

FREIBERGER
FORSCHUNGSHEFTE

A 156

BERGBAU

RUDOLF KVAPIL

Natürliche Gesteinszerstörung

**Über den Mechanismus der Gesteinszerstörung
durch Zersplittern bei Gebirgsschlägen**



FFH
A156
b

ADEMIE-VERLAG BERLIN

1961

XV | 1142 . A 156
b

Bücherei
• Bergakademie •
Freiberg i. Sa.

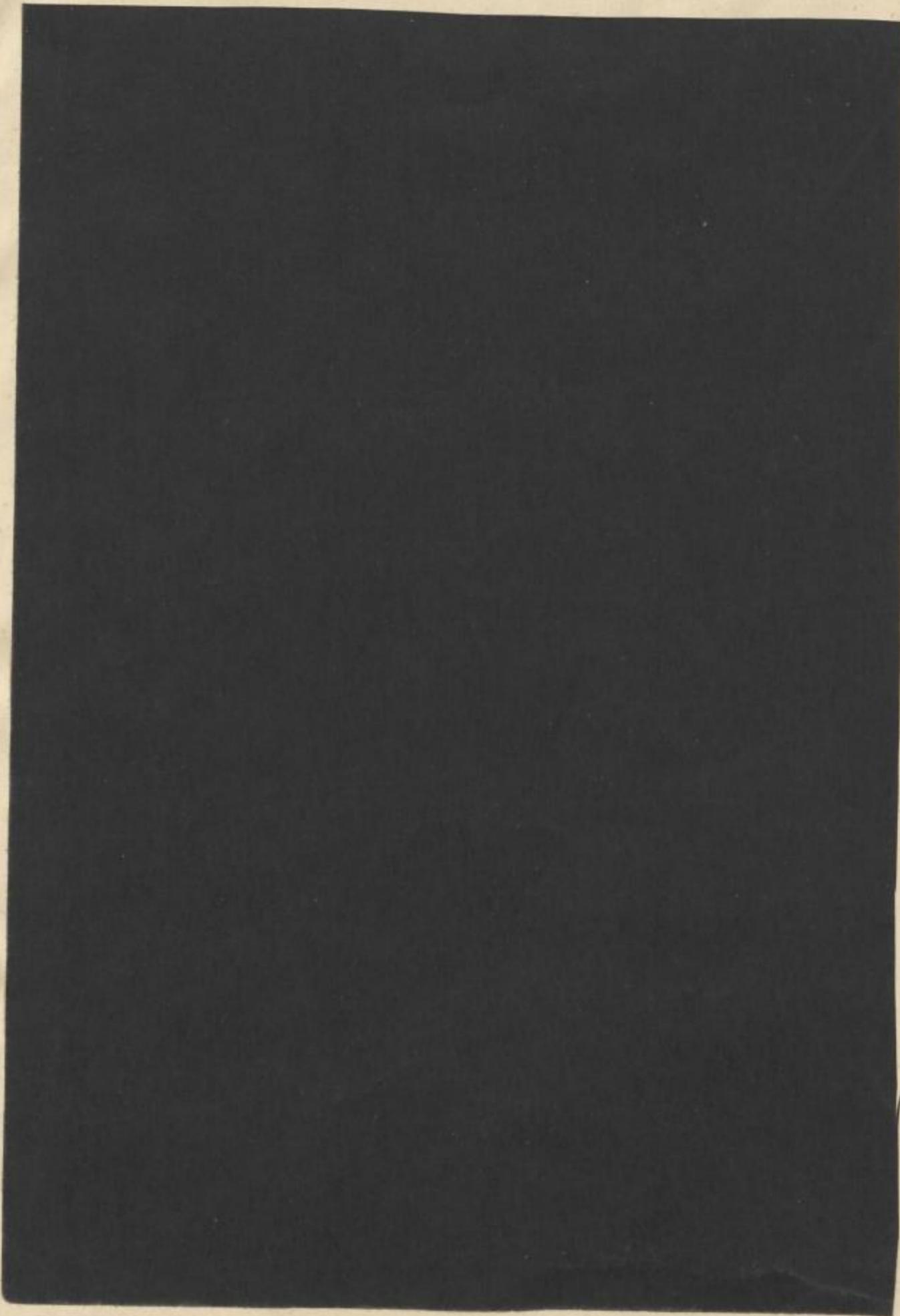


FREIBERGER FORS
A 156

TU BERGAKADEMIE FREIBERG



XUXVI 1142 . A156B



1777

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

A 156

BERGBAU

Natürliche Gesteinszerstörung

**Über den Mechanismus der Gesteinszerstörung
durch Zersplitterung bei Gebirgsschlägen**

Von

RUDOLF KVAPIL



Akademie-Verlag · Berlin

Freib. Forsch.-H.

A 156

S. 1—124

96 Bilder

6 Tabellen

Berlin, August 1961



SLUB

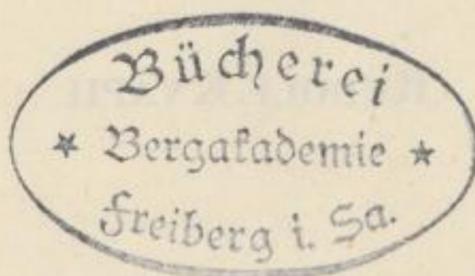
Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



FACHLICHE ÜBERARBEITUNG DER DEUTSCHEN FASSUNG:

1. Arbeit: Prof. Dr.-Ing. GEORG SPACKELER † und
Dipl.-Ing. HERBERT PFORR, Freiberg (Sachsen)
2. Arbeit: Dipl.-Ing. HERBERT PFORR



XVI 1142 (A 156) b

0

Eingang des letzten Manuskripts in der Redaktion am 18. 11. 1960

„Freiberger Forschungshefte“, Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften. Herausgeber: Der Rektor der Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. habil. O. Oelsner. — Chefredakteur: Dipl.-Ing. M. Wolf, Freiberg, Klubhaus der Bergakademie, Aug.-Bebel-Str. 5 (Fernruf 2497, Telex 0578535). — Verlag: Akademie-Verlag GmbH, Berlin W 8, Leipziger Str. 3—4 (Fernruf 220441, Telex 011773), Postscheckkonto 35021. — Die Freiberger Forschungshefte erscheinen in zwangloser Folge in den Reihen A, B, C und D. Ausführliches Verzeichnis aller lieferbaren Hefte von der Redaktion der Bergakademie oder dem Akademie-Verlag. — Preis dieses Heftes: 15,— DM. Bestell-Nr. 2062/A156. Vertrieb: In der Deutschen Demokratischen Republik durch den Buchhandel; in Westdeutschland durch den Buchhandel (Auslieferung KUNST UND WISSEN, Erich Bieber, Stuttgart S, Wilhelmstr. 4—6); im gesamten Ausland durch eine Importbuchhandlung, den Deutschen Buch-Export und -Import, GmbH, Leipzig C 1, Postschließfach 276, oder den Verlag. — Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“ Bad Langensalza. — Lizenz-Nr. 202 · 100/604/61. — Printed in Germany. Alle Rechte vorbehalten. ES 20 F 1/18 F 2

(67. 2267)

INHALT

RUDOLF KAPPEL

Natürliche Gesteinsverwitterung

RUDOLF KAPPEL

Über den Zusammenhang der Gesteinsverwitterung durch Karbonat- und

Gipsverwitterung

Gewidmet

Herrn Prof. Dr.-Ing. GEORG SPACKELER†,

dem hervorragenden Wissenschaftler und großen Menschen

Natürliche Gesteinsverwitterung

INHALT

RUDOLF KVAPIL

Natürliche Gesteinszerstörung 7

RUDOLF KVAPIL

Über den Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei
Gebirgsschlägen 79



INHALT

Natürliche Gesteinszerstörung

INHALT

Einleitung	9
Formen der Gesteinszerstörung	10
Zerstörung der Gesteine durch Zerklüften	11
Zerstörung der Gesteine durch Zersplittern	19
Zerstörung der Gesteine durch Plastizität	20
Gesteinszerstörung vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie	24
Gesteinszerstörung durch Zerklüften vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie	24
Gesteinszerstörung durch Plastizität vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie	41
Das Schwinden des Kristallgitters und Beginn der Plastizität	42
Plastizitätsgrad	44
Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken im plastischen Zustand	45
Absolute Plastizität	46
Teilweise Plastizität	47
Rekristallisation der Gesteine aus dem Zustand teilweiser Plastizität und bleibende Verformung des Kristallgitters	56
Gesteinszerstörung durch Zersplittern vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie	67
Zersplitterung der Gesteine durch schnelle dynamische Beanspruchung	68
Zersplitterung der Gesteine durch eine Änderung des Beanspruchungs- und Verformungscharakters	70
Die Charakteristik der Formen natürlicher Gesteinszerstörung	72
Literatur	75

EINLEITUNG

In der Geophysik, Geologie und im Bergbau ist es notwendig, die Erkenntnisse über die Gesteinselastizität, Gesteinsfestigkeit und Gebirgsmechanik mehr und mehr zu vertiefen, um aus den damit im Zusammenhang stehenden Naturerscheinungen Gesetze abzuleiten und diese in den Dienst der menschlichen Arbeit zu stellen. Die Gebiete der Gesteinselastizität, Gesteinsfestigkeit und Gebirgsmechanik sind sehr umfangreich und kompliziert, da die Anisotropie des Gebirges, der Zusammenhang mit der Umgebung, der Zeiteinfluß, Einflüsse vieler physikalischer Größen usw. einwirken. Da viele, darunter auch Grundlagenfragen, erst erforscht werden müssen, ist es zur Zeit noch nicht möglich die Problematik der angeführten Gebiete vollständig zu lösen.

