für die „wahre“ und „scheinbare“ Porosität. Bei den meisten Sandsteinen nähern sich die Werte auf wenige Prozent.

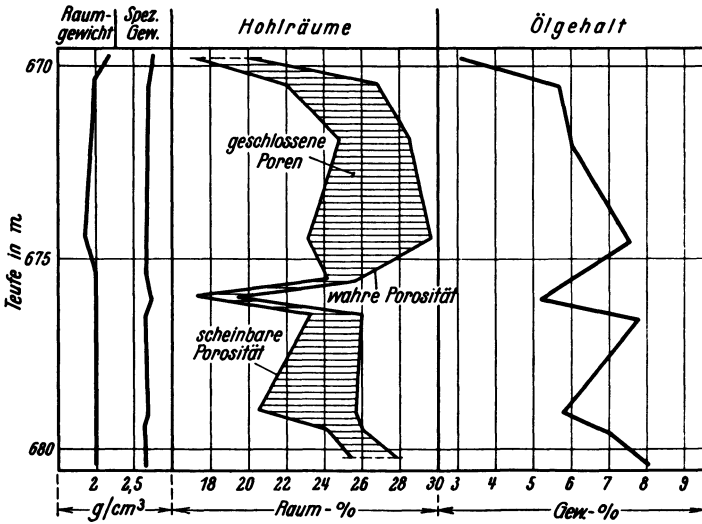
## II. Bruchlose Verformung und tektonische Fragen

Für den gesamten tektonischen Bereich sind die Fragen der Verformung von weitgehender Bedeutung. Dehnungen und Elastizitätszahlen (E-Modul) ändern sich mit jeder Spannungsänderung im Gebirge.

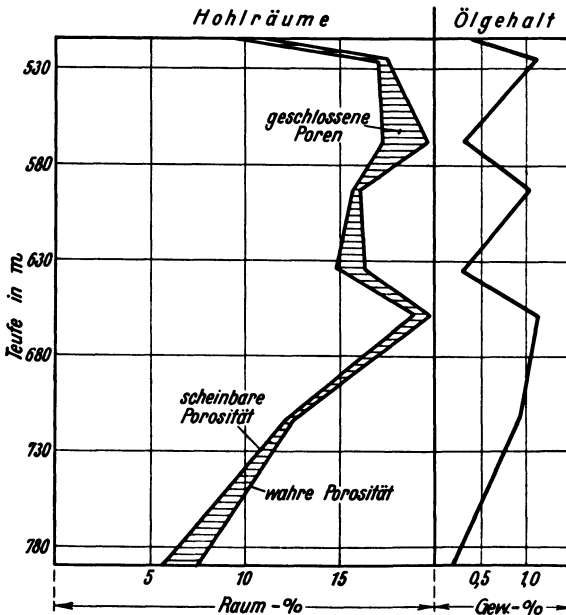
Durch Abtragung, Abschmelzen von Eis, Temperaturerniedrigung werden Spannungen herabgesetzt, durch Sedimentation, Neubildung von Eisdecken und Temperaturzunahme werden sie erhöht. Wir haben hier in den Einzelfaktoren und im Zusammenwirken derselben eine Reihe von Möglichkeiten, die den Spannungszustand vielseitig ändern können.

Rein hydrostatisch gesehen wird die Sedimentsüberlagerung von Festgestein im Durchschnitt mit 250—280 kg/cm<sup>2</sup> auf 1000 m anzusetzen sein.

Die Spannungszunahme überträgt sich jedoch auch horizontal, und hier ist vorläufig nicht mehr auszusagen, als daß das Verhältnis von Querdehnung : Längenänderung = Poissonsche Konstante allgemein zu 0.27 angesetzt wird.



Tafel IIIa. Gewichts- und Porenverhältnisse von Sandstein aus verschiedenen Teufen einer Bohrung im Vergleich zur Erdölführung.



Tafel IIIb. Porenverhältnisse im Sandstein aus verschiedenen Teufen einer Bohrung im Vergleich zur Erdölführung.

Ob dieses Verhältnis wirklich als ein so festes für alle Gesteine angesehen werden kann, sei noch dahingestellt; jedenfalls scheint es, daß bei bekanntem E-Modul und bei bekannter Spannung die Quer-

dehnung aus der Längenänderung wenigstens größenordnungsmäßig zu errechnen ist. Sicher ist es, daß sich um einen Gebirgstheil, der unter größerer senkrechter Belastung bzw. Spannung steht, auch nach den beiden anderen Hauptrichtungen durch die Querdehnung Spannungen um den axial verformten Teil bilden.

Unsere Erkenntnisse über den Ablauf der Gesteinsverformung gehen noch nicht weit über die experimentellen Verformungen unter einseitig gerichteten Hauptspannungen hinaus, wobei der Mantel-Druck der beiden anderen Spannungsrichtungen eben nur durch die Atmosphäre ( $1 \text{ kg/cm}^2$ ) ausgeübt wird.

Erst die neuesten Arbeiten von W. SCHMIDT (1937) ergänzen die von TH. v. KAHRMAN aus dem Jahre 1911 und die von R. BÖKER (1915), ADAMS und WILLIAMSSON (1923), ROS und EICHINGER (1928) und GRIGGS (1936).

Immerhin wissen wir einiges über das Relativverhalten der verschiedenen Gesteine unter gleichen Verhältnissen zueinander und über die Gesetzmäßigkeit der Verformung bestimmter Natursteinklassen. Stets müssen wir uns klar sein, daß es nicht möglich ist, aus technischen Versuchen im Laboratorium tektonisches Verhalten von Erdschichten vollkommen abzuleiten, da der Faktor Zeit, eintretende Stoffzufuhr und -abfuhr, Wechsel der Kristallisationsverhältnisse u. dgl. das Festigkeitsverhalten vollkommen ändern können. Im Laboratorium hingegen haben wir es meist mit konstanten einfachen Verhältnissen zu tun; wenn schon Druck und Temperatur geändert werden und den Auswirkungen im Gebirgskörper nachgeahmt werden könnten, so ist die Zeiteinwirkung niemals vollkommen zu erfassen. Trotzdem bringt die Erkenntnis über die Wechselwirkung zwischen Chemismus-Mineralgehalt, Gefüge, Schichtenbau, Porengehalt, Richtung des Kraftangriffs in bezug auf die Schichtung so viel Klärendes, daß dies für die Vorstellung des Verformungsablaufes von Gesteinen und die allgemeine Tektonik nicht zu entbehren ist.

Die im Abschnitt „Bauwesen“ erwähnte Untersuchung von H. BREYER (1929) und SAENGER-STÖCKE klärte schon unter Heranziehung der Arbeiten von REICH (1927, 1 u. 2), ADAMS u. COKER und ADAMS u. WILLIAMSSON, daß beim Vergleich deutscher Gesteinsgruppen mit gleichartigen amerikanischer Herkunft durchweg die basischen einen höheren Elastizitätsmodul haben, der zwischen 700 000 und 1200 000  $\text{kg/cm}^2$  liegt, als die sauren mit einem E-Modul zwischen 300 000 und 600 000  $\text{kg/cm}^2$ . Diese Feststellung bedeutet, daß die Ermittlung der elastischen Eigenschaften für die Geologie von allgemeinem Interesse sein muß, und daß ihr eine grundsätzliche Bedeutung zuzubilligen ist.

Für Sedimente ist der Vergleich nicht so einfach wie bei massigen Erstarrungsgesteinen. Während man das erstarrte vulkanische Ge-

stein technisch im großen als einen etwa homogenen Körper ansehen kann, ist die Veränderlichkeit der Schichtgesteine, sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen eine sehr bedeutende. Im allgemeinen läßt sich sagen, daß die jüngeren, durch Überlagerungsdruck und Tektonik wenig beeinflussten Gesteine größere Verformbarkeit, also kleineren Elastizitätsmodul, besitzen, als die älteren Sedimente. Eine systematische Untersuchung von SCHOENE an Bohrkernen zeigt, wie z. B. Sandsteine in der Vertikalen mit fortschreitender Tiefe ein geringeres Verformungsvermögen aufweisen oder wie — mit anderen Worten — der Elastizitätsmodul mit zunehmender Teufe größer wird. Im engen Zusammenhang steht diese Abnahme der Verformbarkeit bzw. die Zunahme des E-Moduls mit dem Sinken der Porosität, worauf SCHOENE ebenfalls hinweist und welche Tatsache REICH (1933) und STÖCKE-HERRMANN-UDLUFT (1934, 1936) schon früher behandelt haben.

Durch die erwähnte Arbeit von STÖCKE, die im bergbaulichen Interesse gemeinsam mit HERRMANN und UDLUFT durchgeführt wurde, sind für Sedimente folgende Gesetzmäßigkeiten klargelegt worden, die Allgemeingültigkeit zu besitzen scheinen.

Bei Druckbeanspruchung geschieht der Ablauf der Verformung bei Kalkstein, Sandstein und Tonschiefer derart, daß (Abb. 7<sub>1</sub> und 2).

1. die Gesamtformänderung etwa gradlinig und stetig mit wachsender Spannung zunimmt.

a) Bei trockenen Kalksteinen und Tonschiefern ist die Verformung bei gleichen Spannungen kleiner als bei Sandsteinen. Z. B. beträgt bei einer Reihe karbonischer Gesteine bei einer Spannung von 250 kg cm<sup>2</sup>, d. h. 1000 m Überlagerungsdruck, die Gesamtformänderung für

Gesteinsart	Richtung des Kraftangriffs zur Schichtung	
	senkrecht	parallel
Kalkstein	0,05 ‰	0,03 ‰
Tonschiefer	0,15 ‰	0,06 ‰
Sandstein	0,20 ‰	0,15 ‰

b) Bei feuchten Gesteinen ist die Gesamtformänderung durchweg größer als bei trockenen. Bei Sandstein und kalkgebundenem Kalkstein ist der Unterschied nicht so groß, wie bei Tongestein und mergeligem Kalkstein. Umgerechnet auf die gleiche Spannung von 250 kg/cm<sup>2</sup>, die die meisten Tongesteine im durchfeuchteten Zustand bei einfacher axialer Belastung (ohne Manteldruck) nicht aushalten, beträgt die Gesamtverformung bei

30 Proben etwa das 3 fache.

40 Proben etwa das 5 fache.

10 Proben etwa das 15 fache

der Verformung von trockenen Gesteinen. Auch bei rauheren Tonschiefern und Sandschiefern ist die Steigerung der Formänderungsmöglichkeit durch Feuchtigkeit erheblich. Sie wurde bei

5 Proben um das 1,5fache,  
12 Proben um das 3fache und bei  
10 Proben um das 5fache

gesteigert.

Die angegebenen Mittelwerte wurden aus zahlreichen Einzeluntersuchungen gebildet, die zum Teil in den angegebenen Arbeiten (STÖCKE-HERRMANN-UDLUFT 1934, 1936) veröffentlicht sind und zusätzlichen Messungen entstammen, die an Proben des Aachener Steinkohlenreviers (Grube Alsdorf, Carl Alexander, Carolus Magnus und Sophia Jacoba) und des Siegerlandes (Grube Eisenzecher Zug, Neue Haardt, Storch u. Schöneberg) vom Verfasser ausgeführt wurden und nach Abschluß der Versuche in einer Sonderarbeit veröffentlicht werden.

c) Bei Salzgesteinen hingegen ist die Verformung bei einer derartigen Spannung von  $250 \text{ kg/cm}^2$  bedeutend höher und liegt bei zwei Salzen, die diese Druckspannung überhaupt kurze Zeit ausgehalten haben, ohne sofort zu fließen, nach Untersuchungen des Verfassers (STÖCKE und BORCHERT) bei  $1,5 \%$ .

2. Während bei Kalkstein, Sandstein und trockenem Tonschiefer, wie bei allen Erstarrungsgesteinen, der Hauptanteil der Formänderung elastischer (federnder) Natur ist und der plastische Anteil von der Gesamtverformung bis kurz vor der Bruchlast nur  $10\text{--}20 \%$  ausmacht, übersteigt der plastische Anteil an der Verformung diese  $20 \%$ -Grenze schon für

Steinsalz, Hartsalz und Sylvinit bei  $100\text{--}125 \text{ kg/cm}^2$  Druckspannung,

Basissalz bei  $50 \text{ kg/cm}^2$  Druckspannung,

Liniensalz bei  $25 \text{ kg/cm}^2$  Druckspannung.

Als plastischer Anteil wurde in der erwähnten Untersuchung für die verschiedenen Salzarten in zwei Spannungsgrenzen folgender plastischer (bleibender) Betrag der Formänderung ermittelt:

Salzart	Plastischer Anteil in Prozent Spannungsbereich	
	0—75 kg cm <sup>2</sup>	bis 150 kg cm <sup>2</sup>
Steinsalz		
Hartsalz	6—10	40—45
Sylvinit		
Basissalz	33	90
Liniensalz	60	95





formung geht bei wachsenden Spannungen verloren. Die Verformungen nehmen schneller zu, so daß die Kurven für die Verformung von vornherein einen konvex gekrümmten Verlauf nehmen, wenn, wie üblich, auf der Ordinate die Spannungen und auf der Abszisse die Dehnungen aufgetragen werden.

b) Durch Feuchtigkeit wird der Grad der Durchbiegung bei Tonschiefern erheblich heraufgesetzt; bei Sandsteinen wächst die Zunahme nicht so stark.

c) Der Anteil der bleibenden (plastischen) Formänderung ist bei gleichen Laststufen für trockenen Tonschiefer durchweg kleiner ermittelt worden als für Sandstein. Die Sandschiefer stehen als Bindeglied zwischen den Tonschiefern und den Sandsteinen. Erst bei

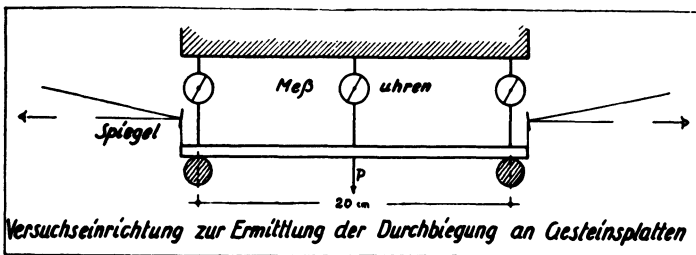


Abb. 8. Gerät zur Ermittlung der Durchbiegung von Gesteinsplatten.

Feuchtigkeitszutritt wächst der plastische Anteil bei Tonschiefer erheblich, und er kann schon bei  $75 \text{ kg/cm}^2$  Spannung  $50\%$  der Gesamtverformung ausmachen, während er bei den untersuchten Sandsteinen bei gleicher Spannungsstufe  $25\%$  nicht überschreitet (Abb. 7, 2 a).

5. Entsprechend dem Verhalten bei Biegebeanspruchung weist der aus dem federnden Anteil der Durchbiegung errechnete E-Modul folgende Unterschiede auf:

Kalkstein	E-Modul =	450—700 000	kg cm <sup>2</sup>
Tonschiefer	„	= 300—550 000	„
Sandstein	„	= 90—300 000	„

Diese Werte gelten für trockenes Gestein. Der Einfluß der Feuchtigkeit, der schon bei druckbeanspruchten Proben besprochen wurde, macht sich bei den biegebeanspruchten Proben noch stärker bemerkbar. Die Werte für den E-Modul fallen etwa um das Fünf- bis Zehnfache. Die Ursache hierfür ist, daß in der Zugzone der Platten eine Trennung der Einzelteilchen auseinander und ein Gleiten derselben stattfindet, während es sich bei Druck um ein Stauchen oder um ein Gleiten unter erhöhter Reibung handelt.

Aus diesem unterschiedlichen Verhalten der verschiedenen Sedimente bei gleichen Druck- und Zugspannungen erklärt sich schon, daß die tektonischen Typen, die Art der Falten und der gesamte

Ablauf der Faltung weitgehend von den elastischen und plastischen Stoffkonstanten beeinflusst werden müssen. Nimmt man nun noch hinzu, daß die Eruptiva, je nachdem sie zum sauren oder zum basischen Typus rechnen, bis etwa  $250 \text{ kg cm}^2$  vollkommen elastisch sind und mit einem E-Modul von 400 000 bis 1 000 000 sich bei entsprechenden Spannungen nur um einen Betrag verformen, der  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{1}{100}$  unter dem für Sedimente liegt, so wird einem klar, daß diese Verschiedenheit der Mobilität auf den Ablauf tektonischer Vorgänge wirken muß.