Diese Arbeit befaßt sich nur mit einem sehr kleinen Ausschnitt aus dem Gebiet der Gesteinselastizität, Gesteinsfestigkeit und Gebirgsmechanik, und zwar nur mit den Fragen, die innerhalb der Geologie, Tektonik, Geophysik und des Bergbaues im Vordergrund stehen, d. h. mit den Problemen der natürlichen Gesteinszerstörung.

In vielen anderen Forschungszweigen ist das wissenschaftliche Laborexperiment schon vor vielen Jahren in die Methodik der wissenschaftlichen Forschung eingeführt worden und ist heute einer ihrer wichtigsten Bestandteile. In der Geologie, Geophysik, Tektonik und im Bergbau sind wir aber erst am Beginn der Experimentalforschung, obwohl ganz gewiß ist, daß ein richtig zusammengestelltes und anberaumtes Experiment gerade in diesen Zweigen eine bedeutend genauere Erkenntnis der gesetzmäßigen Naturvorgänge ermöglichen würde als die bisher angewandten Forschungsmethoden. Damit ist nicht gesagt, daß die in diesen Zweigen bisher und auch heute noch angewandten Forschungsmethoden unbrauchbar wären; aber es soll damit betont werden, daß das wissenschaftliche Experiment in großem Maße zur Erforschung der Vorgänge und zur Erkenntnis der damit zusammenhängenden Naturgesetze beitragen kann. Auf dem Gebiet der geophysikalischen und geologischen Forschung sowie im Bereich der tektonischen Untersuchungen kann das wissenschaftliche Experiment wesentlich zur Lösung prinzipieller Fragen beitragen, von deren Klärung eine erfolgreiche Lösung der einzelnen Probleme abhängig ist.

Diese Arbeit, die sich mit der natürlichen Gesteinszerstörung befaßt, ist auf der Ausnützung experimenteller Ergebnisse begründet, und zwar im Sinne einer Analyse der gegebenen Erscheinungen und einer logischen Übertragung ihrer Gesetzmäßigkeiten bzw. einer Erhärtung ihrer Hypothesen. Die gewonnenen Erkenntnisse können auch dazu dienen, weitere genauere Experimente auszuarbeiten bzw. komplizierte Naturerscheinungen, insbesondere die Vorgänge in den Gesteinen, unter natürlichen

Bedingungen genauer nachzuahmen, um dann daraus eine exakte Bestimmung der Naturgesetze zu erreichen.

Auf diesem Gebiet ist noch viel intensive Arbeit zu leisten. Es sind nicht nur Probleme der Prüfungs- und Apparatechnik bei Experimenten zu lösen, sondern man muß auch philosophische, physikalische und mathematische Fragenkomplexe klären, und zwar im Zusammenhang mit der richtigen Einführung der Zeitkomponente, der energetischen Einflüsse und der Einflüsse der physikalischen Größen der Erde in ein vollkommenes Funktionsexperiment.

Die Bestimmung der Naturgesetze ist unbedingt anzustreben; denn je tiefer unsere Erkenntnisse in diesen Fragen sein werden, um so besser wird man die Naturgesetze zur Erleichterung der menschlichen Arbeit und zur Erhöhung der Arbeitsproduktivität ausnützen können.

FORMEN DER GESTEINSZERSTÖRUNG

In der klassischen Elastizitäts- und Festigkeitslehre werden alle festen Stoffe nach der Zerstörungscharakteristik in zwei Gruppen eingeteilt, und zwar in dehnbare und spröde Stoffe. Für dehnbare Stoffe ist eine der Zerstörung vorangehende starke Verformung charakteristisch, die durch Gleitschub verursacht wird. Stoffe, bei denen die Zerstörung ohne wesentliche Verformung vor sich geht und die durch „Trennung“ zerstört werden, bezeichnen wir als spröde Stoffe. Von diesem Standpunkt leitete TIMOSCHENKO ein Kriterium für die Beurteilung beider Stoffgruppen ab: Ein dehnbarer Stoff ist dadurch gekennzeichnet, daß sein Gleitwiderstand kleiner ist als sein Widerstand gegen Zerreißen; dieser Stoff wird durch Gleitschub zerstört. Für den spröden Stoff ist dagegen charakteristisch, daß sein Widerstand gegen Zerreißen kleiner ist als sein Gleitwiderstand, also durch Zerreißen zerstört wird.

Nach dieser Einteilung gehörten alle Gesteine in die Gruppe der spröden Stoffe. Dies würde jedoch zur Folge haben, daß wir schon von vornherein die Möglichkeit einer Unterscheidung der einzelnen in der Natur vorkommenden Gesteinszustände ausschließen würden. Die Einteilung der festen Stoffe in dehnbare und spröde kann man nur als eine herkömmliche Einteilung für eine bestimmte Beanspruchungsart und für bestimmte Einflußfaktoren betrachten; denn mit einer Änderung des Belastungscharakters, der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der energetischen Einflüsse vollzieht sich auch eine starke Wandlung der angeführten klassischen Charakteristiken. (Diese Fragen werden in den weiteren Kapiteln noch erläutert.)

Die Zerstörung und die Festigkeit der Stoffe untersuchen wir meistens an Proben, die dem zu prüfenden Stoff entnommen werden. Richtige Ergebnisse über die Zerstörung und die Festigkeit eines Stoffes können wir nur bei einer solchen Anordnung der Probe erzielen, die allen tatsächlichen Bedingungen der gegebenen oder erwarteten Beanspruchung des Stoffes völlig entspricht.

Beispiel: Der Berechnung der Festigkeit einer Stahlkonstruktion oder bestimmter Maschinenteile werden Untersuchungen an Probestäben aus den zu prüfenden Teilen zugrunde gelegt, deren Festigkeit und Zerstörung man im Einklang mit der Bean-

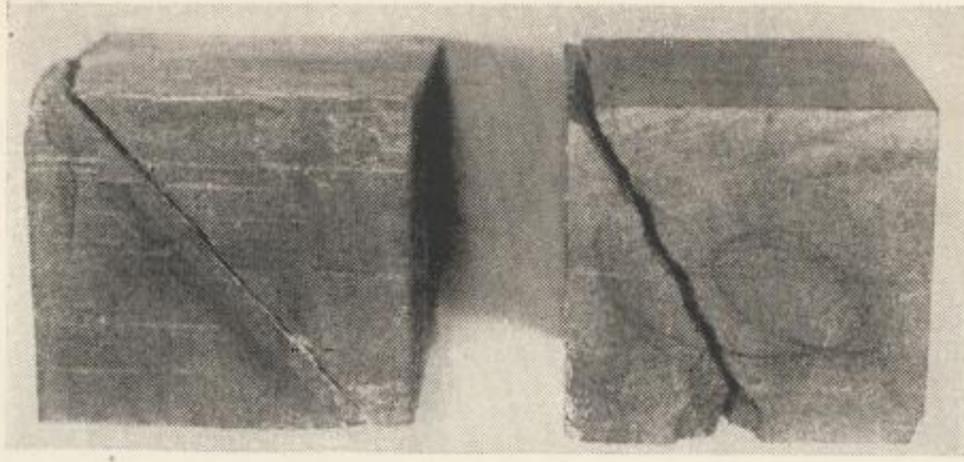


Bild 1

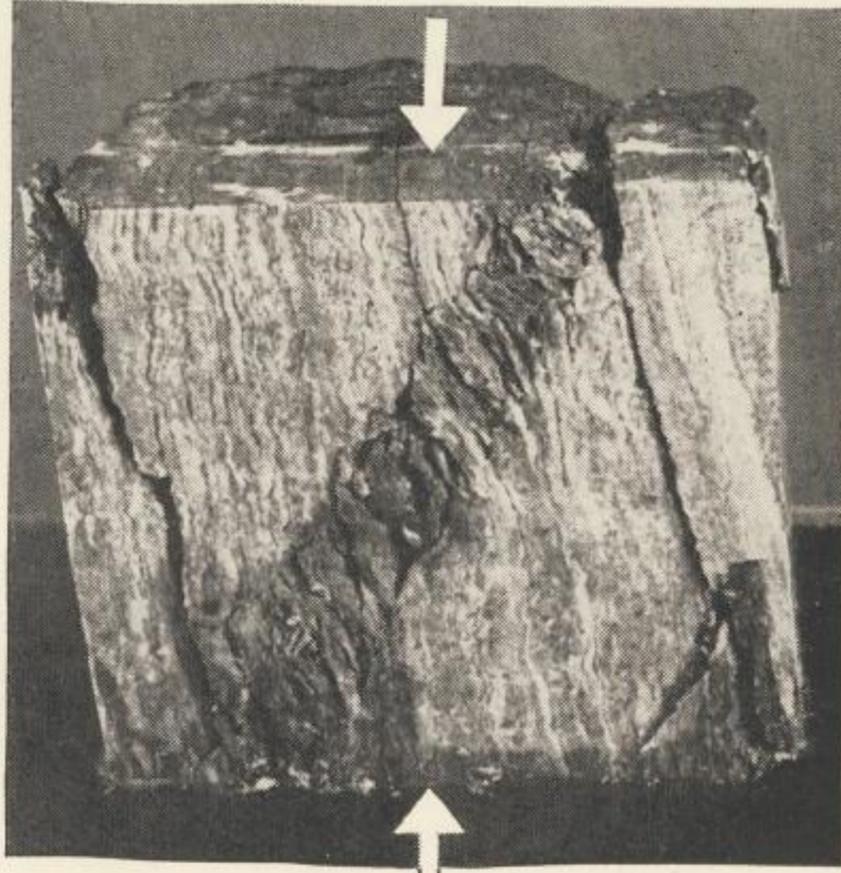


Bild 2



Bild 2a



spruchungsart des Materials unter Betriebsverhältnissen bestimmt hat, d. h., es werden an den Probestäben Untersuchungen auf Zug, Druck, Biegung, Drehung, Dauerschwingen u. dgl. durchgeführt.

In gleicher Weise werden die Baustoffe (Beton, Ziegel, Holz usw.) geprüft. Die Ergebnisse der Versuche entsprechen den wirklichen Werten nur dann, wenn wir bei diesen die Festigkeit des Stoffes bestimmen wollen, der in der Praxis mit Flächen und Ebenen eines bestimmten Körpers begrenzt ist und z. B. die Form einer Säule, einer Platte, eines Balkens, einer Welle usw. hat. Wesentlich erschwert werden die Untersuchungen, wenn der zu prüfende Stoff als zusammenhängende Masse auftritt, also keinen flächenbegrenzten Körper bildet.

Von der Voraussetzung eines kleineren oder größeren Zusammenhaltes müssen wir beim Studium der Gesteinszerstörung unter natürlichen Verhältnissen immer ausgehen. Der Zusammenhalt ist ein Faktor, der unter natürlichen Verhältnissen eine Übertragung der Beanspruchung auf die Umgebung ermöglicht und der also auch die Beanspruchungsart bedingt.

In Abhängigkeit von einer bestimmten Kombination der Beanspruchungsart und des Zeitfaktors und also auch der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Energieeinflüsse (z. B. der Wärme) kann man von drei natürlichen Formen der Gesteinszerstörung sprechen, wobei jede ihre spezifische Zerstörungscharakteristik hat:

- a) Zerstörung durch Zerklüften;
- b) Zerstörung durch Zersplittern;
- c) Zerstörung durch Plastizität.

Bevor die natürliche Gesteinszerstörung vom energetischen Standpunkt erläutert wird, sollen zunächst die Grundzüge der einzelnen Zerstörungsformen dargelegt werden.

Zerstörung der Gesteine durch Zerklüften

Die Zerstörung der Gesteine durch Zerklüften treffen wir in der Bergbaupraxis oft an, z. B. bei der Pfeilerzertrümmerung sowie der Stoß- und Firstenzerstörung. Diese Form der Gesteinszerstörung finden wir auch bei Untersuchungen von Gesteinsproben in Würfel-, Prisma- und Zylinderform, vorausgesetzt, daß die Probekörper nicht zu schnell beansprucht werden.

Diese Zerstörungsform ist dadurch gekennzeichnet, daß hier der Einfluß des Gesteinszusammenhanges gewissermaßen begrenzt ist und dieser sich mehr oder weniger auf den Druckflächen bemerkbar macht. Zur Erläuterung werden wir den Zerstörungsverlauf bei einigen Gesteinsproben betrachten, wobei die Probekörper nur durch reinen Druck beansprucht werden.

Wollen wir das Prinzip der natürlichen Gesteinszerstörung durch Zerklüften richtig erfassen, so müssen wir sorgfältig darauf achten, daß die Druckflächen parallel sind, denn nur unter dieser Voraussetzung ist deren Belastung in der Presse gleichmäßig. Eine ungleichmäßige Belastung des Probekörpers führt dazu, daß vor allem die

Rißbildung nicht klassisch verläuft. Unter der Voraussetzung, daß das zu prüfende Gestein keine inneren Fehler aufweist, ist der Verlauf der Rißbildung von der Beanspruchungsart abhängig.

Den Einfluß einer ungleichmäßigen Beanspruchung der Druckflächen auf die Gesteinszerstörung zeigen die Bilder 1 und 2a. Hier wurden die Gesteinsproben auf Abscherung beansprucht.

Um den Einfluß der ungleichmäßigen Beanspruchung der Druckflächen und die damit verbundene Schubflächenbildung zu veranschaulichen, wurde in Bild 2a als Probe ein feingeschichtetes Gestein gewählt. Dabei entstand keine einfache Schubfläche, sondern ein ganzer Schubbereich, wodurch diese Zerstörungsart eindeutig charakterisiert ist.

Auch können Fälle auftreten, bei denen die Zerstörung unter natürlichen Verhältnissen durch ungleichmäßige Verteilung der Belastung beeinflußt wird. Dies zeigt Bild 2b, das der Arbeit F. SCHAFFERS „Lehrbuch der Geologie“ I. Teil (Leipzig—Wien: F. Deuticke-Verlag, 1922) entnommen wurde.

Die Zerstörung des Gesteins durch ungleichmäßige Beanspruchung der Druckflächen, die auf den vorhergehenden Bildern gezeigt wurde, ist keine selbständige Zerstörungsform, sie gehört vielmehr in die Gruppe der Zerstörung durch Zerklüften.



Bild 3

körperform erhält. Zur Prüfung wurde ein Probekörper aus Kalkstein benutzt. Bewußt wurde hier ein anderes Gestein gewählt, um zu zeigen, daß die Zerstörungscharakteristik bei verschiedenen Gesteinen unveränderlich ist.

Das Prinzip der Gesteinszerstörung muß also unter klassischen Bedingungen untersucht werden, d. h. an Körpern, deren Druckflächen planparallel sind.

Belasten wir eine sachgemäß gewonnene ungeschmierte Gesteinsprobe zwischen zwei parallelen Druckplatten, dann wird die Probe bei einer bestimmten Beanspruchungsgröße zerstört, und es entsteht die bekannte Doppelkegelform. Das Anfangsstadium der Zerstörung an einer zylindrischen Steinsalzprobe wird in Bild 3 gezeigt.

Beanspruchen wir die Gesteinsprobe weiter, so schreitet auch die Zerstörung fort, bis schließlich der ursprünglich eingesetzte Probekörper die in Bild 4 ersichtliche charakteristische Rest-

Die Probereste gleichen dabei Kegeln. Ist die Höhe des Probekörpers genügend groß, dann entstehen zwei Restkegel, die eine gemeinsame senkrechte Achse haben und die sich mit ihren Spitzen berühren. Der obere Kegel solch einer Probe ist auf Bild 4



Bild 4

zu erkennen. Die Lage seiner Achse entspricht der ursprünglichen Lage der Probekörperachse. Rund um den Kegel liegen fächerartig die Bruchstücke von den Seitenwänden, so wie der Probekörper nach und nach zerstört wurde. Bild 5 zeigt eine Teilansicht des oberen Kegels.

Die Bildung der kegelförmigen Reste bei dieser Art der Beanspruchung ist für alle Gesteine charakteristisch für den Fall, daß sie quer zur Schichtung beansprucht werden. Das gilt vorbehaltlos für kompakte Gesteine. Bild 6 zeigt die kegelförmigen Reste verschiedener Gesteine. Besonders bemerkenswert ist, daß die kegelförmigen Reste durch keine Risse — auch nicht mikroskopische Risse — beschädigt sind.

Den größten Einfluß auf die Bildung der kegelförmigen Reste hat der Gesteinszusammenhang auf den Druckflächen.



Bild 5

Grundsätzlich handelt es sich also um die Größe der Reibung auf den Druckflächen, die hier die Funktion des Gesteinszusammenhanges übernimmt, und die Querverformungen treten dann in der Mitte des Probekörpers auf. Eine anschauliche Vor-

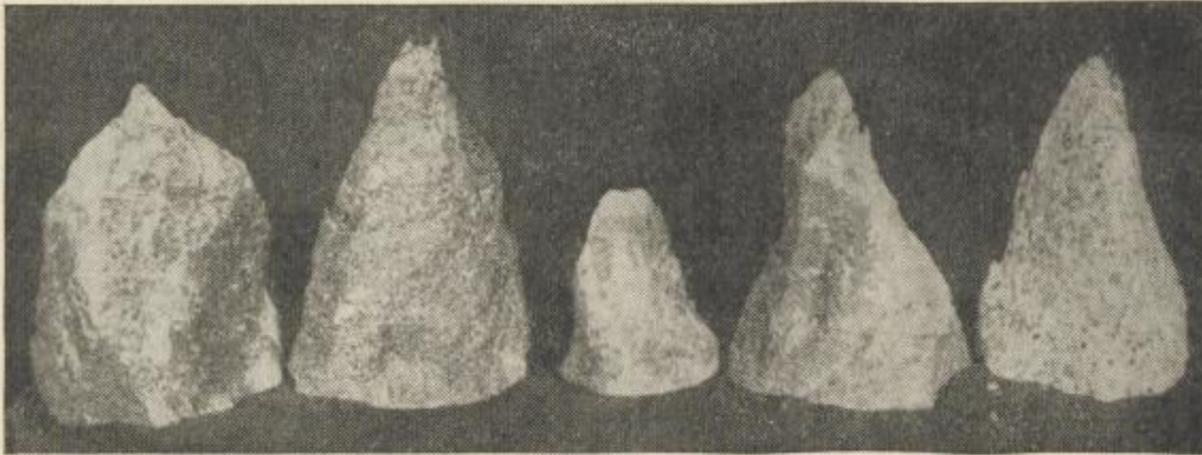


Bild 6

stellung über den Verformungsverlauf bei einem beanspruchten Probekörper mit starker Reibung auf den Druckflächen gibt das Modell 7. Der Verformungsverlauf ist auf dem Modell eindeutig ersichtlich, und zwar aus der Formänderung des ursprünglich quadratischen Gitternetzes, das vor der Prüfung in eine der Seitenwände des Plexiglasmodells eingraviert wurde.