Als praktisches Beispiel sei angenommen, daß bei einer Sedimentüberlagerung von 1000 m Mächtigkeit ein Sandstein, bei der Beschaffenheit der bisher geprüften, eine Zusammendrückung von 0,25 ‰ erfährt.

$$\begin{aligned} 1000 \text{ m} &\sim 250 \text{ kg cm}^2 \\ \text{E-Sandstein} &\sim 100\,000 \text{ kg cm}^2 \\ \Delta l &= \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{250 \cdot 10}{100\,000} = 0,025 \text{ auf} \\ &10 \text{ cm Meßlänge:} \\ &\text{auf 1 m} = 0,25 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Bei 100 m Sandsteinmächtigkeit wären das 25 cm. Tritt nun durch teilweise Abtragung wieder an einer Stelle Entlastung ein, so wird der unter seiner Elastizitätsgrenze belastete Sandstein sich zurückformen, und es werden Zerrungen durch Scherspannungen in der Nähe der noch durch Überlagerung blockierten Teile auftreten, die über die bruchlose Faltung zu jeglicher Bruchtektonik führen können.

Immer werden wir für das Maß der Spannungen und Verformungsmöglichkeiten aus der Anstrengung des Gesteins einen Wert aus Schichtmächtigkeit, Schichtgewicht und Elastizitätsmodul der Schicht finden, der unsere rein gefühlsmäßigen Anschauungen nach der technischen Möglichkeit hin sichert oder uns den rechten Weg zeigt.

Bei Wechsel der Überlagerung durch Gletscher oder Inlandeis werden die Maße der elastischen Zusammendrückung und Dehnung bestimmt unterschätzt. Gerade die elastische Nachwirkung bringt mit der Formänderung Spannungen in das Gestein, die erhebliche tektonische Verformungen auslösen können.

Als Beispiel der elastischen Nachwirkung sei ein vom Verfasser ausgeführter Versuch angeführt (Abb. 9 a und b). Ein Sandschiefer, der 2 Stunden unter einer Spannung von  $100 \text{ kg cm}^2$  gestanden hatte, zeigte eine Längenänderung von 1100 Einheiten. Nach vollkommener Entlastung erholte sich das Gestein federnd und formte sich um über die Hälfte, nämlich auf 450 Längeneinheiten, zurück. Nach 2 Stunden Entlastungsdauer hatte sich das Gestein um weitere 50 Längeneinheiten erholt, d. h.: bis zur endgültigen Erreichung des Gleichgewichtszustandes war noch eine Längenzunahme von etwa 10 ‰ zu verzeichnen.

An Stellen, wo diese elastische Nachwirkung im Untergrunde stattfindet, wird ein von unten gerichteter Druck erzeugt und Schichten, die an den Rändern blockiert sind, werden nach oben verbogen. Bei dieser Biegung kann dann all das in der konvexen Zug- und in der konkaven Druckzone eintreten, was schon von CLOSS (1936), SMOLUCHOWSKY und anderen diskutiert worden ist.

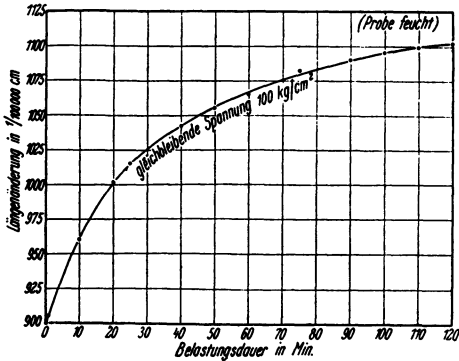


Abb. 9 a. Elastische Nachwirkung bei Dauerlast. Sand­schiefer.

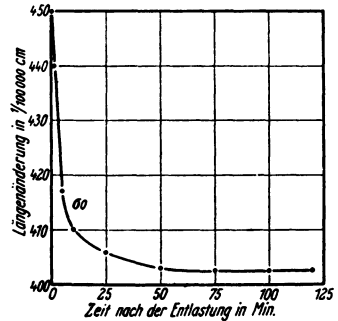


Abb. 9 b. Elastische Nachwirkung nach Entlasten. derselbe.

In der Platte treten zu beiden Seiten der neutralen Faser Schiebungen in entgegengesetzten Richtungen auf. Die Zugzone wird bei Überschreiten der Biegefestigkeit durch Klüftung aufgeteilt und entspannt werden. In der Druckzone, in der die Spannungen um das Zehn- bis Fünfzigfache steigen können, wird der später eintretenden Zerstörung weitgehende Verformung, die im inneren Kern einen hohen plastischen Anteil haben und zur Kleinfältelung führen kann, vorausgehen. Aus Abb. 10 nach NADAI (1915, 1925) ist die Bildung der plastischen Zone an den Scheiteln der auf Biegung beanspruchten Platte zu erkennen.

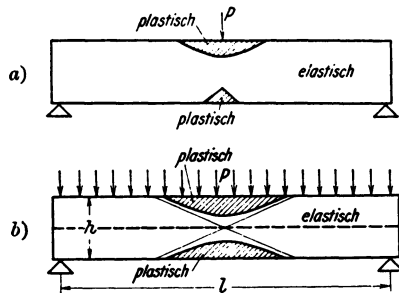


Abb. 10. Bildung plastischer Zonen bei Überlastung eines Balkens. a) bei Einzel­last. b) bei gleichmäßig verteilter Last (nach NADAI)

Es wurde schon früher häufiger von CLOSS (1928), BORN u. a. darauf hingewiesen, daß die Schichtmächtigkeit beim Stauchen und Biegen den Verformungsablauf entsprechend beeinflusst, — daß dünne Schichten enger, dicke weiter und höher gefaltet werden.

Ein exakter technischer Begriff, der bei diesen Überlegungen weiterhilft, und der die Faktoren enthält, von denen die Biegefähig-

keit plattenförmiger Körper abhängig ist, ist der der „Plattensteifigkeit“. Nicht allein die Mächtigkeit, sondern auch der Elastizitätsmodul sind ausschlaggebend für die Formbarkeit einer Platte oder Schicht.

In der Formel<sup>1)</sup>

$$N = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \text{ in cmkg}$$

bedeuten

E = Elastizitätsmodul des Gesteins,

h = Schichtmächtigkeit,

$\nu$  = Querdehnung (vorläufig zu 0,27 angenommen).

Der Einfluß der Schichtmächtigkeit ist, wie aus der Formel erkenntlich — da diese in der dritten Potenz eingesetzt wird — erheblich; die Querdehnung als sehr kleine Zahl kann vernachlässigt werden. Gleichen Elastizitätsmodul vorausgesetzt verhalten sich zwei ungleich mächtige Schichten wie folgt:

Fall	Mächtigkeit	Biegesteifigkeit
a	klein	klein
b	groß	groß

Ähnlich ausschlaggebend für das Verformungsvermögen ist die Schichtdicke bei einfacher Druckbeanspruchung. Hier spricht der Techniker von der „Federkonstanten“ eines Körpers. Diese wird berechnet nach der Formel<sup>1)</sup>

$$C_0 = \frac{F \cdot E}{D},$$

F ist die gedrückte Fläche, E der Elastizitätsmodul der Schicht und D ihre Mächtigkeit.

Bei gleichen beanspruchten Flächen (cm<sup>2</sup>) ist die Federkonstante in kg/cm für:

Fall	E-Modul	Schichtmächtigkeit	Federkonstante
a	klein	groß	klein
b	groß	klein	groß.

An diese beiden Begriffe der Biegesteifigkeit und der Federkonstanten anknüpfend wird es klar, daß beim Nebeneinander von Schichten verschiedener Mächtigkeit und elastischer Eigenschaften ein ungleichmäßiger Verformungsablauf in den einzelnen Schichten im Vergleich zueinander stattfinden muß, wobei so lange bruchlose Verformung der Schichten vor sich geht, bis die Biegezugfestigkeit überschritten und Brüche auftreten. Nicht übersehen darf dabei werden, daß wie aus der Plattenstatik hervorgeht — und auf Seite 91 erwähnt — im Scheitel der Schichten in den Zug- und Druckzonen plastische Verformungen auftreten.

<sup>1)</sup> Vgl. auch Tafel VI „Grundbegriffe“ S. 105.

Als Beispiel eines solchen disharmonischen Verhaltens sei die Darstellung der Salzaufpressung zwischen den Kalischächten Deutschlands und Ronnenberg von SEIDL (1939) gegeben (Abb. 11).

Auch RICHTER gibt eine Darstellung (Abb. 12), aus der das verschiedene Verhalten des Verbandes Salz und Anhydrit deutlich wird.

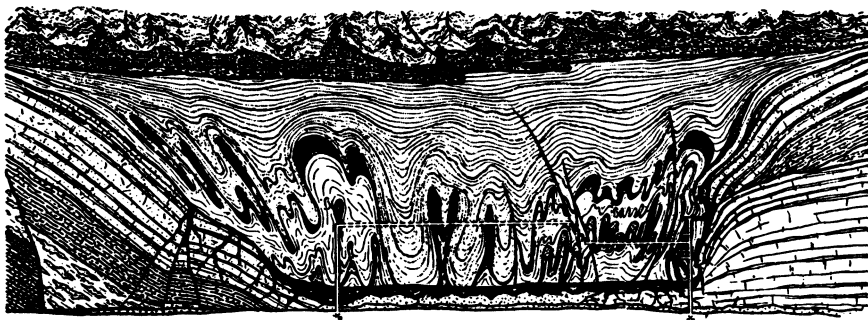


Abb. 11. Disharmonisches Gesteinsverhalten bei Salzaufpressung nach SEIDL („Born“ aus GUTENBERG „Handbuch der Geophysik“ Bd. III, Lieferung 1, S. 369 (21) Abb. 120: Lotze „Seinsalz“ S. 237, Abb. 148).

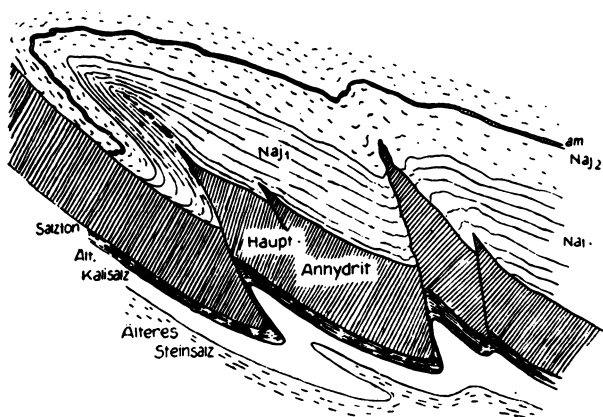


Abb. 12. Bruchlose Verformung von Salz. Schollen-Zerscherung von Anhydrit. (Aus RICHTER: „Hauptanhydrit und Salzfaltung“).

Nach Untersuchungen des Verfassers (STÖCKE u. BORCHERT) beträgt der E-Modul des Salzes 100 000 bis höchstens 300 000  $\text{kg/cm}^2$ , die Fließgrenze liegt bei 10–50  $\text{kg/cm}^2$ , — während der Elastizitätsmodul von Anhydrit bei 850 000–1 000 000  $\text{kg/cm}^2$  und einer Fließgrenze über 1000  $\text{kg/cm}^2$  liegt; denn bei 1000  $\text{kg/cm}^2$  bricht der Anhydrit noch vollkommen spröde ohne Anwachsen des für die Spannung typischen Verformungswertes. In der RICHTERSCHEN Abbildung erkennt man deutlich, wie sich das mobile leicht verformbare Salz

bruchlos verformt und wie es fließt, während das starre („riges“) Anhydrit gebrochen und in Schollen zerschert ist.

### III. Bruchtektonik und Festigkeitsfragen

Solange im Erdinnern vollkommen gleichmäßige hydrostatische Verhältnisse sind — gleiche Druckspannung in allen drei Hauptrichtungen — wird ein Zubruchgehen eines Gebirgstells nicht erfolgen können. Sobald aber durch irgendeine Ungleichmäßigkeit in der Beschaffenheit der unter Spannung stehenden Masse eine Ausweichmöglichkeit nach einer Richtung hin besteht, so erfolgt eine Bewegung von Teilen in dieser Richtung, und die Gesetze der Mechanik von Festigkeit und Verformung sind für den weiteren Ablauf der bruchtektonischen Vorgänge bestimmend.

Der Bruch erfolgt bei Gestein mit hohem Elastizitätsmodul („riges“ Gestein) plötzlich und vollkommen spröde, wenn die Laststeigerung groß und rasch ist. Die im Laboratorium bei der Werkstoffprüfung vorgeschriebene Laststeigerung von  $10 \text{ kg/cm}^2$  je Sekunde ist geologisch gesehen sehr hoch. Vorausgesetzt, daß keine Einspannung des Körpers durch Endflächenreibung zwischen Körper und Druckbacken entsteht, zerfällt der Körper beim Bruch in Schalen, die etwa parallel zueinanderlaufende Grenzflächen haben. Da aber stets Reibung zwischen dem Prüfkörper und den Preßbacken auftritt, geht der Bruch auf eine resultierende zu den Normalspannungen vor sich. Die Richtung hängt ab vom Elastizitätsmodul des Materials und vom Verhältnis der Spannungszunahme zur Verformungsgeschwindigkeit. Die Abb. 13 a und b zeigen einerseits Basalt mit hohem E-Modul, geringerer Endflächenreibung, großer Spannungszunahme und sehr kleiner Verformung, aber hoher Verformungsgeschwindigkeit. Andererseits ist beim Sandstein die Endflächenreibung groß, der Elastizitätsmodul klein, dementsprechend die Verformung hoch und die Geschwindigkeit der Verformung gering. Während beim Basalt wirkliche Kohäsionsrisse aufgetreten sind, ist der Sandstein auf Scherflächen zur Zerstörung gekommen. Streng genommen ist daher die im Laboratorium ermittelte Bruchfestigkeitsgrenze von Prüfkörpern nicht auf Überschreiten der Druckfestigkeit zurückzuführen. Man hat es vielmehr mit der Überschreitung einer resultierenden Kraft aus Druck- und Zugspannungen zu tun, und die ermittelte Festigkeit kommt der Scherfestigkeit des Materials nahe. SCHWINNER (1924, 1929) hat die Meinung gefaßt, daß die Scherkräfte bei tektonischen Vorgängen und Formen wichtiger sind als reine Druckkräfte und daß die Durchbewegung von Gesteinen mit der Gleitung auf Scherflächen verknüpft ist. Bevor dies eintritt, wird eine rückformbare elastische Formänderung erzeugt, die jedes Gestein bis zu seinem Aufnahmevermögen, d. h. bis zu seiner Bruchgrenze, der ein verhältnismäßig kleiner Bereich plastischer Ver-

formung voraufgeht, durchmacht. Salze, Tone, mergelige Kalksteine und Schiefertone in feuchtem Zustande bilden, wie im vorigen Abschnitt

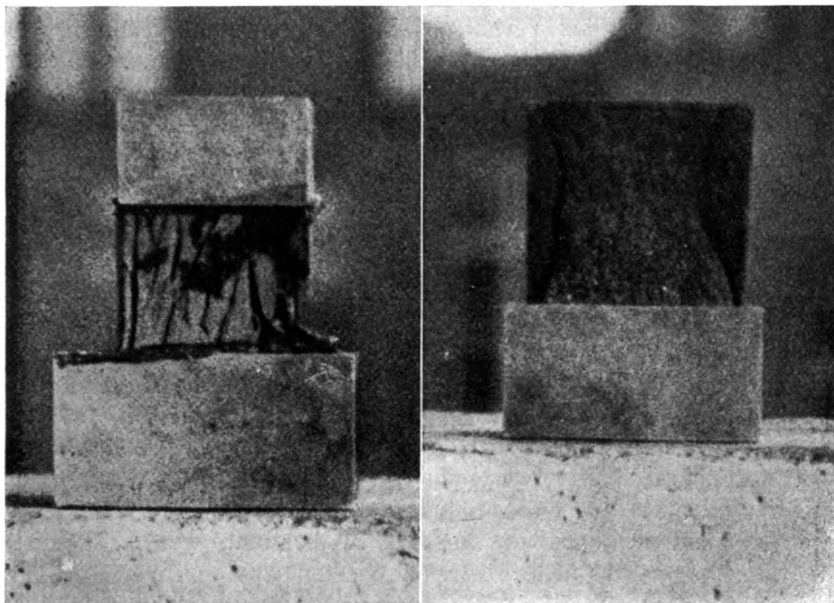


Abb. 13. Verschiedene Bruchformen

a) Basalt-Block  
Kleine Verformung. Hoher E-Modul.  
Hohe Festigkeit. Schlagartig ausgelöste  
Zugrisse.

b) Sandstein-Block  
Große Verformung. Niedriger E-Modul.  
Geringe Festigkeit. Allmähliche Zer-  
störung auf Scherflächen.

besprochen, eine Ausnahme. Mit dem von KUNZE gegebenen Schema wird der Vorgang gut veranschaulicht (Abb. 14).