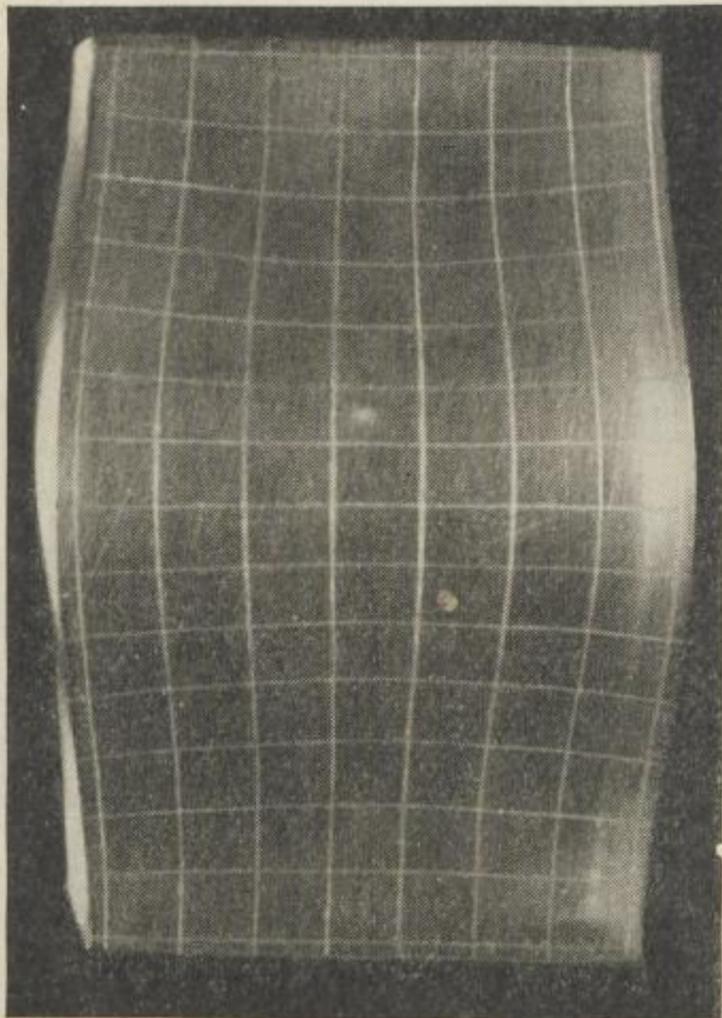


Bild 7

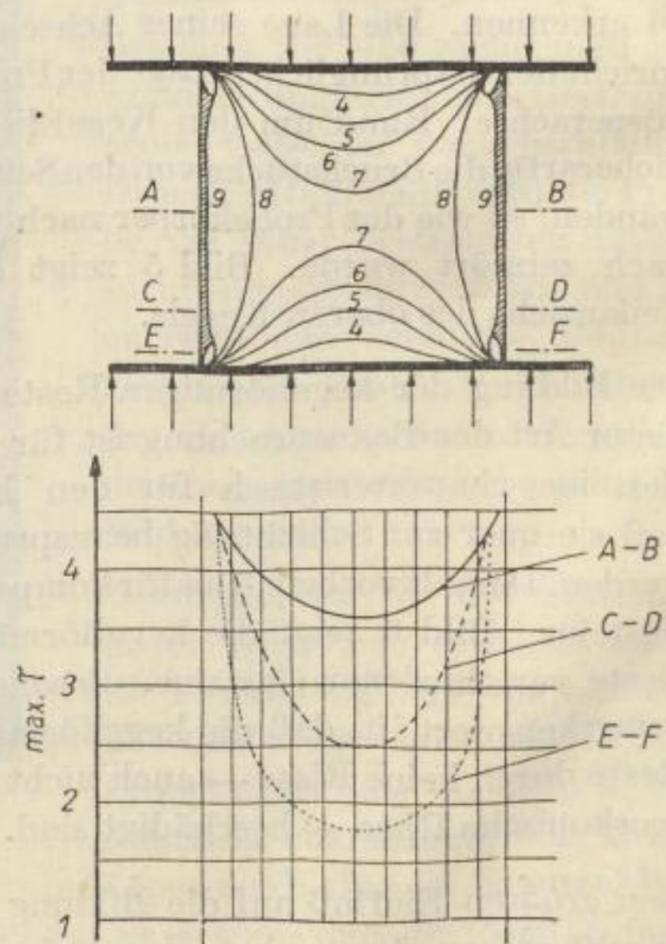


Bild 8

Die Zerstörung des Gesteins durch Zerklüften wird durch eine bestimmte Spannungsverteilung verursacht, derart, daß die Spannungen von den Seitenwänden des Probekörpers nach dessen Mitte verlaufen, und zwar so, daß deren Anordnung die Entstehung der kegelförmigen Reste direkt bedingt. Dieser Zusammenhang kann sehr einfach durch eine spannungsoptische Untersuchung eines einachsig belasteten würfelförmigen Modells bewiesen werden. Auf Bild 8 ist ein würfelförmiges Modell mit den Isochromaten wiedergegeben. Sie geben die Differenz der Hauptspannungen an: da aber die Halbwerte der Differenzen der Hauptspannungen ihrerseits die größte maximale Schubspannung vermitteln, so geben die Isochromaten auch ein Bild über den Verlauf und die Anordnung der maximalen Schubspannungen.

Im unteren Teil des Bildes ist graphisch die Verteilung der Schubspannung in drei waagerechten Modellschnitten — A—B, C—D, E—F — dargestellt. Daraus geht hervor, daß die maximalen Schubspannungen in der Mitte der Druckflächen des Probekörpers am niedrigsten, an den senkrechten Körperseiten am höchsten sind. Vergleichen wir den Verlauf der Isochromate 8 auf Bild 8 mit der Kontur des Körpers in Bild 3, so wird klar, daß die Zerstörung durch Schub eintrat, wobei für das Endstadium kegelförmige Reste charakteristisch sind.

Proben aus anderen Stoffen als Gesteinen, z. B. aus Metallen, werden bei gleicher Beanspruchung auf gleiche Weise zerstört. Als Beispiel sei die Zerstörung einer zylindrischen Bronzeprobe angeführt (Bild 9a, b). Diese Probe wird bei Druckbeanspruchung durch Gleitschub (Abscheren) zerstört, wozu die Schubspannungen den Impuls geben, deren Wert in Richtung bestimmter kristallographischer Flächen die kritische Höhe erreicht.

Da die Verteilung und der Verlauf der Spannungen in der Bronzeprobe und in der Gesteinsprobe prinzipiell gleich sind, so muß nach der Zerstörung auch die gleiche

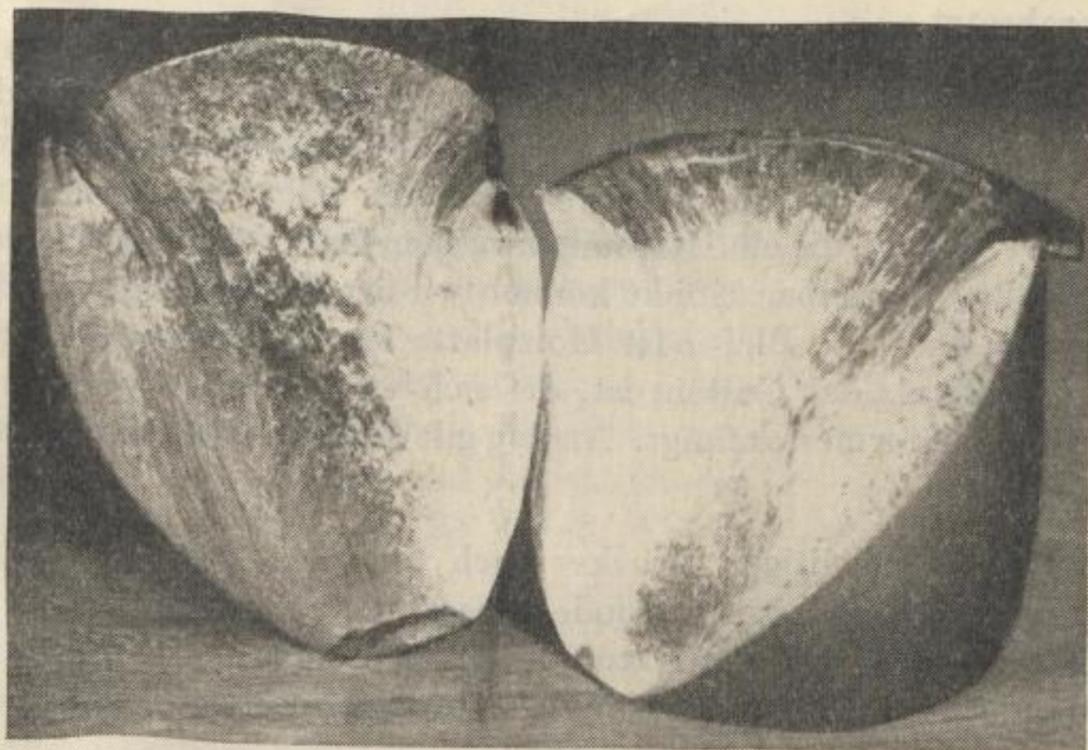


Bild 9a

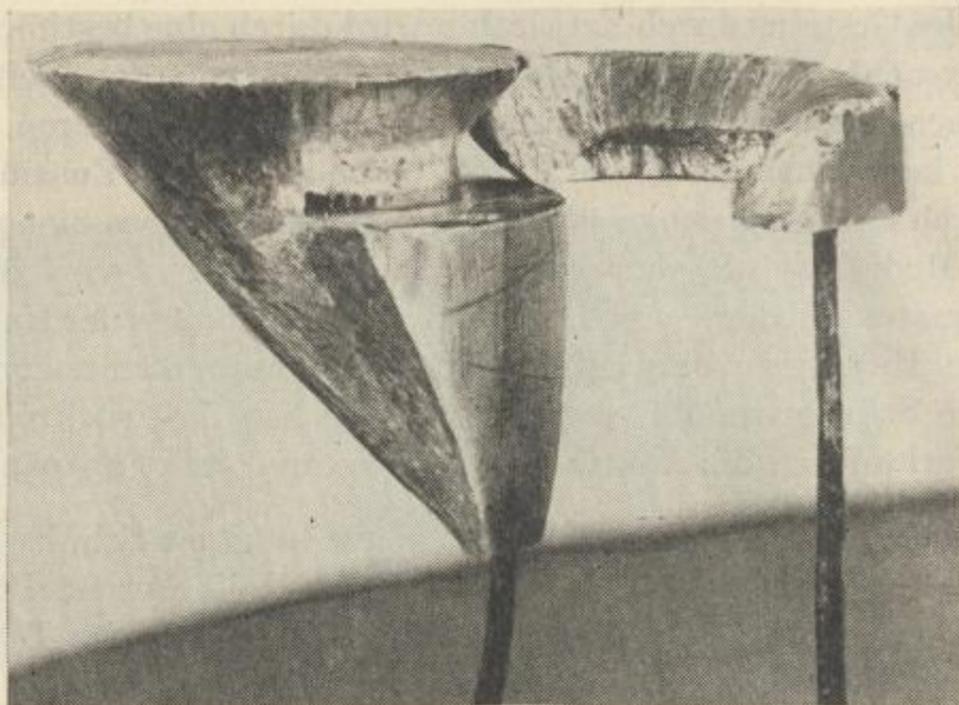


Bild 9b

Endform entstehen. Der abgescherte kegelförmige Teil der Metallprobe ist auf Bild 9b gut sichtbar, besonders nach Entfernung des oberen Randteiles, der dem Fuß des Kegels von einer Seite anhaftet.

In der Natur finden wir auch Fälle, wo der Einfluß des Gesteinszusammenhanges, also auch die Reibung an den Druckflächen, wesentlich vermindert oder gegebenenfalls auch ganz beseitigt wird.

Für den Fall der Reibungsverminderung auf den Druckflächen ist z. B. der Pfeiler charakteristisch, der an Firste und Sohle durch eine wenn auch sehr dünne Tonschicht (besonders wenn sie feucht wird) die Reibung auf den Druckflächen des Pfeilers wesentlich herabsetzt.

Im Laborversuch können wir diese Voraussetzung der Reibungsverminderung sehr einfach und gut nachahmen, indem wir die beiden Druckflächen des Probekörpers, ehe wir diesen in die Presse legen, mit einer Paraffin- oder Stearinschicht oder einer anderen Schicht versehen, die eine Reibung zwischen dem Probekörper und den Preßplatten ausschließt. Denselben Effekt können wir erreichen, wenn wir zwischen die Druckflächen eine Gummi-, Blei- oder Holzplatte legen, also eine Platte aus einem weniger festen Stoff als das Gestein ist, die sich von einer bestimmten Beanspruchungsgröße an zu verformen anfängt. Analog gilt dies auch für ähnliche in der Natur auftretende Fälle.

Bei diesem fast rein einachsigen Druckversuch verstärkt sich die Querverformung nicht bis zur Mitte des Probekörpers, sondern sie ist über die gesamte Probenhöhe hinweg gleich groß. Es fehlt hier der Faktor, der die Querverformung des Körpers in dieser Ebene verhindern könnte. Infolge eines solchen Verformungsverlaufes entstehen bei der Zerstörung des Körpers nicht kegelförmige Reste, sondern das Gestein wird durch senkrechte Klüfte zerstört (Bild 10).

Zur Veranschaulichung des Verformungsvorganges bei Körpern, von deren Druckflächen jede Reibung ferngehalten wurde, wurde ein Modell aus Plexiglas benutzt. Durch Beanspruchung hat sich das ursprünglich quadratische Gitternetz in ein



Bild 10

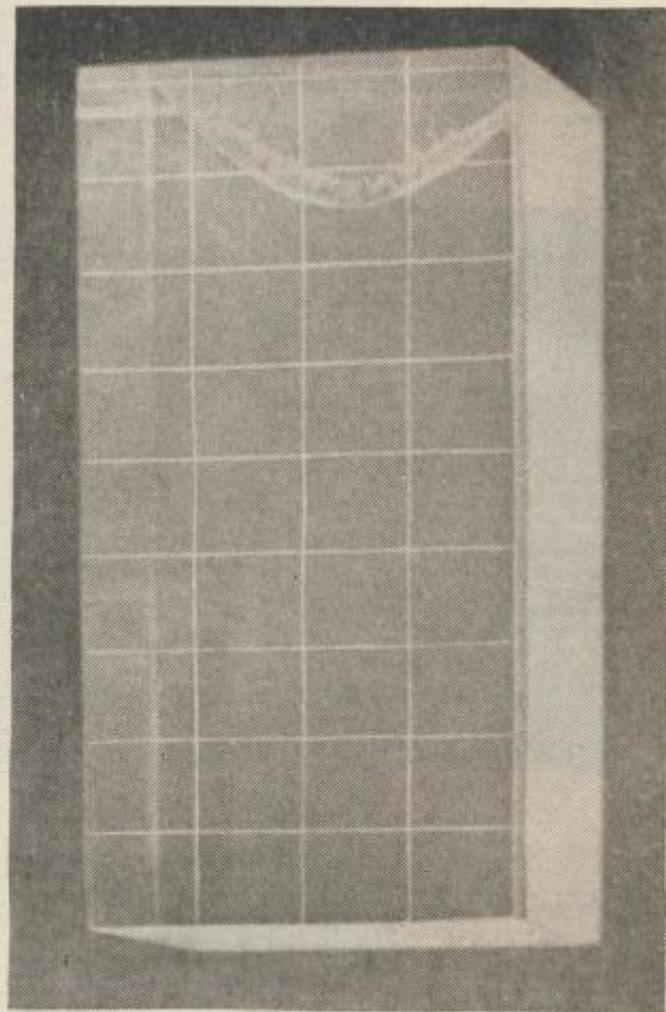


Bild 11

rechteckiges Gitternetz verwandelt, dessen Längsseite in Richtung der Querverbindung liegt (Bild 11).

Aus der Formänderung des Gitternetzes ist eindeutig zu erkennen, daß die Querverformung des geschmierten Probekörpers die ganze Höhe entlang gleich groß ist. Die Charakteristik des Verlaufes der maximalen Schubspannungen wurde prinzipiell durch spannungsoptische Untersuchungen bestimmt. Bild 12 zeigt das Ergebnis. Im Bild sind die Isochromaten aufgezeichnet und die maximalen Schubspannungen (Schnitt A—B, D—C, E—F) graphisch dargestellt.

Der Verlauf der maximalen Schubspannungen ist entsprechend der Querverformung in allen Querschnitten des Probekörpers gleich. Deshalb ist für alle drei Modellschnitte des Bildes 12 eine einzige

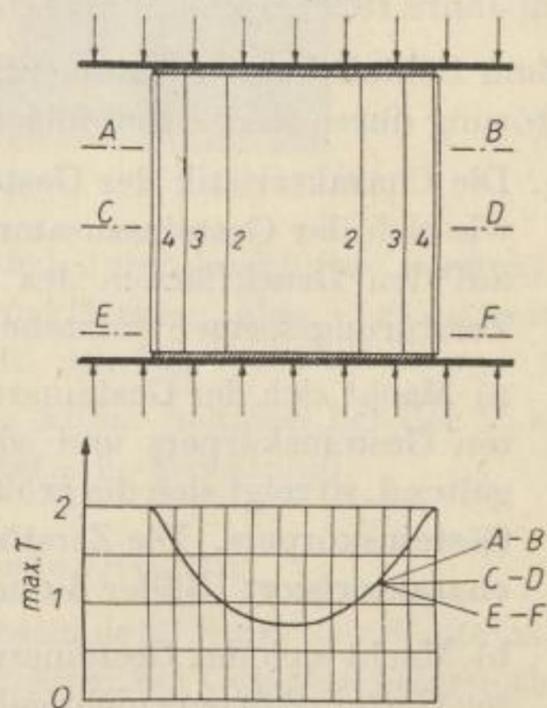


Bild 12

Schubspannungskurve charakteristisch; sie ist im unteren Teil des Bildes eingezeichnet.

In Bild 13 werden die zerstörten Würfelproben von drei verschiedenen Gesteinen gezeigt, auf deren Druckflächen durch Schmierung die Reibung annähernd vermieden wurde. Durch bestimmte Struktur des Gesteins kann der für die Zerstörung durch Zerklüften klassische Verlauf der Klüfte gestört werden, wie es auf dem rechten Würfel zu sehen ist.