Auch die von RIEDEL entwickelten Gedanken über die Brucherscheinungen decken sich mit dieser KUNZESCHEN Darstellung, und zusammenfassend ist zu sagen: in der Tektonik sind die Ursachen aller Bewegungen Spannungen im Gebirgskörper; die Größe der Bewegung ist — wie aus dem Vorabschnitt hervorgeht — durch die Stoffkonstanten bestimmt. Die Hauptschwierigkeiten liegen lediglich im Erfassen der zeitlichen Auswirkung. Große Belastungszeiten ver-

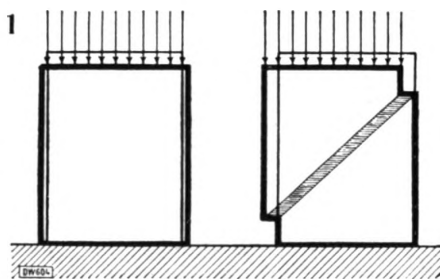


Abb. 14. Schema des Unterschiedes zwischen elastischer und plastischer Verformung.

Die elastische Verformung ist ein kontinuierlicher, durch die Elastizitäts-Theorie erfassbarer Vorgang, die plastische Verformung eine quantenhafte, durch die Elastizitäts-Theorie nicht erfassbare Erscheinung.

Die Hauptschwierigkeiten liegen lediglich im Erfassen der zeitlichen Auswirkung. Große Belastungszeiten ver-

schieben die Gesetzmäßigkeiten, die für den Augenblickversuch gelten. Die einzige Möglichkeit des Aufbaues tektonischer Experimente liegt darin, mit der Größe des Modells auch sämtliche Materialkonstanten herabzusetzen und das Verhältnis von Ausmaß und Materialeigenschaften zu wahren. KIENOW macht darauf aufmerksam, und unter diesem Gesichtswinkel müssen die von CLOOS angestellten Tonversuche betrachtet werden. Klar wird aber auch daraus, daß das Primäre immer die der Schichtenfolge eigenen Stoffkonstanten sind. Daher müssen diese Konstanten zunächst ermittelt werden, damit die Aufbau- stoffe für ein Modell, an dem das Verhalten einer Schichtenfolge geklärt werden soll, in das richtige Verhältnis gebracht werden können.

Über Scherfestigkeiten sind leider nur sehr wenige Versuche ausgeführt worden, und mit dem häufig in der Literatur angegebenen Verhältnis der Scherfestigkeit zur Druckfestigkeit, wie 1 : 10 bis 1 : 15, ist wenig anzufangen. Einige vom Verfasser ermittelte Werte haben mit anderen von HANISCH (1892, 1901) und BAUSCHINGER zu den in der Tafel II angegebenen Mittelwerten geführt. Ergänzend hierzu seien noch häufige Mittelwerte für Druck-, Biege- und Scherfestigkeit einiger Sedimente aus dem produktiven Karbon und aus dem Devon verschiedener Bergbaureviere in Tafel IV bekanntgegeben. Ermittlung und Sammlung von Festigkeitswerten aus den verschiedenen geologischen Horizonten — eine Arbeit, die im einzelnen sehr langwierig und eintönig erscheint — können nur dazu beitragen, daß wir in unseren Vorstellungen über die Festigkeiten der verschiedenen Gebirgsschichten weiterkommen; auch hierzu mögen die gemachten Ausführungen anregen.

#### IV. Geophysik

Im großen gesehen gehört die technisch-mechanische Erforschung der Erdrinde als Erweiterung der physikalischen Forschungen in das Gebiet der Geophysik: die Trennung von Geophysik und Geomechanik ist eine unnötige und gewollte.

Wichtig sind die Stoffkonstanten als Unterlagen für die verschiedensten Arbeitsgebiete der angewandten Geophysik.

Die Schweremessung mit Drehwage oder Pendel beruht auf der Auswirkung der Massengewichte. Die Kenntnis der Raumgewichte, d. h. der Kubikmetergewichte, der Gesteine einschließlich der von ihnen umschlossenen Poren ist für Schweremessungen unbedingt erforderlich. Bisweilen findet man noch Angaben, in denen das spezifische Gewicht der Gesteine zugrunde gelegt worden ist; wie groß die Unterschiede sein können, zeigen die Tafeln II und III. REICH (1933) macht hierauf aufmerksam und unterscheidet zwischen dem „Raumgewicht“ nach HIRSCHWALD und der bestehenden Prüfnorm, bei der angenommen wird, daß die Hohlräume luftgefüllt sind, einerseits, und





artiger Gesteine vorliegen, und ferner, daß Raumgewichtswerte gleichartiger Gesteine, jedoch aus verschiedenen Teufen, möglichst einer Bohrung oder auch aus verschiedenen tektonisch beanspruchten Gebieten zur Verfügung stehen. Hier ergeben sich Unterschiede, die auch bis zu den verhältnismäßig geringen Teufen praktischer geophysikalischer Versuche ausschlaggebend sein können; da den Bestimmungen aber jede Systematik fehlt, sind die bekannten Werte nur

recht vereinzelt im Vergleich zu den möglichen Verschiedenheiten.

Die Ursache der Verschiedenheit des Raumgewichts der Gesteine ist in folgenden Faktoren zu suchen:

- a) Mineralogische Zusammensetzung (vgl. Abb. 15),
- b) Überlagerungsdruck,
- c) Tektonische Einwirkung.

Wie stark sich Überlagerungsdruck und tektonischer Druck auswirken können, zeigt u. a. ein vom Verfasser ausgeführter Versuch mit Kukersit. Eine Säule von 52,2 mm Höhe und 50 mm Durchmesser wurde unter Hebeldruck von insgesamt 2 t, d. h. etwa  $100 \text{ kg/cm}^2$ , belastet und verkürzte sich auf 47 mm. Die Säule war so in einen Sandsteinblock eingepaßt, daß sie sich nach der Seite nicht bewegen konnte. Außer Druckerhöhung wurde auch für Temperaturerhöhung bis auf  $130^\circ$  gesorgt. Das Volumen des Körpers hat bei diesem Versuch von etwa 107 auf etwa  $100 \text{ cm}^3$ , also um 7%, abgenommen. Das Raumgewicht, das bei dem unbeanspruchten Körper etwa 1,9 betrug, ist um etwa 10% auf 2,0 gestiegen. Nach einer Auflast von 19 t, d. h. einer

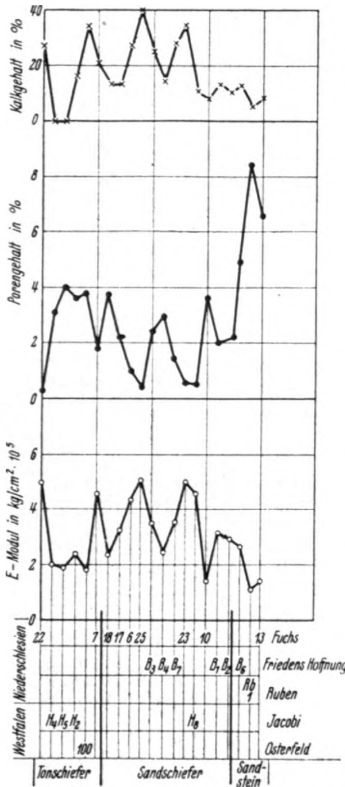


Abb. 15. Elastizitätsmodul abhängig von Mineralzusammensetzung (Kalkgehalt) und Porosität.

Spannung von  $1000 \text{ kg/cm}^2$ , hatte sich der Körper auf etwa 35 mm zusammengedrückt, dementsprechend hat sich das Raumgewicht dieses „Briketts“ nach 28-tägiger Belastung bei Temperatursteigerung auf  $200^\circ$  auf 2,7 erhöht. (Im übrigen hatte der ehemals lockere braune Kukersit jetzt das Aussehen eines festen violettgrauen Schiefers angenommen.)

Damit kann zur Diskussion gestellt werden, ob in einem tektonisch beanspruchten Gebiet und in größeren Teufen die Raumgewichte

normaler Sedimente nicht so ausgeglichen werden, daß eine Trennung nach dem Schweremessungsverfahren nicht mehr möglich ist. F. BREYER macht ebenfalls hierauf aufmerksam und gibt an Beispielen bekannt, wie sich die Werte in größeren Teufen um  $1_{10}$  erhöht haben.

Gleich wichtig wie die Gesteinsgewichte für die Schweremessungen, nur ungleich weniger bekannt, sind die Elastizitätskonstanten für die angewandten seismischen Methoden. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit seismischer Wellen umgekehrt proportional der Dichte und direkt proportional dem Elastizitätsmodul, und dieser eine Zahl von mindestens 4—5 Zehnerpotenzen (a.  $10^4$ — $10^6$ ), so hängt von der Kenntnis der Elastizitätszahl die Zulänglichkeit seismischer Berechnungen ab.

Material liegt aus den im Abschnitt „Bauwesen“ und „Geologie“ angeführten Arbeiten von BAUSCHINGER, H. BREYER (1929) und SAENGER-STÖCKE vor. Dieses umfaßt vornehmlich die Gruppen der Erstarrungsgesteine (vgl. Tafel II). Materialkonstanten zahlreicher Sedimente aus Bergrevieren wurden ebenfalls in diesen Abschnitten bekannt gegeben. Während hier die Auswertung mehr nach der bergbaulichen Seite geschah, wurde in einer neueren Arbeit von SCHOENE die Wichtigkeit der elastischen Stoffkonstanten für die Seismik behandelt. Systematisch wurden von SCHOENE Bohrprofile von Kreideschichten im Zusammenhange mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen untersucht, deren Ergebnisse in Tafel V zusammengestellt sind.

Von REICH (1937) ist in früheren Arbeiten auf diese Zusammenhänge vielfach hingedeutet. Er führt u. a. aus: „Bei verschiedenen Bohrungen hatte es sich gezeigt, daß Tiefen der Oberkreide, die erbohrt waren, nicht mit seismisch ermittelten Schichttiefen übereinstimmen. Es unterlag keinem Zweifel, daß sich die Oberkreide in großer Tiefe elastisch anders verhielt, als in der Nähe der Oberfläche und dadurch ein Geschwindigkeitssprung von 3000 auf 4000 m in der Sekunde erfolgte.“ Bestimmt würde sich der durch Druck umgewandelte Kukersit elastisch vollkommen anders verhalten als das normale Gestein, denn der Elastizitätsmodul hängt maßgeblich vom Porenvolumen und Raumgewicht eines Gesteins ab (Abb. 15). Die Vielseitigkeit der Deutung seismischer Reaktionen kann nur durch ausgedehnte Kenntnis der elastischen Stoffkonstanten eingeschränkt werden. Die im geologisch-tektonischen Teil besprochenen Forschungsergebnisse sind auch für die Seismik nutzbringend zu verwenden. Für die Versuchsarbeiten und Auswertung von Versuchsergebnissen sei noch folgendes angeführt:

1. Zunächst sind für Vergleichsarbeiten die Versuchsbedingungen bei Elastizitätsuntersuchungen im Laboratorium zu normen, da jeder Wert von ganz bestimmten Bedingungen abhängig ist, und nur bei gleicher Versuchsdurchführung Werte miteinander verglichen werden



2. Allgemein gültige Werte für Sedimente gleicher Gesteinsarten sind überhaupt nicht oder nur ganz überschlägig anzugeben, da die Werte von der Vorgeschichte (Tektonik) abhängen.

3. Das anisotrope Verhalten senkrecht und parallel zur Schicht beanspruchter Gesteine beeinflußt seismische Ergebnisse sehr. Die Wellen treffen bei aufgerichteten und gefalteten Schichten anders auf, als bei ungestörten horizontalen Ablagerungen.

Durch die verschiedenartige elastische Reaktion wird die Laufzeitkurve beeinflußt.

4. Wie erwähnt, hängt die Größe des Elastizitätsmoduls ab von dem Spannungsbereich, in dem dieser bestimmt wurde, und es ist nicht möglich, Elastizitätszahlen aus dem Spannungsbereich 0—100 mit denen bis 1000 kg/cm<sup>2</sup> gleichzusetzen. Aus allen Versuchen geht hervor, daß unter höheren Vorspannungen gewonnene Elastizitätszahlen größer sind als solche, die bei kleinen Spannungen erhalten werden.

Ebenfalls von Bedeutung sind noch die physikalischen Eigenschaften: Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit für magnetische und elektrische Feldmessungen. Da deren Ermittlung mehr in das Gebiet der Experimentalphysik, als in das der Gesteintechnik hineingehört, wird darauf im Rahmen dieser mechanisch-technologischen Arbeit nicht eingegangen.

Zusammenfassend soll noch einmal betont werden, daß für geologische und geophysikalische Überlegungen die Kenntnisse der Stoffkonstanten wichtig sind. Jedoch muß man das Experiment richtig einschätzen und nicht überschätzen und bei der Übertragung in die Natur mit seinen Schlüssen vorsichtig sein. Die technischen Konstanten sollen kein „physikalischer Tand“ — wie es HAARMANN nennt — sein, sondern sie sollen dazu beitragen, physikalisch Sicheres und technisch Erkennbares vom Hypothetischen zu trennen, und sie sollen nicht etwa neues Hypothetisches in die geologischen Arbeiten hineinbringen.

### c) Für den Bergbau

#### I. Allgemeines

Während der Bauingenieur die Materialkonstanten seiner zur Verwendung stehenden Baustoffe kennen muß, um unter möglichster Materialersparnis Fehler beim Einsetzen der Werte in den Beanspruchungsplan seines Bauwerkes zu vermeiden, nimmt der Bergmann bei der Entwicklung seines Grubenbaues den umgekehrten Weg. Er geht mit seinem Bauen in den Gebirgskörper, der sich aus Schichten verschiedenster technischer Eigenschaften als gegebenes Konstruktionsfeld zusammensetzt, hinein. Hierdurch bringt er den im Gebirge herrschenden Spannungszustand aus dem Gleichgewicht, und er darf

die Schichten während der Aus- und Vorrichtung und während des Abbaues bestimmter Lagerstättenteile nur soweit schwächen, wie es Druck- und Biegezug-, oder auch Scherfestigkeit zulassen. Die Verformung, die das Gebirge bei der Anlage der Hohlräume durchmacht, ist — solange diese für den Betrieb zugänglich sein müssen — im vornehmlich elastischen Bereich zu halten. Erst im Alten Mann darf unter Beachtung der notwendigen Sicherheitsmaßregeln eine Formänderung durch bruchlose, plastische Verformung oder durch Brucheinwirkung (nach SEIDL „quasi plastische“) eintreten, die zur örtlichen Entspannung des Gebirges führt.

So steht der Bergmann mit der Betrachtungsweise der Eigenschaften des das Gebirge aufbauenden Gesteins zwischen den Auffassungen und Interessenabschnitten des Bauingenieurs einerseits und des Geologen andererseits. Der Bauingenieur kann den als Werkstoff genutzten Naturstein nur innerhalb der elastischen Verformungsgrenze gebrauchen, jenseits der Kohäsionsgrenzen, oder mit dem Eintreten des Fließens während der Lebensdauer seines Bauwerkes wird für ihn der Baustoff als tragender Konstruktionsteil ungeeignet. Der Geologe muß je nach Umständen, Tiefenlagenänderung, Erhöhung der Spannung, Wechsel der Druckrichtungen und insbesondere unbegrenzter Dauer des Spannungszustandes positiv und negativ alle Möglichkeiten der Gesteinsverformung durch Dauereinwirkung (elastische Nachwirkungen) beachten, bei ihm spielt der Bereich des mobilen Zustandes der plastischen Verformung unter Dauerlast eine weit größere Rolle, als in dem kurzen Ausschnitt einer menschlichen Baukonstruktion.

Zwischen beiden Grenzbetrachtungen steht der Bergmann: er hat die Grubenräume so lange, wie er sie zur Gewinnung der Lagerstätte nötig hat, offenzuhalten, mit Ausnutzung des größtmöglichen Spannungsaufnahmevermögens der seine Hohlräume umgebenden Schichten und darf erst dann, wenn er die Wege und Abbauteile nicht mehr braucht, dem Bestreben der Gesteinsmassen, die Lücken wieder zu schließen, nachgeben.

Die Grenzzustände seien in Anlehnung an SEIDL (1939) charakterisiert als:

- a) steif — (elastisch) biegsam, tragend und gespannt,
- b) plastisch oder quasi-plastisch, nachgiebig und entspannt.

Die Forderung, den tragenden Zustand a solange zu wahren, wie der Grubenraum gebraucht wird und dann erst die Gebirgsmassen, die Abbaulücke nachgiebig (Zustand b) schließen zu lassen, wenn sie der Bergmann verlassen hat, ist leichter aufgestellt als erfüllt. Aber im Grunde muß dem Bergmann klar werden, daß er nur im entgegengesetzten Sinne, wie der Bauingenieur konstruiert, und die Forderung, die GÄRTNER auf einer der letzten Sitzungen (1933) des damaligen

Reichskohlenrates lebhaft erhoben hat: „Geophysik vor Ort“ möchte Verfasser für die „Geomechanik“ erweitern.