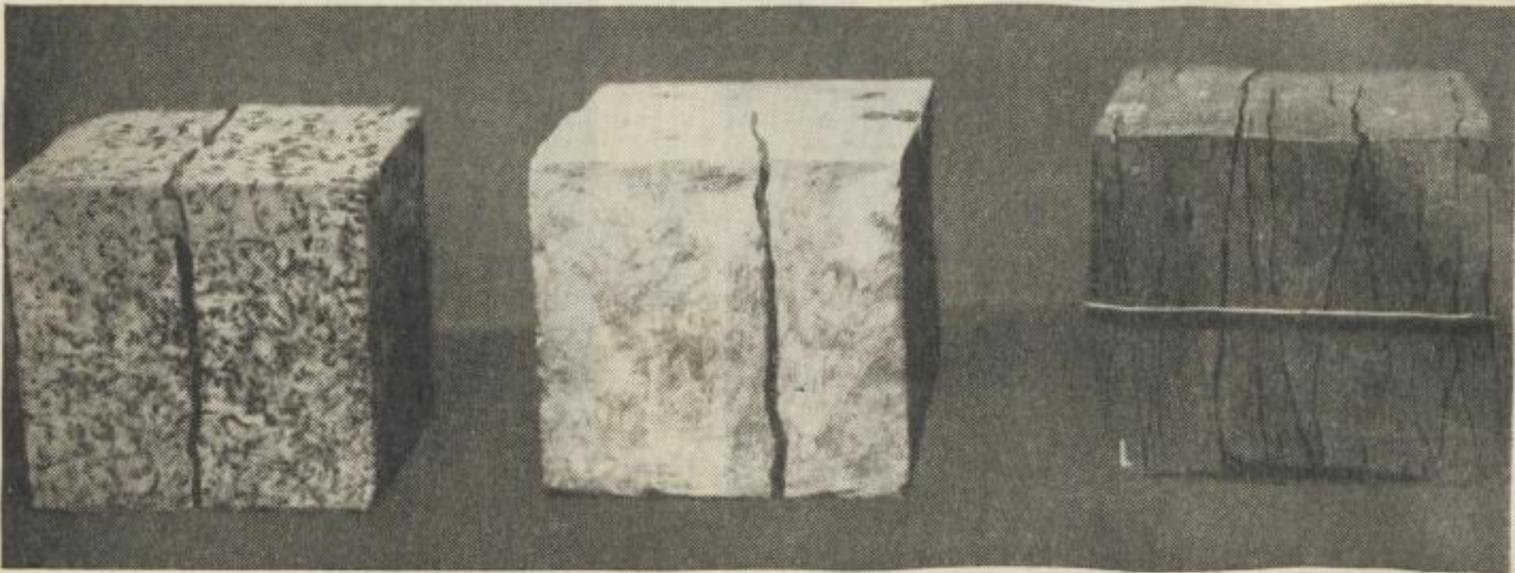


Bild 13

Was für einen großen Einfluß der Ausschluß der Reibung auf den Druckflächen der Gesteinsprobe auf den Charakter der Zerstörung hat, zeigt eindeutig die Zerstörung der Gesteinsprobe, deren Höhe einigemale größer ist als deren Breite (Bild 14). Auch in diesen Fällen ist die Querverformung des Probekörpers die ganze Höhe entlang gleich groß, so daß das Gestein durch senkrechte Risse zerklüftet wird. Die ersten Versuche mit solchen Probekörpern wurden von ROŠ und EICHINGER schon im Jahre 1928 durchgeführt (Diskussionsbericht Nr. 28, E. M. P. A. — Zürich).

Zum Schluß kann zusammenfassend festgestellt werden, daß für die Gesteinszerstörung durch Zerklüften folgende Erscheinungen charakteristisch sind:

1. Die Charakteristik der Gesteinszerstörung durch Zerklüften ist davon abhängig, wie sich der Gesteinszusammenhang geltend macht, bzw. wie stark die Reibung auf den Druckflächen des beanspruchten Gesteinskörpers ist; es können zwei Zerstörungsformen entstehen:
 - a) Macht sich der Gesteinszusammenhang auf den Druckflächen des beanspruchten Gesteinskörpers und somit eine gewisse Reibung auf diesen Druckflächen geltend, so zeigt sich die größte Querverformung in halber Höhe des beanspruchten Gesteinskörpers. Die Zerstörung ist dann durch die Bildung kegelförmiger Reste charakterisiert (Bilder 5 und 6).
 - b) Macht sich der Gesteinszusammenhang auf den Druckflächen des beanspruchten Gesteinskörpers nicht geltend, ist also die Reibung auf den Druckflächen vermindert, dann ist die Querverformung die ganze Höhe des beanspruchten Gesteins-



Bild 14

körpers entlang praktisch gleich. Das Gestein wird durch Zerklüften zerstört, wobei die entstehenden Risse senkrecht zu den Druckflächen, also parallel mit der Beanspruchungsrichtung verlaufen (Bilder 10, 13, 14).

2. Die Belastungsgeschwindigkeit und die Belastung selbst nehmen bei der Zerstörung durch Zerklüften langsam zu (etwa quasistatische Belastung).

Zerstörung der Gesteine durch Zersplittern

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern ist eine besondere Form der Gesteinszerstörung. Im Bergbau treffen wir diese Zerstörungsform bei Gebirgsschlägen als typische Erscheinung an.

Für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern ist kennzeichnend, daß alle Komponenten, die die Zerstörung bedingen, so gruppiert sind, daß der Gesteinskörper blitzschnell in kleine Stücke mit einem großen Anteil an Feinkorn und Staubteilchen zerfällt.

Mit Rücksicht darauf, daß die Gesteinszerstörung durch Zersplittern sehr kompliziert ist, widmet der Autor diesem Gegenstand eine besondere Arbeit (siehe dieses Heft Seite 79), in der diese Problematik sehr gründlich bearbeitet wird. Der Vollständigkeit halber ist es jedoch notwendig, hier wenigstens die Hauptcharakteristika dieser Zerstörungsform der Gesteine anzuführen.

Obwohl das Gestein am Ende der Zerstörung durch Zersplittern in kleine Stücke mit einem großen Anteil an Feinkorn und Staubteilchen zerfällt, können wir auch bei dieser Zerstörungsform der Gesteine einzelne Fälle feststellen, die sich voneinander durch Ursache und Mechanismus des Zerstörungsvorganges unterscheiden:

1. Gesteinszerstörung durch schnelle dynamische Beanspruchung.
2. Gesteinszerstörung durch bestimmte Änderung des Belastungs- und damit des Verformungscharakters des beanspruchten Gesteinskörpers.
3. Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge einer Kombination der unter 1. und 2. angeführten Ursachen.

Damit sind jedoch noch nicht alle möglichen Fälle der Gesteinszerstörung durch Zersplittern erfaßt, auch wenn wir nur die Fälle natürlicher Gesteinszerstörung in Betracht ziehen. Zur Zerstörung des Gesteins durch Zersplittern kann es auch infolge einer Nachverformung kommen, die aus der Wirkung der Restspannungen resultiert (diese Art entspricht etwa der Zerstörung durch Änderung des Verformungscharakters).

Allgemein kann man sagen, daß es sich im Grunde um einen Effekt handelt, der durch schnelle Beanspruchung hervorgerufen wird. Dabei ist die Belastungsgeschwindigkeit auch im Falle der Änderung des Verformungscharakters unter den gegebenen Bedingungen so groß, daß das Gestein völlig spröde reagiert und zersplittert.

Zerstörung der Gesteine durch Plastizität

Unter der Voraussetzung, daß für die Gesteinszerstörung die Änderung des ursprünglichen Zustandes bezeichnend ist, sind wir berechtigt, die Plastizität der Gesteine als eine besondere Zerstörungsform zu betrachten, zumal die Zerstörung durch Übergang in den plastischen Zustand eine höhere Zerstörungsform darstellt als die durch Zerklüften oder Zersplittern. Bei der Zerstörung durch Plastizität ändern sich nicht nur die mechanischen Eigenschaften der Gesteine, sondern es treten Änderungen der physikalischen Eigenschaften auf; denn der feste Aggregatzustand des Gesteins geht in einen plastischen über.

Zum Verständnis der Problematik der Gesteinszerstörung durch Plastizität muß man berücksichtigen, daß das Gestein nur während der aktiven Wirkung bestimmter Faktoren im plastischen Zustand ist.

Lassen wir den Einfluß der Wärme, der in den weiteren Kapiteln behandelt wird, vorläufig unbeachtet, dann muß für die Erreichung der Plastizität hauptsächlich die Bedingung eines allseitigen Gesteinszusammenhanges erfüllt sein; denn der allseitige Gesteinszusammenhang ist in der Natur ein Hauptfaktor, der eine Beanspruchung des Gesteins durch allseitigen — gleichmäßigen oder ungleichmäßigen — Druck bis zu seinem plastischen Zustand ermöglicht.

Im wesentlichen unterscheiden wir drei Formen der Gesteinsplastizität:

1. die scheinbare Plastizität
2. die teilweise Plastizität
3. die absolute Plastizität

1. *Scheinbare Plastizität*

Die „scheinbare Plastizität“ ist dadurch gekennzeichnet, daß hier Formänderungen auftreten, bei denen der Einfluß des Gesteinszusammenhanges nicht unbedingt notwendig ist. Diese Plastizitätsform führt zu einer bleibenden Verformung, die in der Ingenieurpraxis als plastische Verformung bezeichnet wird und durch gezielte Gleitung auf den kristallographischen Ebenen verursacht wird.

An der Entstehung der scheinbaren Plastizität kann der Zeitfaktor im Sinne einer langdauernden, wenn auch sehr kleinen Beanspruchung beteiligt sein.

Es ist z. B. bekannt, daß sich Gesteinsanschliffe durch mehrjährige Auflagerung auf kantigen Unterlagen sehr stark durchgebogen haben. Es handelt sich hier um eine bleibende Durchbiegung im Bereich der scheinbaren Plastizität.

Innerhalb dieser Gruppe treten auch viele bedeutende Probleme auf, die jedoch mangels einer vollkommenen Kenntnis der wahren Plastizität bis jetzt noch nicht befriedigend gelöst werden konnten. Durch Erforschung der wahren Plastizität konnten das Problem des Gleitens auf den kristallographischen Flächen sowie andere Probleme (z. B. infolge der Hysterese und der rheologischen Prozesse) gelöst werden.

Zur kurzen Erläuterung seien die Grundsätze angeführt, die für die scheinbare Plastizität kennzeichnend sind:

- a) Die scheinbare Gesteinsplastizität ist nicht durch einen allseitigen Gesteinszusammenhang bedingt.
- b) Für die scheinbare Plastizität ist die bleibende Verformung kennzeichnend, die meistens durch Gleiten auf den kristallographischen Ebenen bei langdauernder Beanspruchung verursacht wird.
- c) Durch die scheinbare Plastizität ändern sich nicht die Grundeigenschaften der Gesteine — die Anordnung der Massepunkte im Kristallgitter bleibt unverändert.

2. *Teilweise Plastizität*

Die teilweise Plastizität ist schon eine wahre Plastizität; denn während ihrer Dauer erfolgt ein gewisser Übergang vom festen Aggregatzustand des Gesteins in den plasti-

sehen. Die Erforschung dieses Stadiums und der teilweisen Plastizität ist von außerordentlich großer Bedeutung, die jedoch bisher nicht richtig bewertet wurde, obwohl die Kenntnis der teilweisen Plastizität Ausgangspunkt für die Lösung der tektonischen Probleme und deshalb auch für die Lösung der Probleme verschiedener Zweige der Gebirgsmechanik ist (z. B. in der Geologie, geologischen Prospektion, Geophysik, in der Gebirgsdruckforschung).