Die Zeiten, zu denen der Bergmann dem auftretenden Gebirgsdruck und den gefährlichen Gebirgsschlägen vollkommen unabwendbar ausgeliefert war, müssen als vorüber betrachtet werden. Lange sind wir noch nicht so weit, daß das Problem in seiner Vielseitigkeit als gelöst gelten kann, aber der Weg, der durch die Bemühungen zahlreicher Fachgenossen aus dem Bergbau — und insbesondere aus dem Markscheiderwesen — beschritten wurde, ist der richtige. Alle Arbeiten beschäftigen sich damit, aus Beobachtungen — seien sie makroskopischer oder feinmeßtechnischer Art — unter Heranziehen der Erscheinungen aus der technischen Mechanik auf die Ursachen der eintretenden Bewegungen, der Formänderungen und der Bruchformen, die diese Bewegungen zustande bringen, zu folgern.

## II. Auswirkung des Gebirgsdrucks auf die Abbaulücke

Früh setzte sich die Anschauung durch, daß sich die Gebirgsschichten wie eingespannte Platten durch Herausnehmen von Gestein und durch das Schaffen von Hohlräumen verbiegen: LINDEMANN spricht schon 1926 davon, daß sich Schichten „gleichsam wie ein Brett durchbiegen und aufwölben“. Bewiesen wurde diese Behauptung 1934 und 1935 durch plattenstatische Vergleiche mit Eisenbetonplatten und experimentelle Versuche an Sandsteinplatten, die durch Verfasser STÖCKE-HERRMANN-UDLUFT (1934) und durch Versuche mit nachgiebig eingespannten Plattenstreifen, die durch LEHR ausgeführt wurden und auf die im Abschnitt IV noch besonders eingegangen wird. E. SEIDL (1934) macht aufmerksam auf das Prinzip von Krümmung und Gegenkrümmung, dessen Richtigkeit durch die erwähnten Modellversuche von LEHR durch Messung nachgewiesen ist, und er geht bewußt und nachdrücklich zu Vergleichen mit Erfahrungen aus der technischen Mechanik über. Gerade dieser Anregung, die mit vielseitigem Anschauungsmaterial Vergleiche ermöglicht, ist es zu verdanken, daß überhaupt einmal ein Licht geworfen wird auf Ähnlichkeiten und Zusammenhänge zwischen den in der Natur bei unbekanntem Bedingungen und in der Technik bei bekannten Bedingungen auftretenden Endformen eines Spannungszustandes.

Ob nun die Betrachtungen M. FAYOLS über Durchbiegung von Schichten unter dem Eigengewicht, ob die Auffassungen von K. LEHMANN über die Durchbiegung der Schichten und die Gegenwirkung über den Auflagern (Flöz und Versatz), ob die Druckwelle nach H. WEBER oder die Grundsätze des Entspannungsgewölbes nach GILLITZER, die TROMPETERSche Zone oder das Prinzip von SPACKELER „Gewölbe und Kämpferdruck“, in allen Einzelheiten in der Frage nach der Aus-

wirkung auf die Schichten im Gebirge und damit auch auf die in ihnen liegenden Grubenbaue das Richtige treffen, ist zunächst noch nicht das Entscheidende. Entscheidend ist, daß sich die aufgestellten Theorien in einen großen physikalisch-mechanischen Zusammenhang bringen lassen und nicht den Regeln der Elastizitäts- und Festigkeitslehre widersprechen. Die Aufgabe der Meisterung des Gebirgsdruckes ist nur durch exakte Beobachtungen und Versuche zu lösen. Erst wenn die Beobachtungen genau und eindeutig, und wenn die Gesetze der technischen Mechanik richtig angewendet werden, wird eine Teillösung nach der anderen den Bergmann auf diesem vielseitigen Gebiet vorwärts bringen. Wo das Objekt selbst, d. h. die Beobachtungen in der Grube, eine Trennung der Einflüsse nicht gestattet, ist die Durchführung von Modellversuchen am Platze. Hier können einwandfreie Versuchsbedingungen geschaffen werden, und man hat es in der Hand, durch Änderung der einen oder anderen Bedingung den Ablauf des Versuches zu beeinflussen und kann dadurch die Auswirkung der Einzeleinflüsse klar erkennen.

Alle Arbeiten decken sich in der einen Erkenntnis, daß nach Störung des hydrostatischen oder annähernd gleichmäßigen Spannungszustandes des Gebirges durch die Anlage von Grubenbauen ein Spannungsausgleich eintreten muß, der das Gleichgewicht wieder herstellt. Dieser Übergangszustand spiegelt sich in Bewegungen, die meßbar sind, wieder. Durch markscheiderische Vermessungen wurde der Ablauf dieser Bewegungen über der Abbaulücke und in weiterer Entfernung von ihr in benachbarten, durch Strecken oder andere Baue aufgeschlossenen Grubenteilen nachgewiesen. Zu erwähnen sind vor allem die Arbeiten von HOFFMANN, WEISSNER (1932, 1934, 1936), GIESA, EGGERT und IMMERLING. Durch die Arbeit von IMMERLING ist, was besonders wichtig, auch der Grad der Genauigkeit der Messungen und damit die Grenze der gegenwärtig möglichen Meßtechnik festgestellt worden.

Viele Mißverständnisse sind hervorgerufen worden dadurch, daß der Bergmann die Sprache des Mechanikers nicht verstanden hat oder daß einfache Begriffe falsch angewandt wurden. KÜHN sah sich 1932 veranlaßt, die Begriffe zu entwirren. Mit der gleichen Absicht gab Verfasser (Stöcke, 1936) eine Darstellung der in seinen Arbeiten verwendeten mechanischen Grundbegriffe (vgl. Tafel VI), ohne deren Kenntnis die Auffassungen über Verformung bei Druck- und Biegespannungen nicht verständlich werden.

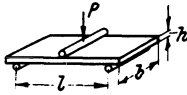
### III. Modellversuche

Wenig sind im Bergbau Versuche beachtet worden, die von LEHR (LEHR und K. SEIDL) und BUSSMANN (BUSSMANN und STÖCKE) im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem in Zusammenarbeit mit



			<p><b>Druckbeanspruchung in einer Haupttrichtung</b>  <i>P</i> in kg  <i>F</i> = <i>a</i> · <i>b</i> in cm<sup>2</sup></p>	<p><b>Druckfestigkeit in kg/cm<sup>2</sup></b>  <math>\sigma = \frac{P}{F}</math></p>												
<p>vor Belastung</p>	<p>während Belastung</p>	<p>nach Entlastung</p>	<p><b>Art der Verformung</b>  <math>\Delta L_{\text{gesamt}} = \Delta L_{\text{bleibend (plastisch)}}</math>  <b>plastisch</b></p>	<p>⌈ Theoretischer Fall ⌋  <math>\Delta L = 0</math>                  nicht verformbar, vollkommen „starr“</p>												
<p>vor Belastung</p>	<p>während Belastung</p>	<p>nach Entlastung</p>	<p><math>\Delta L_{\text{gesamt}} = \Delta L_{\text{federnd (elastisch)}}</math>  <b>elastisch</b></p>	<p><b>Elastizitätsmodul in kg/cm<sup>2</sup></b>  <math>E = \frac{\sigma \cdot L}{\Delta L_{\text{fed}}}</math>  <math>\Delta L_{\text{fed}} \cdot \text{klein} \quad E = \text{groß}</math>  <math>\Delta L_{\text{fed}} \cdot \text{groß} \quad E = \text{klein}</math></p>												
<p>vor Belastung</p>	<p>während Belastung</p>	<p>nach Entlastung</p>	<p><math>\Delta L_{\text{gesamt}} = \Delta L_{\text{elast}} + \Delta L_{\text{plast}}</math>  <b>elastisch + plastisch</b></p>	<p><b>Elastizitätsgrad in %</b>  <math>E^0 = \frac{\Delta L_{\text{federnd}}}{\Delta L_{\text{gesamt}}} \cdot 100</math>  <math>\Delta L_{\text{ges}} = \Delta L_{\text{fed}} \quad E^0 \text{ groß}</math>  <math>\Delta L_{\text{ges}} = \Delta L_{\text{fed}} \text{ klein} \quad E^0 \text{ groß}</math>  <math>\Delta L_{\text{ges}} = \Delta L_{\text{fed}} \text{ groß} \quad E^0 \text{ klein}</math></p>												
<p>vor Belastung</p>	<p>während Belastung</p>	<p>nach Entlastung</p>	<p><b>Elastische Nachwirkung</b>  <math>\sigma</math> konstant  <math>\Delta L</math> ändert sich mit der Zeit</p>													
<p><i>F</i></p>	<p><i>F</i></p>	<p>bei gleicher Fläche <i>F</i> (cm<sup>2</sup>):  <math>c_0 = \frac{F \cdot E}{D}</math></p>		<p><b>Federkonstante in kg/cm</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Fall</th> <th><i>E</i> (kg/cm<sup>2</sup>)</th> <th><i>D</i> (cm)</th> <th><i>c</i><sub>0</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>a</i></td> <td>klein</td> <td>klein</td> <td>klein</td> </tr> <tr> <td><i>b</i></td> <td>groß</td> <td>groß</td> <td>groß</td> </tr> </tbody> </table>	Fall	<i>E</i> (kg/cm <sup>2</sup> )	<i>D</i> (cm)	<i>c</i> <sub>0</sub>	<i>a</i>	klein	klein	klein	<i>b</i>	groß	groß	groß
Fall	<i>E</i> (kg/cm <sup>2</sup> )	<i>D</i> (cm)	<i>c</i> <sub>0</sub>													
<i>a</i>	klein	klein	klein													
<i>b</i>	groß	groß	groß													

**Biegebeanspruchung einer Platte**  
 (Balken auf zwei unnachgiebigen Stützen frei aufgelagert)



**Biegefestigkeit in kg/cm<sup>2</sup>**  
 $\sigma = \frac{M}{W}$   
 $M$  (Biegemoment) =  $\frac{P \cdot l}{4}$   
 $W$  (Widerstandsmoment) =  $\frac{b \cdot h^2}{6}$

1)  $\sigma_{\text{Biege}} = \frac{b \cdot l \cdot P}{4 \cdot b \cdot h^2}$

<p>Verhalten</p> <p>vor Belastung</p>	<p><b>Elastizitätsmodul in kg/cm<sup>2</sup></b>  <math>E = \frac{12 \cdot l^3 \cdot P}{48 \cdot J \cdot A}</math>  <math>J = \frac{b \cdot h^3}{12}</math></p>
<p>während Belastung</p>	<p><math>E = \frac{12 \cdot l^3 \cdot P}{48 \cdot b \cdot h^3 \cdot A}</math></p>
<p>nach Entlastung</p>	<p>2) <math>E = \frac{l^3 \cdot P}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot A}</math>  <math>A</math> klein - <math>E</math> groß  <math>A</math> groß - <math>E</math> klein</p>

<p>Verhalten</p> <p>a)</p>	<p><b>Biegesteifigkeit in cmkg</b>  <math>N = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}</math>                  (ν = Querdehnungsziffer für Gesteine ~ 0,27)                  bei gleichem E-Modul:</p>									
<p>b)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fall</th> <th><i>h</i></th> <th><i>N</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>a</i></td> <td>klein dünnbankig</td> <td>klein</td> </tr> <tr> <td><i>b</i></td> <td>groß dickbankig</td> <td>groß</td> </tr> </tbody> </table>	Fall	<i>h</i>	<i>N</i>	<i>a</i>	klein dünnbankig	klein	<i>b</i>	groß dickbankig	groß
Fall	<i>h</i>	<i>N</i>								
<i>a</i>	klein dünnbankig	klein								
<i>b</i>	groß dickbankig	groß								

Tafel VI. Mechanische Grundbegriffe für druck- und biegebeanspruchte Körper.

E. und K. SEIDL und Verfasser ausgeführt wurden. Diese sollten einmal dazu dienen, die Spannungsverteilung und Spannungsgröße bei verschiedener Gestalt von Streckenquerschnitten durch Messungen am Modell eindeutig festzustellen, und zweitens die Gesetzmäßigkeit der Verformung von Modellkörpern aus Stoffen verschiedenartiger Formänderung zu erforschen. Die Modelle wurden angefertigt aus

- a) vollkommen plastischer,
- b) wenig nachgiebig spröder,
- c) hochgradig nachgiebiger, elastisch dehnbarer Masse.

Durch Änderung der Ausdehnungsmöglichkeit der zur Prüfung kommenden Körper, die einmal rechteckig und das zweitemal oval durchörtert waren, wurde versucht, allen in der Praxis möglichen Fällen gerecht zu werden; die Druckbeanspruchung geschah derart, daß sich der Modellkörper

- a) in Richtung der Streckenachse und hierzu senkrecht frei ausdehnen konnte,
- b) nur in Richtung der Streckenachse ausdehnen konnte und
- c) daß die Ausdehnung allseitig behindert wurde, so daß ein Ausweichen nur in die Strecke hinein möglich war.

Die allseitige Ausdehnung (Fall a) entspricht der, die in der Praxis bei entwickeltem Abbau im Streb mit Begleitstrecken u. dgl. möglich ist. Ausdehnung nur in Richtung der Streckenachse (Fall b) wird in den meisten Fällen beim Vortrieb von Strecken eintreten. Mündet die Strecke auf Füllörter, Stapelschächte, oder geht sie von einer Richtstrecke oder von einem Querschlag aus, so ist an diesen Einmündungsstellen eine Bewegung in Richtung der Streckenachse auf dem schon bestehenden Grubenhohlraum möglich. Die allseitig behinderte Ausdehnung (Fall c) liegt z. B. vor Ort einer in das frische Feld vorgetriebenen Strecke vor. Hier blockieren bei weiterem Vortrieb die rückwärtigen Zonen des Gebirges die Ausdehnung in dieser Richtung, und ein Ausweichen ist paktrisch nur noch in die Strecke hinein möglich.

Grundsätzlich ist den aus diesen Versuchen erhaltenen Ergebnissen viel mehr zu entnehmen, als den oft angeführten Versuchen von SPACKELER, der im Anschluß an die Arbeiten von MÜLLER Druck- oder Stanzversuche bei behinderter Ausdehnung mit Betonkörpern vornahm. Auch die Arbeit von DOMANN, der Scherversuche mit behinderter Seitendehnung ausführte und in SPACKELERSCHER Auffassung unter Bezugnahme auf Dinsdale die „Gewölbewirkungen“ und -ausbildung bespricht, hätte nicht die Erfahrungen aus den Versuchen LEHRS unbeachtet lassen sollen. Zugestimmt wird DOMANN darin, daß die Festigkeiten bei seitenbehinderter Dehnung erhöhte sind, und daß die Bruchformen, wie DOMANN sagt: „die Höhe des Gewölbes“ durch die Festigkeit und durch das elastische Verhalten

des Gesteins bzw. durch den Schichtenbau beeinflusst wird. Bei „weich nachgiebigem“ Gestein (kleiner E-Modul) soll das Gewölbe flacher sein als bei „starren“ Auflagekörpern (d. h. hohem E-Modul).

Sicher ist, daß sich Zonen verschiedenen starker Spannungen um den Gebirgskörper bilden. Die Druckverteilung und die Stellen von Höchst- und Niedrigstspannungen gehen aber deutlicher und einwandfrei aus den LEHRschen Darstellungen, insbesondere der mit den gelochten Platten, hervor (Abb. 87/89 LEHR).

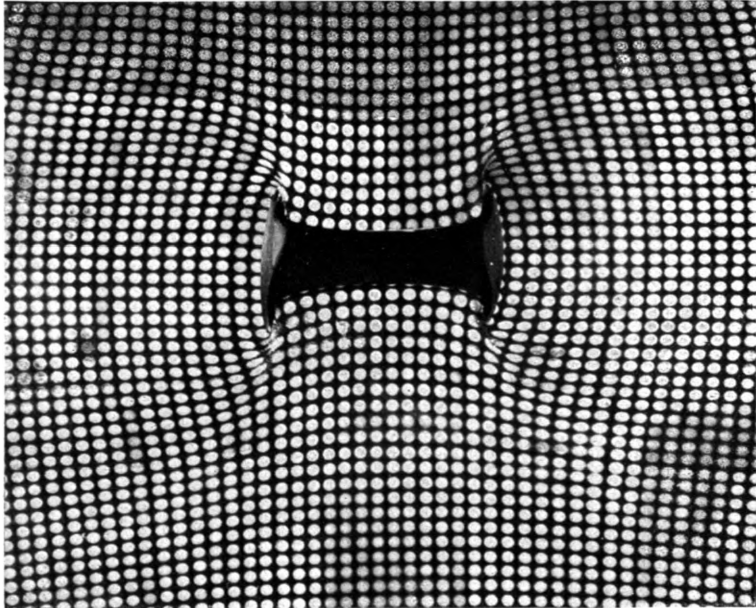


Abb. 16. Starke Scherwirkung an den Ecken, Hereindrücken von Firste und Sohle und Ausbauchen der Stöße einer nach allen Richtungen verformbaren, in plastischem Mittel unter Druck stehenden Strecke.