Aber besonders auf dem Gebiet der Tektonik werden uns die Erkenntnisse über die teilweise Plastizität manche Naturgesetze zu erkennen erlauben, mit deren Hilfe es möglich sein wird, viele, bisher noch nicht gelöste Fragen der Tektonik zu erklären und zu begründen.

Die teilweise Plastizität kann wie folgt charakterisiert werden:

- a) Die teilweise Gesteinsplastizität ist durch allseitigen Gesteinszusammenhang bedingt.
- b) Zur teilweisen Plastizität kommt es bei einer allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung.
- c) Während der Dauer der teilweisen Plastizität ändern sich auch die mechanischen und physikalischen Grundeigenschaften des Gesteins; der feste Aggregatzustand des Gesteins geht in den plastischen (Aggregatzustand) über.
- d) Nach Abklingen der teilweisen Plastizität weist das Gestein eine bestimmte bleibende Änderung des inneren Aufbaues — eine bleibende Verformung des Kristallgitters — auf.
- e) Während der Dauer der teilweisen Plastizität hat das Gestein einen größeren Widerstand gegen Zusammendrücken als im nichtplastischen, also elastischen Zustand.

Die Wichtigkeit der vollkommenen Erkenntnis der teilweisen Plastizität liegt auf der Hand, wenn man sich vergegenwärtigt, daß dieser Zustand bei der Bildung vieler tektonischer Formen (Furchen, Flexuren, Diapire usw.) unbedingt nötig war.

Die Grundforschung der Probleme der teilweisen Plastizität ist sehr schwierig und gleichzeitig sehr aufwendig hinsichtlich Apparaturenausstattung. Man kann jedoch voraussetzen, daß ihre Ergebnisse die aufgewandte Mühe lohnen werden.

3. Absolute Plastizität

Die vollkommene oder absolute Plastizität ist die höchste Form der Gesteinszerstörung bei mechanischer Beanspruchung. Dieser Zustand führt zu einer vollkommenen Änderung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Gesteins.

Wir nehmen an, daß ein Zustand absoluter Plastizität zwischen der Erdrinde — Lithosphäre und dem Erdkern besteht.

Die Erforschung der absoluten Plastizität bei festen und harten Gesteinen ist bis jetzt noch unvollkommen, obwohl es gelungen ist, einige Gesteinsproben in einen sehr hohen plastischen Zustand zu versetzen. Die Gesteinsproben während der Dauer

der Plastizität zu untersuchen, scheiterte daran, daß die bisherigen Konstruktionen der Prüfmaschinen nicht geeignet waren.

In groben Umrissen können wir die Gegebenheiten, die für den Zustand der absoluten Plastizität kennzeichnend sind, folgendermaßen definieren:

- a) Die absolute Plastizität des Gesteins in natürlichen Verhältnissen ist durch einen allseitigen Gesteinszusammenhang bedingt.
- b) Das Gestein wird durch einen allseitigen und gleichmäßigen Druck beansprucht.
- c) Während der Dauer der absoluten Plastizität ändern sich die mechanischen und physikalischen Grundeigenschaften des Gesteins; denn es verschwindet das Kristallgitter. Nach dem Ausklingen der absoluten Plastizität weist das Gestein bestimmte Änderungen im Kristallgitter auf.
- d) Während der Dauer der absoluten Plastizität konvergiert der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken zum Unendlichen; das Gestein kann praktisch nicht weiter zusammengedrückt werden.

Während bei der absoluten Plastizität, die durch mechanische Beanspruchung hervorgerufen wird, keine Änderung des Massepunktes, sondern nur eine Änderung der Anordnung der Massepunkte auftritt, kann durch eine starke energetische Wirkung eine Verdichtung selbst der einzelnen Massepunkte — der Atome — erzielt werden. Um den Atomkern sind die Elektronen in den Elektronenhüllen angeordnet, wobei jede Hülle (jede Elektronenbahn) eine bestimmte Anzahl von Elektronen enthält. Die äußere Elektronenhülle bestimmt die chemischen Eigenschaften des Elementes. Durch einen sehr großen energetischen Druck, den der sowjetische Wissenschaftler KAPUSTINSKIJ etwa auf 1.400.000 Atmosphären abschätzt, werden die Elektronen der äußeren Hülle zwischen die Elektronen der dem Atomkern näherliegenden Elektronenhülle gedrückt; es tritt eine Verdichtung der Atome und auch der Masse auf, und das Element verliert seinen ursprünglichen chemischen Charakter. Es ändern sich vollkommen die ursprünglichen Eigenschaften. Selbstverständlich erhöht sich dabei bedeutend das spezifische Gewicht, und zwar um so mehr, je größer die Verdichtung als Folge der Einpressung der Elektronen aus den äußeren in die inneren Elektronenhüllen ist.

So entsteht ein Aggregatzustand ohne chemische Eigenschaften; es handelt sich im gegebenen Falle um den Aggregatzustand verdichteter Atome. Dieser Zustand wird für das Innere der Erdkugel vorausgesetzt. Auf Grund der Existenz dieses Aggregatzustandes können wir auch das enorme Gewicht einiger, relativ sehr kleiner Weltallkörper, der sogenannten „schweren Zwerge“ begründen.

Der Aggregatzustand verdichteter Atome wird als fünfter Aggregatzustand bezeichnet. Wir unterscheiden heute folgende Aggregatzustände:

1. Gasförmiger Aggregatzustand,
2. flüssiger Aggregatzustand,
3. fester Aggregatzustand,
4. plasmatischer Aggregatzustand (entsteht bei thermonuklearen Reaktionen)
5. Aggregatzustand verdichteter Atome.

GESTEINSZERSTÖRUNG VOM STANDPUNKT DER POTENTIELLEN SPANNUNGSENERGIE

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wurde die Gesteinszerstörung — auf Grund der Zerstörungscharakteristik im Endstadium des Zerstörungsverlaufes — in drei Hauptgruppen eingeteilt. Die einzelnen Zerstörungsformen wurden vom Standpunkt der Kräfte und der Spannungen dargelegt. Die Voraussetzung, daß z. B. die Zerstörung durch Zerklüften durch eine bestimmte Anordnung und einen bestimmten Verlauf der Spannungen verursacht wird, ist richtig, aber sie erfaßt nicht die Ursache der Zerstörung, sondern nur die Endphase, also nur die Folgen der Ursache.

Wenn wir uns dessen bewußt sind, daß sich weder die Kräfte noch die Spannungen im Gestein akkumulieren können, so ist klar, daß diese auch nicht Ursache der Zerstörung sein können. Aus diesem Grunde können wir die Ursache der Gesteinszerstörung vom energetischen Standpunkt so formulieren:

Ursache der Gesteinszerstörung sind bestimmte Umwandlungen der im Gestein akkumulierten potentiellen Spannungsenergie.

Die Akkumulation und die Umwandlungen der potentiellen Spannungsenergie im Gestein verlaufen jedoch nicht beliebig, sondern sind für die einzelnen Formen der Gesteinszerstörung gesetzmäßig.

Im weiteren werden die einzelnen Formen der Gesteinszerstörung vom Standpunkt der Akkumulation und der Umwandlung der potentiellen Spannungsenergie erläutert.

Gesteinszerstörung durch Zerklüften vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie

Das Gestein wird durch Beanspruchung verformt. Durch mechanische Beanspruchung werden jedoch nicht die Massenteilchen an sich, sondern nur die Bindung dieser Massenteilchen deformiert. Bei Belastung akkumuliert sich die potentielle Energie eben in diesen Bindungen. Die Bezugsgröße der potentiellen Energie wird als Grundwert bezeichnet. Er wird verkörpert durch das Gestein im unbeanspruchten Zustand. Durch Beanspruchung vergrößert sich die potentielle Energie, und zwar wird diese im Gestein akkumuliert. Die Massepunkte, die Ionen besitzen ein bestimmtes Quantum an kinetischer Energie, die ihren Ursprung in den Schwingbewegungen der Ionen und den Gleichgewichtslagen hat. Im festen Zustand ist das Quantum an potentieller Energie im Gestein unvergleichlich größer als das Quantum an kinetischer Energie. Analog gilt dies auch für die Moleküle.

Die äußeren Kräfte führen zu einer Verformung des beanspruchten Körpers. Die Kräfte üben bei der Beanspruchung eine Arbeit aus, die sich in einem vollkommen elastischen Stoff in potentielle Spannungsenergie umwandelt, während sie sich in einem unelastischen Stoff nur zum Teil in potentielle Spannungsenergie umwandelt. Die potentielle Energie akkumuliert sich im Körperstoff. Entlasten wir den Körper, dann erregt die in den Kräftebindungen zwischen den Massepunkten aufgespeicherte potentielle Spannungsenergie eine Bewegung der Massepunkte in einer bestimmten Richtung, die zur Annullierung der vorangehenden Verformung führt. Sie leistet also eine Arbeit zur Annullierung der Verformung. Diese Umwandlung der potentiellen Spannungsenergie in Arbeit zur Beseitigung der Verformung, die durch die vorangehende Beanspruchung verursacht wurde, ist charakteristisch für die Plastizität der Stoffe.

Der Umwandlungsprozeß der im Gestein gespeicherten potentiellen Spannungsenergie in Arbeit ist sicher sehr kompliziert, besonders bei Stoffen, die nicht vollkommen elastisch sind; denn ein Teil der akkumulierten potentiellen Energie kann sich in diesen Stoffen nach deren Entlastung in andere Energieformen umwandeln. Eine genaue Lösung dieses Problems gehört jedoch ausschließlich in das Gebiet der höheren Physik. Deshalb begnügen wir uns im weiteren mit der gekürzten Formulierung, daß sich die potentielle Spannungsenergie in Arbeit umwandelt. Dadurch entsteht jedoch eine gewisse Ungenauigkeit im Detail, und zwar bezüglich des Quantum der potentiellen Energie, die sich in Arbeit umwandelt.