Die Art der mechanischen exakten Darstellung der Spannungsverteilung in den beanspruchten Modellen ist so überzeugend, daß an den Ergebnissen nicht mehr vorübergegangen werden kann.

Bei den Versuchsreihen mit Plastilin, also einem plastisch nachgiebigen Stoff, der dem Verhalten von Ton, Schiefer Ton und feuchtem Tonschiefer entspricht, gelingt es, mit Hilfe des Verformungsnachweises eines auf der Vorderseite der Körper angebrachten Kreisnetzes das Strömungsbild in plastischen Körpern darzustellen. Sohle und Firste wölben sich in die Streckenhohlräume hinein, während die Stöße gerade bleiben, wenn allseitige Ausdehnungsmöglichkeit oder wenigstens Ausdehnung in Richtung der Streckenachse möglich ist (Abb. 16). Anders ist das Bild bei der behinderten Ausdehnung und lediglich

einer Ausweichmöglichkeit nach dem Streckeninnern (Abb. 17); hier ist die Strecke gleichmäßig allseitig zusammengeschnürt, ohne daß in den Ecken eine Materialtrennung stattfand. Die Strecke verengt sich bei diesem Versuch wesentlich stärker als bei den vorangegangenen.

Bei der Reihe der elastisch verformbaren Schichten aus Gelatine-Glyzerinmasse, die rauhen Tonschiefern und Sandsteinen entspricht, die durch langsame Spannungszunahme Zeit haben, durch elastische

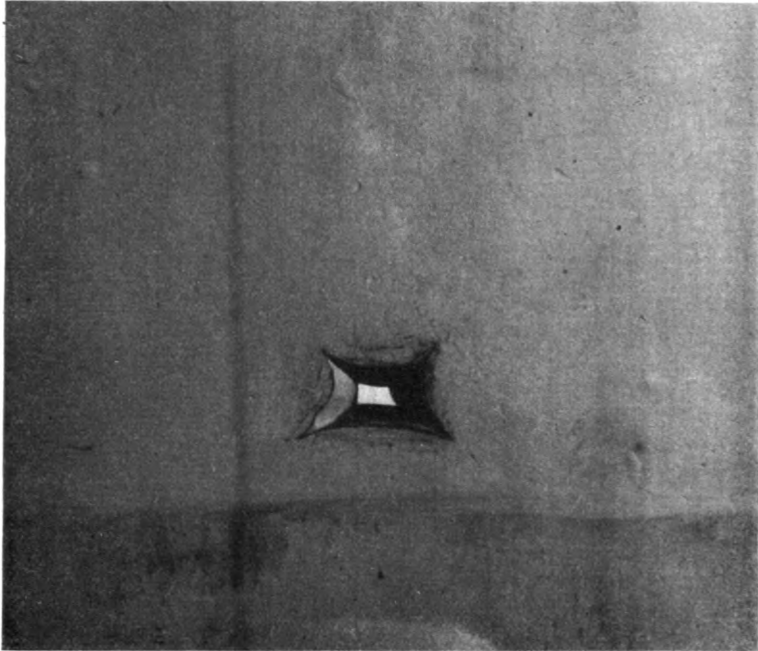


Abb. 17. Starke Zusammenschnürung der unter allseitigem Druck in plastischem Mittel stehenden Strecke.

Formänderung den Spannungszustand auszugleichen, bemerkt man folgendes:

Firste und Sohle wachsen wie beim plastischen Modell in die Strecke hinein unter Bildung von Anrissen in den Ecken (Abb. 18, 19 u. 20). Hier bilden sich bei den hochelastischen Modellen Zugspannungen, die an der langgezogenen Form der Kreise erkennbar sind (Abb. 18). Der Werkstoff ist der Anstrengung schließlich nicht mehr gewachsen, und es bilden sich Anrisse in den Ecken (Abb. 19).

Im Gegensatz hierzu steht das Verhalten der Paraffinmodelle, die besonders hart-elastischen Gesteinen, d. h. trockenen Tonschiefern und Massengesteinen entsprechen, die durch schnelle Spannungs-

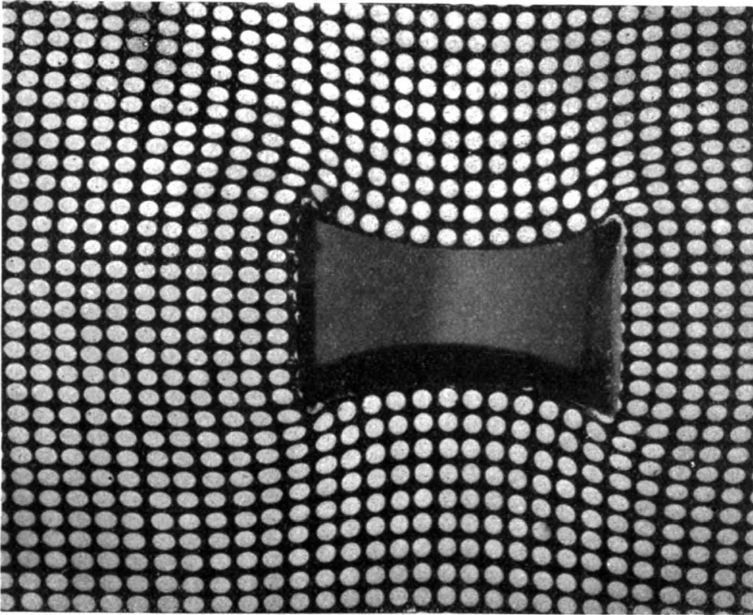


Abb. 18. Einbiegen von Firste und Sohle.

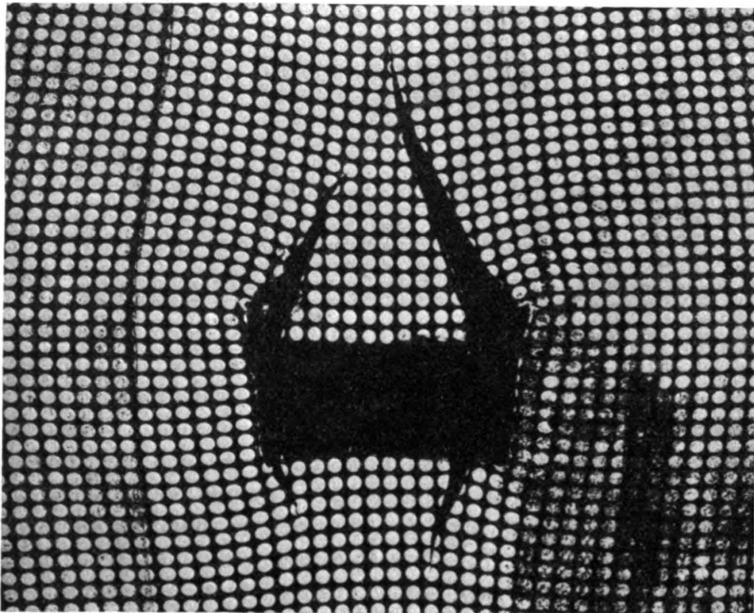


Abb. 19. Brüche in Richtung der Hauptspannungen.

steigerung zu sprödem Bruch gebracht werden, ohne daß wesentliche vorherige Verformung eintritt. Es treten schon früh leichte Adhäsionsbrüche senkrecht zur Firste und Sohle auf, aus den Stößen brechen schalenartige Gesteinsteile, während Firste und Sohle unverändert bleiben (Abb. 21). Anschließend bei Laststeigerung treten Schubbrüche unter  $45^\circ$  ein, die den Körper in zwei Teile zerlegen (Abb. 22).

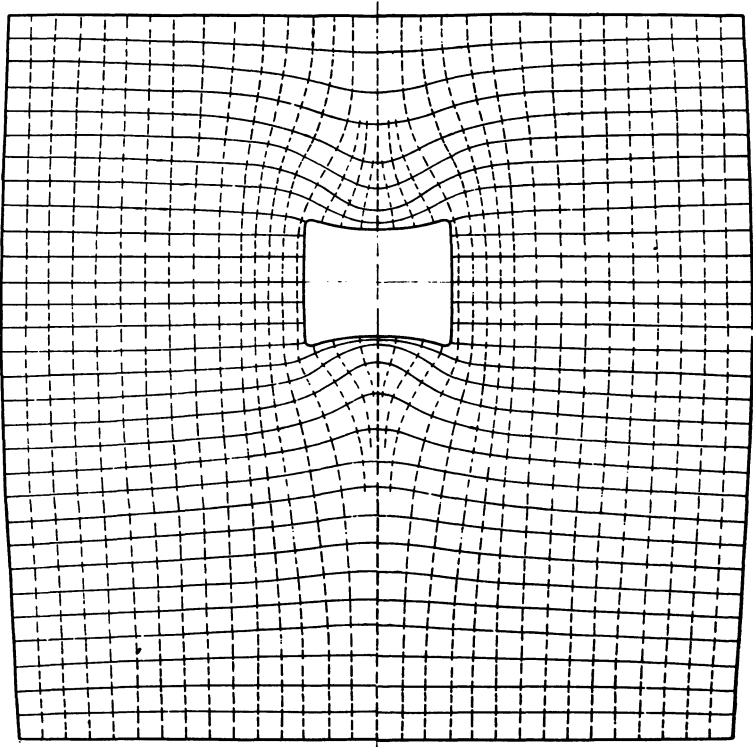


Abb. 20. Hauptspannungslinien aus der Verformung der Kreisflächen (Abb. 19).

Besonders interessant ist das Bild der Spannungsverteilung in einer gelochten Platte, in der die Hauptdehnung  $\sigma I - \sigma II$  zu der Dehnung  $\sigma 0$  in Bezug gesetzt wird, die der nichtgelochten Platte entspricht (Abb. 23). Deutlich ist das stellenweise Anwachsen der Spannungen an den Stößen und insbesondere an den Ecken erkennbar. Die druckentlasteten Zonen über Firste und Sohle haben nichts mit Gewölbenspannungen und das Anwachsen der Spannungen an den Stößen und in den Ecken nichts mit „Kämpferdruck“ zu tun.

Sehr aufschlußreich ist der Vergleich der Anstrengungslinien dieser rechteckigen Querschnittsformen mit denen einer oval geformten Durchörterung. Diese noch nicht veröffentlichten Versuchs-

ergebnisse beweisen eindeutig, daß bei schwierigen Gebirgsdruckverhältnissen bei ovaler Form des Streckenquerschnittes auf Firste und Sohle eine geringere Druckwirkung zum Angriff kommt, als bei gewöhnlicher Rechteck- oder Trapezform mit Türstockausbau.

Wo bei eckigem Streckenquerschnitt schon eine erhebliche Verformung, Durchbiegen der Firste und Aufwölben der Sohle bei gleich-

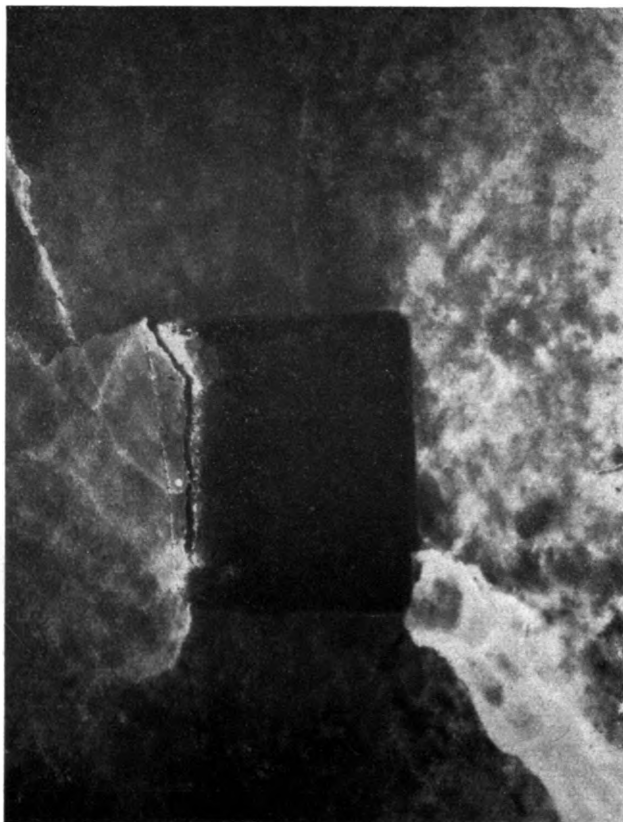


Abb. 21. Beginnende Zerstörung einer unter Druck stehenden Strecke  
 a) Adhäsionsriß in der sonst unverletzten Firste. a) Auswerfen von Schalen im Stoß.  
 c) Einleitung des Schub-Bruches.

zeitigem von den Eckbereichen ausgehenden Hereinbrechen der Stöße eingetreten ist, zeigt die Strecke mit ovalem Querschnitt sich vollkommen erhalten. In Firste und Sohle treten geringere Spannungen und Anstrengungen des Materials auf (Abb. 24) als an den Stößen. Der Stoß nimmt hauptsächlich Druckspannungen auf, die zwar im Höchstfalle das Zweifache der Spannung ausmachen, die im Gebirge besteht, wenn keine Durchörterung durch eine Strecke stattgefunden

hat, — in der Firste aber werden die Zugspannungen bis auf  $\frac{1}{10}$  des Normalwertes heruntersgesetzt. Dieser Nachweis ist für den Ausbau besonders wichtig, da Gesteine, vor allen Dingen Sandsteine, besonders zugempfindlich sind und ihre reine Zugfestigkeit bis zu  $\frac{1}{50}$  und die Biegezugfestigkeit etwa  $\frac{1}{20}$  niedriger liegt als die

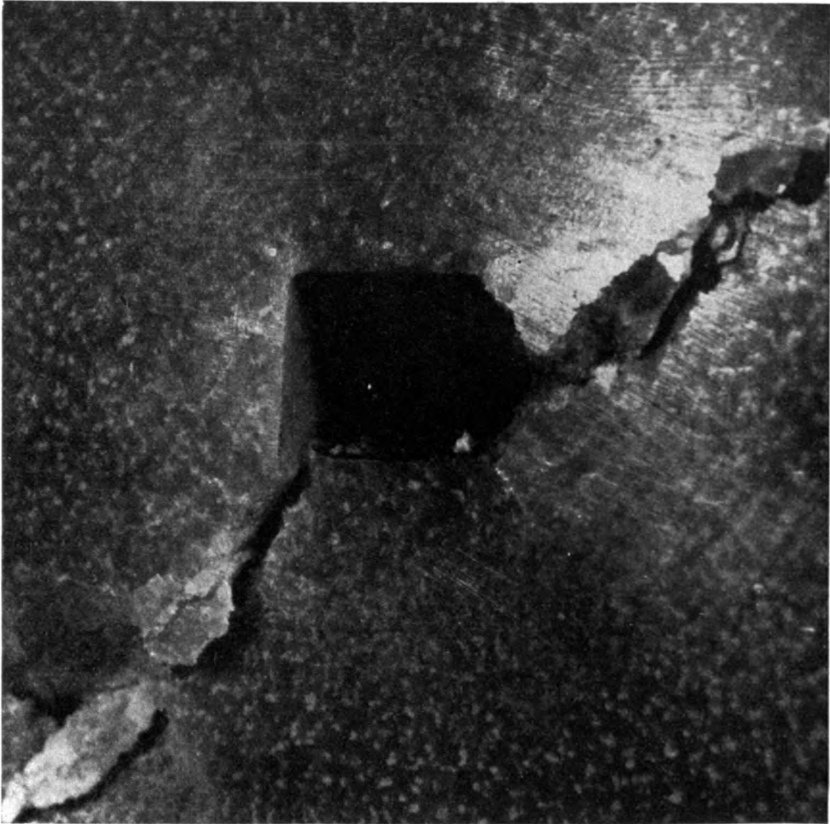


Abb. 22. Spröder Bruch auf Scherflächen unter  $45^\circ$  bei wachsendem Druck auf eine eckige Streckenlücke.

Druckfestigkeit. Durch Abb. 24 wird besonders gut verdeutlicht, wie Firste und Sohle spannungsfrei sind, während die Stöße erhebliche Druckspannungen aufnehmen.

Wichtig ist, daß diese Verhältnisse sowohl für plastische Körper als auch für elastische, und somit für alle Festgesteine gelten. Im Prinzip ist es auch gleichgültig, ob der Körper unbehindert oder behindert in seiner Ausweichmöglichkeit ist. Immer schält sich heraus, daß bei ovalem Streckenquerschnitt Firste und Sohle geschont werden. Nur das Maß und die Art des Zubruchgehens hängt maßgeblich von



der Verformbarkeit und von der Ausdehnungsmöglichkeit der Gebirgsschichten ab. Während z. B. beim sprödeelastischen Paraffinkörper (trockener, hochelastischer Tonschiefer) bei schneller Zunahme der Belastung unter Ausdehnungsmöglichkeit nach dem Innern der Strecke zu Firste und Sohle noch stehen, sind in den Stößen bereits Schubrisse aufgetreten. Die Stöße werden als dachförmige Schalen aus-

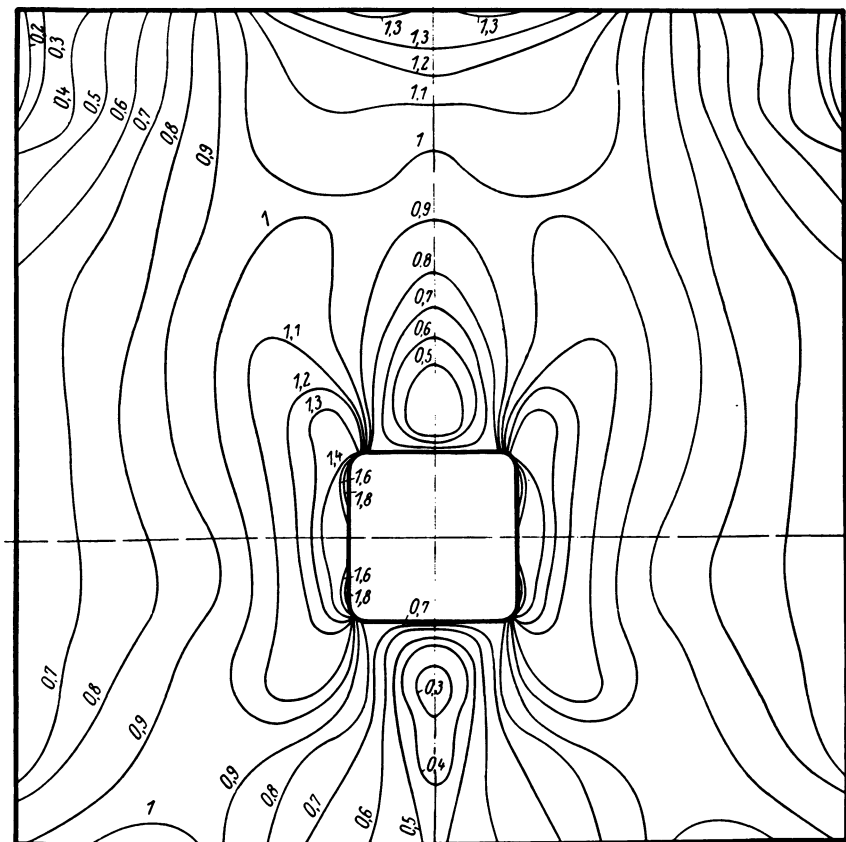


Abb. 23. Anstrengungsplan um eine eckige Streckenöffnung unter Druck.

geworfen (Abb. 25). Gleichzeitig hatten sich Ober- und Unterteil der Strecke gegeneinander verdreht. Diese Drehbewegung ist markscheiderisch und durch korkenzieherartig verformte Eisenstempel bereits häufig in der Grube nachgewiesen bzw. beobachtet worden.

Das Wichtigste an den Spannungsmessungen liegt in dem erstmaligen meßtechnischen Nachweis, daß von ganz bestimmten Linien Zonen umschlossen werden, in denen die Gebirgsspannungen unter den sonst im Gebirge herrschenden Normalspannungen liegen, was für die Anlage von Begleitstrecken, Wetterüberbauen und dergleichen von Be-

deutung sein kann, da durch Auswahl der Lage in einer entlasteten Zone große Ersparnisse an Aufwältigungen und Ausbau zu machen sind (SEIDL, 1933).

Andererseits soll aufmerksam gemacht werden, daß besonders gefährdete Stellen nachweislich solche sind, bei denen die Strecken auf größere Grubenhohlräume münden (Abb. 26). Hier ist die Be-

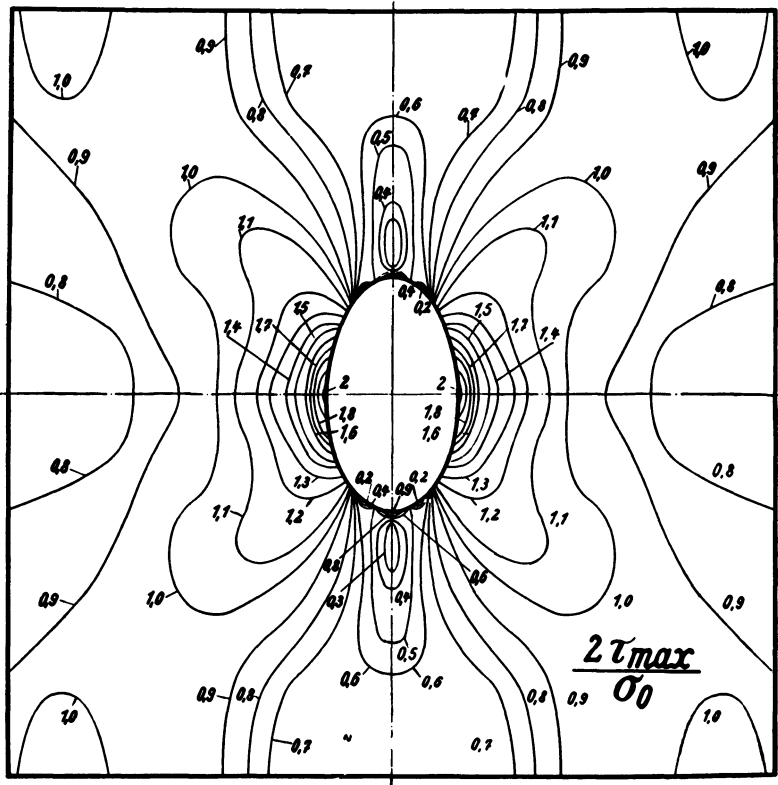


Abb. 24. Anstrengungsplan um eine ovale Streckenöffnung unter Druck

wegungsmöglichkeit nach dem Hohlraum hin (Füllort, Stapel u. dgl.) möglich, und ein Hereinbrechen der Stöße kann nach dieser Richtung auftreten.

Wenn schon aus dem praktischen Bergbau bekannt ist, daß der ovale Streckenquerschnitt Spannungen günstiger aufnimmt und bei schwierigen Druckverhältnissen Firste und Sohle geschont werden, so ist der experimentelle Nachweis hier erstmalig exakt geführt. Die Beurteilung der Bruchgefahr ist aber allein auf Grund der Kenntnis des Verlaufs der Anstrengungs- und Spannungslinien noch nicht möglich, da jedes Gestein in Abhängigkeit von seiner Aufnahmefähigkeit für Spannungen seinen besonderen Verformungsweg geht. Aus diesem

Grunde sind immer die elastischen Konstanten und der Prozentsatz der bleibenden Verformungsanteile bei bestimmten Spannungsgrößen zu ermitteln und in die Überlegungen einzubeziehen. LEHR (E. LEHR und K. SEIDL) hat dies derart ausgedrückt, daß er sagt: „Jede Gesteinsart hat ihre eigene Bruchhypothese.“

Die Modellversuche haben geklärt, wie die Spannungen unter bestimmten Voraussetzungen um eine Abbaulücke herum verteilt sind bei Annahme eines homogenen Gebirgskörpers, von dem man

- a) die Größe der Formänderungen und
- b) die Möglichkeit der Formänderung, ob frei oder behindert, kennt.



Abb. 25. Ovale Strecke unter Druck — Firste und Sohle geschont, Scherrisse, Ausbruchschalen in den Stößen.

Die dargestellten Verhältnisse gelten für einigermaßen homogene massige Gesteinskörper: Eruptiva, mächtige Sandsteine und Konglomerate, Tonvorkommen und einheitliche Salzablagerungen. Gerade das Salz hat als plastisch verformbarer Stoff vielfach als Gegenstand zu Arbeiten gedient. Außer den im Abschnitt „Geologie“ behandelten Arbeiten sei noch an die grundlegenden von RINNE (1904, 1925), MÜGGE und GELLER (1924, 1925) erinnert. Nachdem die Ansicht GELLERS, daß Salze erst unter sehr hohen Drucken plastisch werden, endgültig durch die Arbeiten von SCHMIDT, BORCHERT und Verfasser beseitigt ist und es feststeht, daß verhältnismäßig geringe Drucke die Plastizität von Salz er-

zeugen, kann der praktische Bergbau unter Berücksichtigung der Materialkonstanten des Salzes Schlüsse ziehen und Betriebsanordnungen für den Abbau treffen. Unter Berücksichtigung einer älteren Arbeit von KEGEL



Abb. 26. Verformung einer ovalen, nur seitlich an der Ausdehnung behinderten Streckenöffnung bei Druckerhöhung

wurde neuerdings von STAMATIŪ eine vollkommen auf den praktischen Bergbau ausgerichtete Arbeit veröffentlicht. Auf Grund seiner Untersuchungen kommt STAMATIŪ zu dem Ergebnis, daß sich mit den gegenwärtigen Anschauungen von SCHMIDT, BORCHERT und Verfasser deckt: daß das Steinsalz „ein weniger elastisches, als vielmehr plastisches Material ist, welches bei mechanischen Beanspruchungen eine erhebliche Festigkeit aufweist“. Bei Umschlingungsdruck wies SCHMIDT eine erhebliche Festigkeitszunahme des Salzes bei Dauer- und Wechselbeanspruchungen nach. Diese Festigkeitszunahme muß entscheidend sein für die Abmessungen der Stützpfiler zwischen den Kammern. STAMATIŪ gibt Stärke der Stützpfiler, Mächtigkeit der Kammerzwischendecken und der Salzschutzdecke an und läßt sich auch über die Form (parabolisch-trapezförmig, rechteckig) der Abbaukammern aus.

#### IV. Plattenstatische Gesetze der Schichtverformung

Wurden in dem vorigen Kapitel und in den bautechnischen und geologischen Abschnitten vornehmlich die Auswirkungen der Materialkonstanten und der Abmessungen eines homogenen Körpers besprochen, und wurde auch die Form der Lücke, um die sich die Spannungen bilden und wieder ausgleichen, behandelt, so sollen hier die eigen-

artigen, den Bergmann besonders interessierenden Verhältnisse, die bei Durchbiegung von Gebirgsschichten, die — wie im Abschnitt II schon angeschnitten — als Platten aufgefaßt werden, näher untersucht werden.

Die Auffassung, daß sich die Schichten als Platten durchbiegen, ist — wie erwähnt — nicht neu. Daß sich ferner Dehnungs- und Pressungszonen ausbilden, die sich in Bewegungen widerspiegeln, die markscheiderisch nachweisbar sind und sich in der „Druckwelle“ äußern, steht ebenfalls fest. Dehnungs- und Zerrungsmaxima und die Übergänge von der Zerrungs- zur Dehnungszone sind ausschlaggebend für die Größe der Grenz- und Bruchwinkel, und die Trogtheorie muß als gesichert gelten. Neu ist an der Auffassung bei Berücksichtigung der verschiedenen Materialkonstanten, der sich durchbiegenden Hangend-schichten und des nachgiebigen Auflagers (Flöz oder Versatz), daß es sich, statisch gesehen, nicht um den einfachen Fall eines Balkens, sondern um den einer allseitig auflagernden, aber nicht auf starren Stützen liegenden Platte handelt, die nach oben hin keine freie Bewegung hat. Das ist der Fall der gleichmäßig belasteten unvollkommen eingespannten Platte.

Die Überleitung aus der Baustatik, aus Versuchen mit Betonplatten, an denen die Verteilung der Spannungen an den langen Rändern und an den Stirnseiten von rechteckigen Platten nachgewiesen wurde, die der Form von Firste und Sohle der meisten Grubenräume entspricht, ist in den erwähnten Arbeiten von HERRMANN-UDLUFT-STÖCKE (1934, 1936) auf einfache Bergbaufälle geschehen. Hier soll nur der Einfluß der Stoffkonstanten von Flöz- und Hangend-schicht noch einmal hervorgehoben werden.

Die Versuche wurden ausgeführt (vgl. E. LEHR und K. SEIDL) an Modellen von:

- a) großer Flözmächtigkeit und kleinem Elastizitätsmodul des Flözes, also bei kleiner Federkonstanten,
- b) bei kleiner Flözmächtigkeit und kleinem Elastizitätsmodul, also mittlerer Federkonstanten,
- c) bei großer Flözmächtigkeit und großem Elastizitätsmodul (E-Hangendplatte = E-Flöz), also großer Federkonstanten.

Die Abb. 27 a, b, c, die Längsschnitte durch einen Abbau darstellen, zeigen die Profile mit den dazugehörigen Momenten und Spannungskurven: außerdem sind in Abb. 27 b die auf das Flöz wirkenden Abbaudrucke, d. h. die Auflagerkräfte, dargestellt. Wichtig ist die wellenartige Form, nach der die Durchbiegung des Hangenden geschieht und die die Zerrungs- und Dehnungszonen darstellen. Diese meßtechnisch nachgewiesene Bewegung paßt ausgezeichnet zu den von NIEMCZYK (1935) wiedergegebenen Spannungsdiagrammen. Daß die Lage des Zerrungsmaximums je nach Zusammensetzung der Ge-

birgsschichten und nach Größe des Abbaurums und nach dem Einfallen der Schichten verschieden ist, geht jedenfalls für die ersten beiden Faktoren deutlich aus den Versuchen und den Abbildungen hervor. GROND wies auch schon 1926 nach, daß der Bruchwinkel abhängig sei von der Zusammensetzung der Gebirgsschichten, und es

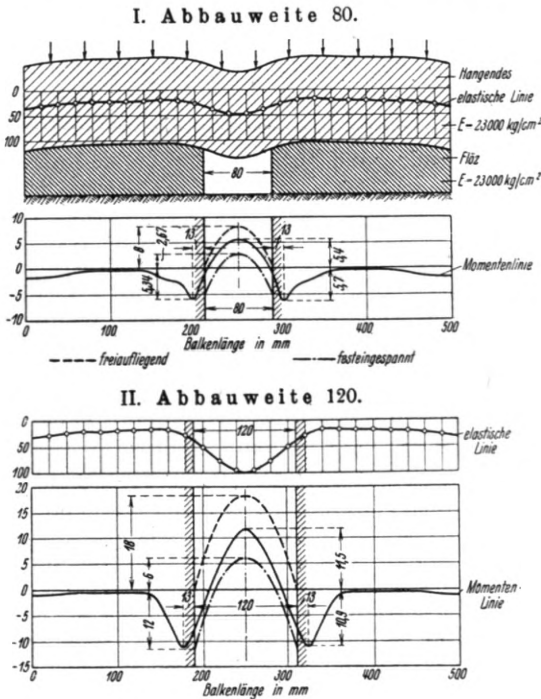


Abb. 27 a—c. Abbauprofile. Elastische Linien und Momenten- bzw. Spannungslinie bei verschiedener Abbauweite und verschiedenen Stoffkonstanten und Mächtigkeitsverhältnissen von Hangenden und Flöz; auf b Rückstellkräfte oder Abbaudruck.

(Diese Figuren-Erklärung bezieht sich auch auf Abb. 27 b und 27 c)

Abb. 27 a). Große Flözmächtigkeit, kleiner E-Modul des Flözes, Eederkonstante klein.

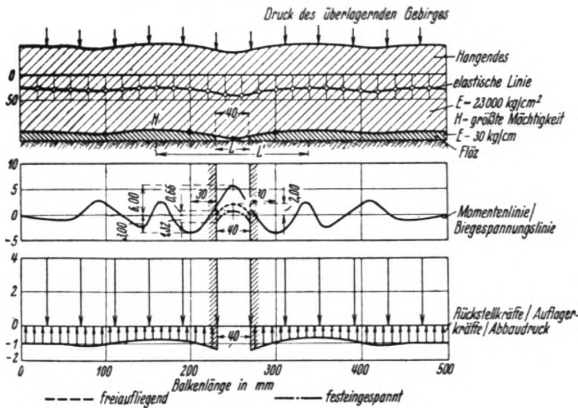
geht deutlich aus allen markscheiderischen Bewegungsmessungen hervor, daß die Materialkonstanten der Gebirgsschichten für die Frage der Grenz- und Bruchwinkel bei Absenkung des Hangenden ausschlaggebend sind (GROND, 1937).

## V. Gebirgsdruck und Gebirgsschlag

Wenn der Ausgleich der Zerrungs- und Pressungsspannungen im Gebirge elastisch innerhalb der Grenze der Bruchfestigkeit vor sich geht, oder aber wenn der Ausgleich allmählich durch bruchlose

Verformung plastischer Massen bei Spannungserhöhung oder durch Fließen bei gleichbleibender Spannung geschieht, so ist dies wenig gefährlich für den Bergmann. Wird aber eine elastisch gespannte Hangendschicht, die bis zur Grenze ihrer Zugfestigkeit „energie-

I. Abbauweite 40.



II. Abbauweite 120.

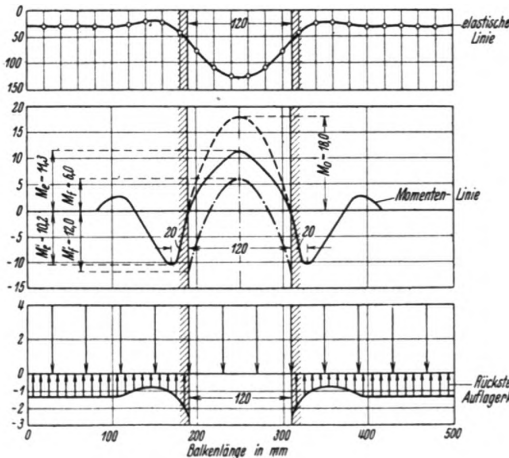


Abb. 27 b). Kleine Flözmächtigkeit, kleiner E-Modul des Flözes, Federkonstante mittel.

gespeichert“ ist, nur etwas über die Zugfestigkeit hinaus beansprucht, so tritt die für den Bergmann katastrophale Erscheinung des Gebirgsschlages ein (Abb. 28).

Sämtliche Arbeiten, die sich daher mit der Lösung der Gebirgsschlagfrage beschäftigen, gehen zunächst von Festigkeitsbestimmungen aus. Ansicht des Verfassers ist es, daß mehr Gewicht auf die Sammlung von Biege- und Scherfestigkeiten von Gebirgsschichten gelegt

werden muß als auf Druckfestigkeitsbestimmungen. Gleichlaufend mit den Festigkeitsbestimmungen muß das Studium des Verformungsvorganges bei den einzelnen Gesteinsarten unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen einsetzen. Aus diesem Gesichtswinkel

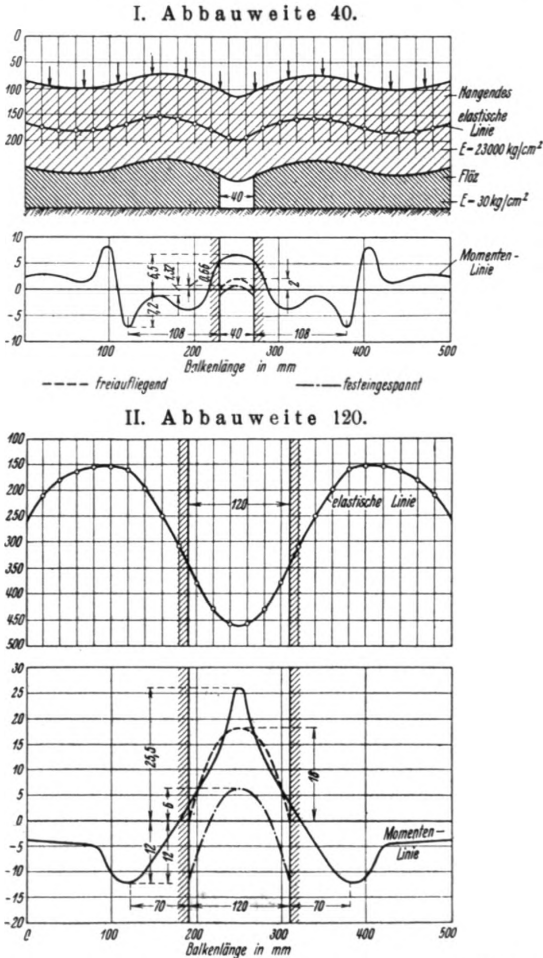


Abb. 27 c). Große Flözmächtigkeit und großer E-Modul des Flözes, Federkonstante groß.

heraus sind wohl auch zum Teil die Arbeiten der SPACKELER-Schüler: MÜLLER, WÖHLBIER und FLEISCHER ausgeführt worden. Sie enthalten eine größere Zahl von Materialkonstanten von Nebengesteinen, mit denen der Bergmann meist zu tun hat und die bis dahin vollkommen unbekannt waren. Besonders erwähnt sei noch die Arbeit LOWENZ, denn dieser macht darauf aufmerksam, daß auch durch Temperaturänderungen zusätzliche Spannungen in Gebirgsschichten hinein-



kommen können. Wie groß diese Bewegungen durch Temperaturänderung sein können, ist in dem bautechnischen Abschnitt „Elastische Eigenschaften — Wärmedehnung, Temperaturspannungen —“ besprochen worden. Wenn zwischen den Werten der aufgeführten Arbeiten, in deren Reihe die von NEBELUNG und WALTER nicht erwähnt bleiben darf, auch keine absolute Übereinstimmung herrscht, so sind sie größenordnungsmäßig jedoch durchaus zu vergleichen. Ferner ist naturgemäß nicht abzuschätzen, wie groß der tektonische Umpressungseinfluß in den einzelnen Revieren gewesen ist, durch den die Gesteine hinsichtlich ihrer Verformbarkeit verändert wurden.

Daß das Gefüge der Gesteine das Maß der Verformbarkeit neben der Mineralzusammensetzung weitgehend beeinflusst, ist zweifellos. Gerade hinsichtlich der Durchbiegefähigkeit ist die Anordnung der Glimmerlagen zur Druckrichtung ausschlaggebend, und es wurde hierauf auch bereits im bautechnischen und im geologischen Abschnitt hingewiesen. Deswegen müssen Untersuchungen über Stoffkonstanten von Gestein stets mit petrographischen Ermittlungen verbunden sein.

Wenn nun nachgewiesen wurde, daß für den Verlauf der Grenz- und Bruchwinkel, also für die Bergschädenfrage über Tage, die Materialkonstanten des aufbauenden Gebirges eine Rolle spielen, so ist die Lage der größten Spannung, die im Gebirgskörper aufgespeichert ist, vor allem wichtig für den Abbau unter Tage. Die Durchbiegung des Hangenden spielt immer eine ausschlaggebende Rolle, und durch den Versuch von LERNER ist erstmalig experimentell die Lage der größten Spannungen im frischen Felde unter Einfluß der Federkonstanten und der Abbaubreite auf die Entfernung der Stellen höchster Biegebeanspruchung vom Abbaustoß nachgewiesen worden. Gerade die Entfernung dieser Höchstspannung ist viel diskutiert

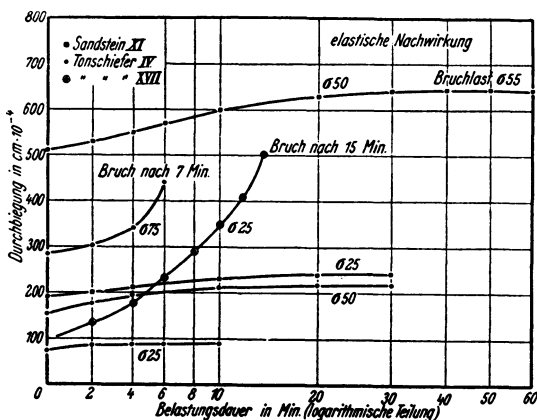


Abb. 28.

1. Verformungslinie trockner Tonschiefer bei 25 und 50 kg cm<sup>2</sup> innerhalb des Bereichs der Biegefestigkeit elastisch gespannt.
2. Verformungslinie trockner und feuchter Tonschiefer zeigt allmählichen Ausgleich durch „Fließen“ bei 75 bzw. 25, die große Verformung kündigt den Bruch an.
3. Verformungslinie Sandstein bei 25 innerhalb des Bereichs der Biegefestigkeit 50 kg cm<sup>2</sup> elastisch gespannt. Letzteres gefährlich. Kleine Spannungszunahme bringt plötzlichen Bruch!

worden. Vielfach wird schon ein festes Maß (vgl. NIEMCZYK, 1938: z. B. von 25 m) angegeben, in welchem Abstand die maximale Druckzone vor der Abbaufront vorseilen soll. An Abb. 29 sehen wir, daß bei hoher Federkonstanten ( $C_0 = 46\,000$  kg/cm) der Einfluß der Abbaubreite nicht groß ist und daß sich die Werte der Entfernung zwischen 8 und 12 Einheiten bewegen. Bei kleiner Federkonstanten jedoch ändert sich die Lage dieser Höchstspannung ganz beträchtlich mit der Abbaubreite und liegt zwischen 55 und 110 Einheiten.

Wir können zu einer — wie NIEMCZYK sagt — „Theorie der Gebirgsdruckdynamik“ nur dann kommen, wenn Untersuchungen hinsichtlich der Materialkonstanten und Messungen in der Grube durchgeführt werden, wenn ferner die statischen Gesetze einwandfrei angewendet werden; und wenn es nicht möglich ist, die einzelnen Einflüsse voneinander zu scheidern, dann muß dem Modellversuch der Rest der Klärung überlassen bleiben.

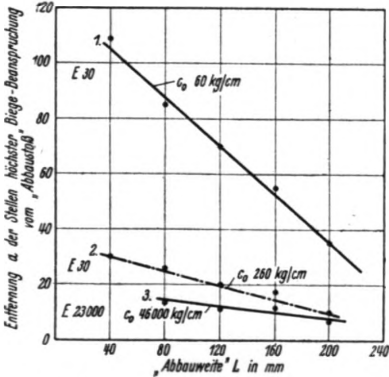


Abb. 29. Einfluß der Materialeigenschaften, Flözmächtigkeit und Abbaubreite auf die Stellen höchster Beanspruchungen.

In dem bergmännischen Abschnitt ist dargelegt worden, wie verschieden die Gesteine in ihrer Festigkeit und in ihren Verformungseigenschaften sind und wie sich dies unter gleichen statischen Bedingungen für den Ausgleich der Spannungen, die im Gebirge aufgespeichert sind, auswirkt.

Neben den Materialkonstanten beeinflussen Dauer der Beanspruchung, der Zustand des Stoffes, in dem dieser der Beanspruchung unterzogen wird, und die Lage des Schichtengefüges zur Beanspruchungsrichtung das Verhalten der Gebirgsschichten.

Mit den Modellversuchen stehen wir noch am Anfang, denn bisher sind nur Versuche, wie erwähnt, mit homogenem Material ausgeführt worden und einige Versuche mit Platten, die, unvollkommen eingespannt, über einer Abbaulücke belastet wurden. Es sind Versuche mit einer solchen Platte bei zwei Abbauhohlräumen, bei verschiedenem Einfallen und beim Wechsel verschiedener Stoffeigenschaften der Platten im Rahmen einer Arbeit von SEIDL, BUSSMANN und Verfasser in Angriff genommen worden, deren Durchführung aber noch längere Zeit dauern wird. Das Abwarten der Ergebnisse, die sicher für den Bergbau noch manches Aufschlußreiche für die Gebirgsdruckfrage bringen werden, hätte den Abschluß der vorliegenden Arbeit zu sehr verzögert.

### C. Schlußbetrachtung

Unter Heranziehen eigener Forschungsergebnisse und zahlreicher Einzelarbeiten aus den Gebieten Bauwesen, Geologie und Bergbau, ist auseinandergesetzt worden, wie sich aus der einfachen Werkstoffprüfung an Naturstein eine Arbeitsrichtung unter Zusammenfassung physikalischer, mechanischer, mineralogischer und geologischer Arbeitsmethoden entwickelt hat, die man als „Gesteinstechnik“ bezeichnen könnte. Wie für eine Baukonstruktion die Statik nicht ohne Kenntnis der Materialkonstanten ausgearbeitet werden kann, so sind andererseits unter Zuhilfenahme der Statik und der markscheiderischen Meßverfahren die Probleme des Gebirgsdruckes nur zu lösen, wenn — unter Beachtung der Stoffkonstanten der das Gebirge aufbauenden Schichten — die Gesetze der technischen Mechanik richtig angewendet werden. Der Modellversuch kann uns erst dann vorwärts bringen, wenn wir durch Kenntnis der Stoffkonstanten des Gebirges das Modell so aufbauen können, daß die einzelnen Teile im Maßstab wohl kleiner, aber im Verhältnis der Festigkeits- und Verformungseigenschaften wirklichkeitstreu sind. Bei sinnvoller Zusammenarbeit der naturwissenschaftlichen und technischen Richtungen, deren Gebiete hier angeschnitten wurden, können die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der Gesteinstechnik, angewandt auf praktische Fragen des Bauwesens, der Geologie und des Bergbaues, manches Problem der Lösung näherbringen.

### Schriftumsnachweis

- ADAMS, F. D. u. COKER, E. G.: On Investigation into the elastic Constants of Rocks. Washington Carnegie Inst. **46**, 38 (1906).
- ADAMS, L. H. u. WILLIAMSON, E. D.: On the Compressibility of Minerals and Rocks at high pressures. *Journal of the Franklin Inst.* **195**, 475 (1923).
- ALBRECHT, E.: Verfahren zur Prüfung unebener Platten auf Bruchfestigkeit. *Z. Keramische Rundschau* **38**, 40 (1930).
- BÄRTLING, R.: Gebirgsdruckwirkungen beim Abbau von Steinkohlenflözen. *Z. Glückauf* **65**, 735 (1929).
- BAUSCHINGER, J.: Untersuchung über Elastizität und Festigkeit der natürlichen Bausteine Bayerns. *Mitteil. aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der T. H. München* **12**, H. 10 (1884).
- BERG, G.: Welche petrographischen Eigenschaften sind für die technische Eignung der Gesteine von besonderer Wichtigkeit? *Int. Kongress für Materialprüfung Zürich 1931*, **1**, 550.
- : Die petrographische Untersuchung der Dachschiefer. *Z. Geologie und Bauwesen* **5**, 165 (1933).
- BÖKER, R.: Die Mechanik der bleibenden Formänderung in kristallin aufgebauten Körpern. *Forsch.-Arb. auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 1915*, H. 175-176.
- BORN, A.: Aus „Gutenberg Lehrbuch der Geophysik“. *Verl. Borntraeger, Berlin 1929*, S. 102.
- BREYER, F.: Dichtebestimmungen an Gesteinen aus deutschen Erdölgebieten. *Beitr. zur angewandten Geophysik* **7**, 245 (1938).
- BREYER, H.: Über die Elastizität von Gesteinen. *Beitr. zur physikal. Erforsch. der Erdkruste, herausgegeben von der Pr. Geol. Landesanstalt* **1**, H. 1 (1929).
- : Über die Prüfung und Eignung der Gesteine für Gleisbettungszwecke. *Z. d. Dt. Geol. Ges.* **83**, 664 (1931).
- : Grundsätzliche Betrachtungen über die Prüfung von Naturgesteinen für den Eisenbahn-, Straßen- und Betonbau. *Z. Der Bahn-Ingenieur* **54**, Nr. 2, S. 17 ff. (1937).
- BURCHARTZ, H. u. SAENGER, G.: Der Einfluß der Probengröße und Probenform auf die Ergebnisse der Prüfung von Naturgesteinen auf Druckfestigkeit. *Z. Der Straßenbau* **22**, H. 17, S. 257 ff. (1931).
- BUSSMANN, K. H. u. STÖCKE, K.: Modellversuche zur Klärung der Spannungsverteilung in der Umgebung von Strecken im Gebirge. *Wiss. Abhandl. Deutsch. Mat.-Prüf.Anst.* **1**, Nr. 3 (1939).
- CHLOOS, H.: Experimente zur inneren Tektonik. *Z. f. Min. usw. Abt. B* 1928, 608.
- : Zur experimentellen Tektonik. Brüche und Falten. *Z. Die Naturwissenschaften* **19**, 242 (1931).
- : Einführung in die Geologie. *Verl. Borntraeger, Berlin 1936*.
- DIN DVM 2103: Prüfung natürlicher Gesteine auf Wasseraufnahme.
- DIN DVM 2104: Prüfung natürlicher Gesteine auf Frostbeständigkeit.
- DIN DVM 1053: Berechnungsgrundlagen für Bauteile aus künstlichen und natürlichen Steinen. *Abschn. IV § 8*.
- DIN DVM 1054: Richtlinien für die zulässige Belastung des Baugrundes im Hochbau. *Abschn. I B. 1*.
- DIN DVM 1055: Belastungsannahmen im Hochbau. *Raumgewichte von Bau- und Lagerstoffen. Abschn. C*.
- DOMANN, G.: Untersuchungen über die Wirkung von Druckformen und Hohlformen in allseitig gespanntem Gestein zur Klärung der Gebirgsdruckfragen. *Z. Glückauf* **72**, 1169-1199 (1936).
- EGGERT, FR. W.: Über den Einfluß schädlicher Gebirgsspannungen im oberschlesischen Steinkohlenbergbau. *Diss. T. H. Berlin. Mitt. aus dem Markscheidewesen* **46**, 56 (1935).

- FLEISCHER, O.: Beobachtungen und Untersuchungen über Gebirgsbewegungen beim oberschlesischen Pfeilerbruchbau. *Z. Glückauf* **70**, 671 (1934).
- GABER, E.: Schub- und Biegefestigkeit von Granit. *Z. Der Bauingenieur* **10**, 548 (1929).
- GAERTNER, A.: Bestimmung der Spannungen im Gebirge. Ber. des Reichskohlenrates A. 39, VDI-Verl., Berlin 1933.
- GALLWITZ, H.: Über den Nachweis von Krustenbewegungen durch Feinwägungen und über den Bau von Festpunkten am Elbtalgraben. *Z. d. Dt. Geol. Ges.* **91**, 187 (1939).
- GELLER, A.: Über das Verhalten verschiedener Minerale der Salzlager bei hohem Druck und wechselnden Temperaturen. *Z. f. Krist.* **60**, 414 (1924).
- : Zur Kenntnis fließfester Körper. *Z. f. Krist.* **62**, 395 (1925).
- GIESA, F.: Absenkung des Hangenden im StREBBAU. *Z. Glückauf* **70**, 905 (1934).
- GIESA, F. u. FRITSCH, C. H.: Beobachtungen und Beanspruchungen des Ausbaues in Abbaustrecken. *Z. Glückauf* **71**, 125 (1935).
- GILLITZER, G.: Wesen des Gebirgsdruckes und dessen Ausnutzung beim Abbaubetriebe des Mansfelder Bergbaus. *Z. Glückauf* **64**, 977 (1928).
- GRENGG, R.: Bemerkungen zu den „Vorläufigen Richtlinien für die Prüfung von natürlichen Gesteinen als Straßenbaustoff“. Asphalt- und Teer-Industrie-Ztg. 1927, H. 35, S. 906.
- : Anwendung mineralogischer und petrographischer Erkenntnisse auf die technische Materialprüfung nichtmetallischer anorganischer Stoffe. Ber. d. Int. Kongr. f. Materialprüfung, Zürich 1931, **1**, 526.
- GRIGGS, D.: Deformation of Rocks under high confining Pressures. *The Journal of Geology* **44**, 541 (1936).
- GROND, A.: Gebirgsbewegungen bei Steinkohlenbergbau. Diss. T. H. Aachen 1926.
- : Erfahrungen über Bodenbewegungen im südlimburgischen Bezirk. *Mitt. aus d. Markscheidewesen* **48**, 133 (1937).
- GRÜN, R.: Die Verwitterung der Bausteine vom chemischen Standpunkt. *Chemiker-Ztg.* **57**, 401 (1933).
- HAARMANN, E.: Um das geologische Weltbild (Malleo et Mente). Verl. Enke, Stuttgart 1935.
- : Die Oszillationstheorie. Verl. Enke, Stuttgart 1930.
- HANISCH, A.: Resultate der Untersuchungen mit Bausteinen der österreichisch-ungarischen Monarchie. Verl. C. Graeser, Wien 1892.
- : Bestimmung der Bieungs-, Zug-, Druck- und Schubfestigkeit an Bausteinen der österreichisch-ungarischen Monarchie. Verl. C. Graeser, Wien 1901.
- HANSEN, E. u. STÖCKE, K.: Zur Verwendung von Granit-Stelzenlagern im Brückenbau. *Z. Die Straße* **5**, H. 9, S. 282 (1938).
- HIRSCHWALD, J.: Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. Verl. W. Ernst & Sohn, Berlin 1908.
- : Handbuch der Bautechnischen Gesteinsprüfung. Verl. Borntraeger, Berlin 1912.
- HOFFMANN, H.: Der Ausgleich der Gebirgsspannungen in einem streichenden StREBBAU, nachgewiesen durch markscheiderische und statische Messungen. Diss. T. H. Aachen 1931.
- HUMMEL, A.: Das Beton-ABC. 2. Aufl., S. 58, Verl. Chemisches Laboratorium für Tonindustrie und Tonindustrie-Ztg. Prof. Dr. H. Seger & E. Cramer, Berlin 1937.
- IMMERLING, H.: Markscheiderische Feinmessungen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen an Kohleninseln und Restfeilern im oberschlesischen Steinkohlenbergbau. Diss. T. H. Berlin 1937.
- KAISER, E.: Grundfrage der natürlichen Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der freien Natur. *Z. Chemie der Erde* **3**, 290—343 (1929).
- KÁRMÁN, TH. VON: Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. *Z. VDI* **55**, 1749 (1911).
- KEGEL, K.: Über den Abbau von Kali-Salzlagerstätten in größeren Teufen. *Z. Glückauf* **52**, 1309 (1906).

- KIENOW, S.: Der Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung. *Z. f. Geophysik* **9**, 204 (1933).
- : Schichtenverbiegung als Folgeerscheinung plastischer Deformation von Erdkrustenteilen. *Geol. Rdsch.* **25**, 255 (1934).
- KIESLINGER, A.: Zerstörungen an Steinbauten. Verl. F. Deuticke, Berlin Wien 1932.
- KÜHN, P.: Betrachtungen über die Gebirgsdruckfrage. *Z. Glückauf* **67**, 1477 (1931).
- : Elastizität und Plastizität des Gesteins und ihre Bedeutung für Gebirgsdruckfragen. *Z. Glückauf* **68**, 185 (1932).
- KUNZE, W.: Neuzeitliche Werkstoffmechanik als theoretische Grundlage der Werkstoff-Formgebung und -prüfung. *Mitt. d. dt. Mat.Prüf.Anst., Sonderheft* 33. Verl. Springer, Berlin 1937.
- LEHMANN, K.: Bewegungsvorgänge bei der Bildung von Pingen und Trögen. *Z. Glückauf* **55**, 933 (1919).
- LEHR, E.: Modellversuche an Balken auf elastischer Unterlage zur Klärung der Spannungsverteilung im Hangenden von Abbauörterern. *Forsch. Heft* 372. VDI-Verlag, Berlin 1935.
- LEHR, E. u. SELDI, K.: Modellversuche zur Klärung der Spannungsverteilung in der Umgebung von Strecken im Gebirge. *Forsch. Heft* 372. VDI-Verlag, Berlin 1935.
- LINDEMANN, W.: Gebirgsschläge im rheinisch-westfälischen Steinkohlenbergbau. *Z. Glückauf* **62**, 293 (1926).
- LOWENZ, H.: Einfluß des Temperaturgefälles im Stoß auf die Gesteinsfestigkeit. *Z. Glückauf* **69**, 33 (1933).
- MOHR, H.: Der Nutzglimmer. Verl. Borntraeger, Berlin 1930.
- MÜGGE, O.: Über das Verhalten einiger Minerale der Salzlagerstätten gegenüber hohem Druck bei wechselnden Temperaturen nach Versuchen von A. GELLER. *Nachr. d. Wiss. Göttingen, mathem.-physikal. Kl.* 1924, Sitzung. 1 VIII.
- MÜLLER, O.: Untersuchungen an Karbongesteinen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen. *Z. Glückauf* **66**, 1601 (1930).
- NADAI, A.: Die Formänderungen und die Spannungen von rechteckigen elastischen Platten. *Mitt. üb. Forsch.-Arb.* 1915, H. 170 71.
- : Elastische Platten. Verl. Springer, Berlin 1925.
- : Der bildsame Zustand der Werkstoffe. Verl. Springer, Berlin 1927.
- NEBELUNG, W. u. WALTER, E.: Untersuchung von Festigkeitseigenschaften von Ton-schiefer der Gasflammkohlen-gruppe. *Z. Glückauf* **69**, 1038 (1933).
- NIEMCZYK, O.: Die tektonische Absenkung des Beuthener Erz- und Steinkohlenbeckens und ihre Bedeutung für die Beurteilung von Bergschäden. *Z. Glückauf* **59**, 929 (1923).
- : Zur Frage des Grenz- und Bruchwinkels bei Bodensenkungen. *Mitt. aus d. Mark-scheidewesen* **46**, 37 (1935).
- : Die Bergschädenkunde als Lehr- und Forschungsgebiet. *Techn. Mitt.* **8** (1938).
- NIGGLI, P. u. QUERVAIN, F.: Anwendung mineralogischer und petrographischer Erkenntnisse auf die technische Materialprüfung nichtmetallischer anorganischer Stoffe. *Ber. d. Int. Kongr. f. Mat.-Prüfg.* Zürich 1931. 1. 541.
- OBERSTE-BRINK, K.: Diluviale, alluviale und bis in die Gegenwart andauernde Krustenbewegungen der Erdrinde und ihre Bedeutung für die Bergschädenkunde. *Z. Glückauf* **62**, 857 (1926).
- PICKEL, W.: Die Bestimmung und Bewertung der Kornform von Edelsplitt. *Z. Die Betonstraße* **12**, H. 5, S. 104 (1937).
- REICH, H.: Über Gesteins-Elastizität. *Z. d. dt. Geol. Ges.* **79**, 31 (1927).
- : Über die elastischen Eigenschaften von Gesteinen und damit zusammenhängende geologische Fragen. *Gerlands Beitr. z. Geophysik* **17**, 86 (1927).
- : Angewandte Geophysik für Bergleute. Verl. Borntraeger, Leipzig 1933.

- REICH, H.: Erfahrungen mit Seismischen Refraktionsmessungen bei der geophysikalischen Reichsaufnahme. Beitr. z. angewandten Geophysik 7 (1937).
- : Über die geologische Deutung von seismischen Refraktionsmessungen. Z. Öl und Kohle 13, 53 u. 492 (1937).
- RICHTER, G.: Hauptanhydrit und Salzfaltung. Z. Kali 28, 93 (1934).
- RIEDEL, W.: Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. Zbl. f. Min. Abt. B 1929, 354.
- RINNE, F.: Plastische Umformung von Steinsalz und Sylvin unter allseitigem Druck. Jb. f. Min. 1904, 1, 114.
- : Bemerkungen zu den experimentellen Erfahrungen von A. GELLER und O. MÜGGE. Ber. üb. d. Verhandl. d. Sächs. Akademie d. Wissensch. Leipzig 1925, S. 25.
- ROŠ, M. u. EICHINGER, A.: Diskussionsbericht der Eidgenöss. Statischen Prüf.-Anst. Zürich 28 (1928).
- ROTHFUCHS, G.: Prüfung von Schotter auf Widerstandsfähigkeit gegen Schlagbeanspruchung. Z. Der Straßenbau 22, H. 35, S. 501 (1931).
- SAENGER, G. u. STÖCKE, K.: Beitrag zur Druckelastizität von natürlichen Gesteinen und Hochofenschlacke unter besonderer Berücksichtigung ihrer mineralischen Zusammensetzung und ihrer Gefügeeigenschaften. Z. Der Straßenbau 22, 311 (1931).
- SEIDL, E.: Bruch- und Fließformen der technischen Mechanik und ihre Anwendung auf die Geologie und Bergbau. VDI-Verlag, Berlin 1930 und 1934.
- : Erfahrungen beim Abbau mächtiger Flöze in großen Teufen und ihre Nutzanwendung auf Oberschlesien. Z. f. Berg-, Hütten- und Salinenwesen 81 (1933).
- : Vorbohren oder Vorstrecken zur Herabsetzung gefährlicher Spannungen im Bergbau. Z. Glückauf 69, 200 (1933).
- : Bruch- und Fließformen der technischen Mechanik und ihre Anwendung auf Geologie und Bergbau. Bd. 5: Krümmungsformen (Biegung, Knickung, Faltung). VDI-Verlag, Berlin 1939.
- SMOLUCHOWSKY, M.: Anzeigen der Akademie der Wissenschaften Krakau, mathem.-naturwissenschaftl. Klasse 1909, 2. 1910.
- SPACKELER, G.: Gewölbekonstruktion über Abbauebenen. Z. Glückauf 70, 589 (1934).
- : Der Nutzdruck als Abbaufolge. Z. Glückauf 65, 461 (1929).
- : Der Druck auf den Kohlenstoß. Z. Glückauf 65, 1753 (1929).
- : Druckwirkungen im Liegenden. Z. Glückauf 66, 757 (1930).
- SPEER, A.: Stein statt Eisen. Z. Der Vierjahresplan 1, 135 (1937).
- SCHAFFER, R. J.: The weathering of building stones. Building Research Nr. 18 (1932).
- SCHMIDT, W.: Tektonik und Verformungslehre. Verl. Springer, Berlin 1932.
- : Festigkeit und Verfestigung von Steinsalz. Z. f. angew. Min. 1, 1 (1937).
- SCHOENE, H. J.: Über die Bestimmung geomechanischer Eigenschaften an Bohrkernen im Laboratorium. Z. Öl und Kohle 13, 1079 (1937).
- SCHULZ, K.: Die Koeffizienten der thermischen Ausdehnung der Mineralien und Gesteine und der künstlich hergestellten Stoffe von entsprechender Zusammensetzung. Fortschr. d. Min., Krist., Petr. 1914, 337.
- SCHWINNER, R.: Scherung, der Zentralbegriff der Tektonik. Zbl. f. Min. 1924, 469.
- : Der Begriff der Scherung in der Tektonik. Zbl. f. Min. 1929, 31.
- STAMATIĆ, M. J.: Beiträge zur Klärung einiger Abbauprobleme bei den rumänischen Salzgruben. Hab.-Schriften Bergakad. Freiberg 1937.
- STINY, J.: Technische Gesteinskunde. Verl. Springer, Berlin Wien 1929.
- STÖCKE, K.: Versuche über das Verhalten von Naturgesteinen gegenüber der Einwirkung von Hitze. Z. Die Steinindustrie 27, 115 (1932).
- : Wie prüft man Straßenbaustoffe? Allg. Industrie-Verlag, Berlin 1932, S. 15 ff.
- : Technische Eigenschaften von Dachschiefer. Z. d. Dt. Geol. Ges. 86, 7 (1934).
- : Die für Gebirgsdruckfragen wichtigsten Begriffe aus der technischen Mechanik. Z. f. Berg-, Hütten- und Salinenwesen 84, 465 (1936).

- STÖCKE, K.: Beurteilung der Wetterbeständigkeit von Naturgestein mittels der vom DVM aufgestellten DIN-Verfahren. Int. Kongr. London 1937, S. 360, 46.  
 —: Geologe und Ingenieur bei der technischen Gesteinsprüfung. Z. f. praktische Geol. **46**, 21 (1938).
- STÖCKE, K. u. BORCHERT, H.: Fließgrenzen von Salzgesteinen und Salztektonik. Z. Kali **30**, H. 20, S. 191 (1936).
- STÖCKE, K., HERRMANN, H. u. UDLUFT, H.: Gebirgsdruck und Plattenstatik. Teil I: Elastizitätsversuche an karbonischen Gesteinen Oberschlesiens. Z. f. Berg-, Hütten- und Salinenwesen **82**, 307 (1934).  
 Teil II: Elastizitätsversuche an Gesteinen aus Niederschlesien und Westfalen. Z. f. Berg-, Hütten- und Salinenwesen **84**, 467 (1936).
- STÜBEL, F.: Prüfung und Bewertung von Gleisbettungstoffen bei der Gesteinsprüfstelle der Reichsbahn. Z. Der Bahnbau 1931, S. 346.
- TROMP, S. W.: On the Mechanism of the Geological undulation Phenomena in General and of Folding in particular and their application to the Problem of the „Roots of Mountains“ Theory. A. W. Sijthoffs Uitgeversmaatschappij N. V., Leiden 1937.
- WALZ, K.: Die Bestimmung der Kornform der Zuschlagstoffe. Z. Die Betonstraße **11**, H. 2, S. 27 (1936).
- WEBER, H.: Der Gebirgsdruck als Ursache für das Auftreten von Schlagwettern. Bläsern, Gasausbrüchen und Gebirgsschlägen. Z. Glückauf **52**, 1025 u. 1053 (1916); **53**, 1, 25, 49, 65, 89, 105 (1917) und **65**, 746 (1929) zum Aufsatz R. BÄRTLING „Gebirgsdruckwirkungen beim Abbau von Steinkohlenflözen“.
- WEISSNER, J.: Gebirgsbewegungen beim Abbau flach gelagerter Steinkohlenflöze. Z. Glückauf **68**, 945 (1932).  
 —: Beobachtungen über Raumverschiebungen in Abbaustrecken. Z. Glückauf **70**, 1041 (1934).  
 —: Erkenntnisse aus der Beobachtung von Gebirgsbewegungen für den Abbau. Z. Glückauf **72**, H. 40 41 (1936).
- WÖHLBIER, H.: Untersuchungen an Gesteinen der Zechsteinformation zur Klärung von Gebirgsdruckfragen im Mansfelder Kupferschieferbergbau und im Kalibergbau. Z. Kali **25**, 167 (1931).