Bei Zerstörung des Gesteins durch Zerklüften handelt es sich im Grunde um die Umwandlung potentieller Spannungsenergie in Arbeit, durch welche das Gestein durch Zerklüften zerstört wird. Dabei verläuft die Umwandlung der potentiellen Energie in Arbeit bei der Beanspruchung des Gesteins auf der Festigkeitsgrenze. In Arbeit wandelt sich das maximale Quantum potentieller Spannungsenergie um, welches das Gestein an der Elastizitätsgrenze aufspeichert.

Die Ursache der Gesteinszerstörung durch Zerklüften können wir vom Standpunkt der potentiellen Energie folgendermaßen definieren:

Die Ursache der Gesteinszerstörung durch Zerklüften ist durch die Umwandlung der potentiellen Energie — bei Beanspruchung des Gesteins bis zur Höhe seiner Festigkeitsgrenze — in Arbeit gekennzeichnet.

Die Zerstörung der Gesteine durch Zerklüften ist wesentlich vom Gesteinszusammenhang (Reibungsstärke auf den Druckflächen) und vom unterschiedlichen Druckflächenzustand abhängig.

Für den Fall, daß Reibung vorhanden ist, ist kennzeichnend, daß hier die Querverformung in der Mitte zwischen den Druckflächen am größten ist.

Bei stark verminderter bzw. fehlender Reibung an den Druckflächen ist die Querverformung die ganze Probenhöhe entlang gleich.

Wollen wir den Unterschied des Verlaufes der Akkumulation der potentiellen Spannungsenergie in den beiden beschriebenen Fällen der Gesteinszerstörung durch Zer-

klüften wenigstens beurteilen, müssen wir die Abhängigkeit der Akkumulation potentieller Energie von der Verformung in den extremen Fällen berücksichtigen.

1. Das größte Quantum von potentieller Spannungsenergie kann das Gestein nur an der Elastizitätsgrenze bei einer allseitigen gleichmäßigen Druckbeanspruchung speichern. In diesem Falle sind auch die Verformungen in allen Richtungen gleichmäßig.
2. Bei ungleichmäßiger allseitiger Druckbeanspruchung ist die Verformung um so ungleichmäßiger und weniger günstig für die Akkumulation der potentiellen Energie, je ungleichmäßiger die Beanspruchung ist. Es ist verständlich, daß bei einer derartigen Beanspruchung die Elastizitätsgrenze und die Festigkeitsgrenze herabgesetzt werden, die im genannten Falle hauptsächlich durch die Beanspruchungsart variieren.

Um die Prinzipien des Verlaufes der Akkumulation der potentiellen Spannungsenergie beurteilen und bestimmen zu können, muß man zuerst in die Problematik der charakteristischen Verformungsvorgänge eindringen.

Um die Erläuterung zu vereinfachen, betrachten wir einen kleinen differentialen Gesteinskörper, den wir symbolisch so darstellen können, wie das auf Bild 15a geschehen ist. Setzen wir voraus, daß das Gestein aus Ionenkristallen besteht (gilt

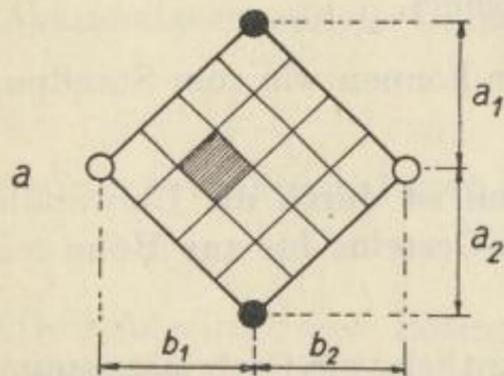


Bild 15 a

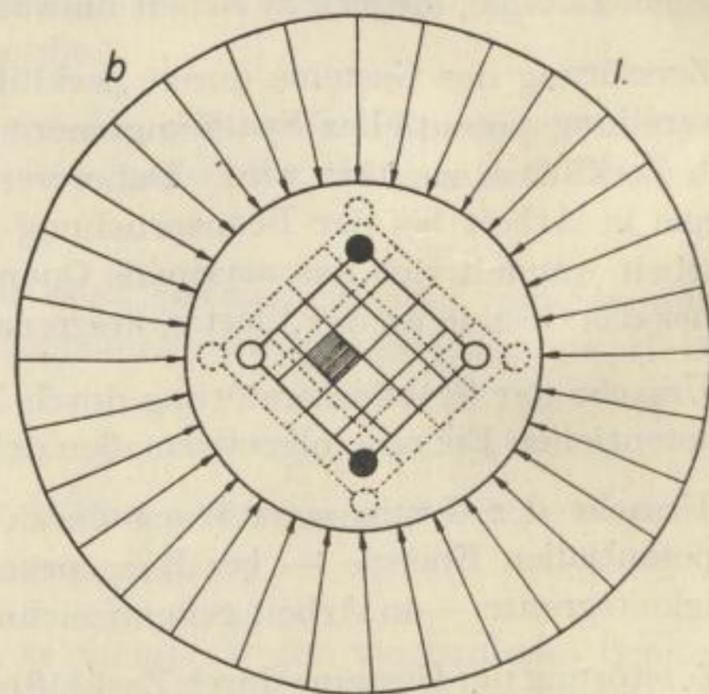


Bild 15 b

auch analog für Vallengkristalle). Die symbolische Charakteristik des Aufbaues des differentialen Gesteinskörperchens ist schematisch am Umfang des Körperteilchens dargestellt, und zwar durch zwei positiv und zwei negativ geladene Ionen. Ist das Körperteilchen nicht beansprucht, dann stehen die Parameter der Ionen im Verhältnis

$$(a_1 + a_2) : (b_1 + b_2) = 1:1 .$$

Eine allseitige gleichmäßige Druckbeanspruchung des Körperteilchens, wie dies auf Bild 15 b gezeigt wird, führt zu einer allseitigen gleichmäßigen Verformung, durch die

die Entfernung zwischen den Ionen vermindert wird. Die Annäherung der Ionen hat keine Änderung des angeführten Parameterverhältnisses zur Folge.

Durch die allseitige gleichmäßige Druckbeanspruchung soll eine ideale gleichmäßige innere Druckspannung hervorgerufen werden. Richtiger wäre es, hier von einer optimalen allseitigen Druckbeanspruchung zu reden, die solche Verformungsvorgänge hervorruft, bei denen die Parameterverhältnisse der Ionen unverändert bleiben und die innere Spannung eine ideale Druckspannung darstellt, deren Größe sich nach dem Aufbau des Kristalls richtet. Wir benutzen aber weiterhin den Terminus „allseitige gleichmäßige Beanspruchung“, denn dadurch wird das Prinzip der Erscheinung nicht verzerrt, seine Erläuterung aber sehr vereinfacht.

Für eine derartige Druckbeanspruchung, bei der die Verformung durch das ungeänderte Verhältnis der Ionen-Parameter gekennzeichnet ist, ist charakteristisch, daß der Stoff um so mehr potentielle Energie akkumulieren kann, je größer die durch die Druckbeanspruchung hervorgerufenen Verformungen sind. Bei Beanspruchung auf der Elastizitätsgrenze erreicht das Quantum an akkumulierter potentieller Energie das Maximum. Es muß hervorgehoben werden, daß bei allseitiger gleichmäßiger Druckbeanspruchung das Gestein so große Quanten an potentieller Spannungsenergie akkumulieren kann, wie bei keiner anderen Beanspruchungsart.

Handelt es sich dagegen um eine zwar allseitige, aber ungleichmäßige Druckbeanspruchung, so sind auch die Verformungen ungleichmäßig, denn in diesen Fällen tritt eine Änderung des Verhältnisses der Ionen-Parameter auf. Das ist durch eine ungleichmäßige Verschiebung der Massenteilchen bedingt, so daß sich die inneren Spannungen als Schubspannungen geltend machen. Je größer die Veränderung des Verhältnisses der Ionen-Parameter ist, d. h., je ungleichmäßiger die Verformung ist, um so wirksamer sind die Schubspannungen und um so leichter wird das Gestein durch Zerklüften zerstört; denn die Elastizitätsgrenze und die Festigkeitsgrenze des Gesteins vermindern sich entsprechend.

Es gilt also allgemein, daß beim Zusammendrücken des Gesteins ein um so kleineres Quantum an potentieller Spannungsenergie akkumuliert wird, je größer die Veränderung des Verhältnisses der Ionen-Parameter ist, also je ungleichmäßiger die Verformungen sind.

Auch in dem Falle, wo die allseitige ungleichmäßige Beanspruchung zu einer zwar allseitigen, aber ungleichmäßigen Volumenminderung führt, wie dies auf Bild 16 gezeigt wird, ist das Quantum an potentieller Spannungsenergie, das das Gestein bei der gegebenen Beanspruchungsart auf der Elastizitätsgrenze akkumulieren kann, bedeutend kleiner als jenes Quantum, das das Gestein bei allseitiger gleichmäßiger Druckbeanspruchung auf der Elastizitätsgrenze — laut Symbol I auf Bild 15a und 15b — speichern kann.

Allseitige ungleichmäßige Verformungen nach dem Symbol II (Bild 16) können nur durch bestimmte große allseitige und ungleichmäßige Druckbeanspruchungen hervorgerufen werden.

Die Wirkung der Ungleichmäßigkeit läßt sich erhöhen, wenn man das Symbol III in Bild 17 zugrunde legt. Das Quantum von potentieller Energie, das das Gestein

auf der Elastizitätsgrenze bei dieser Verformungscharakteristik, wo die Änderung des Verhältnisses der Ionen-Parameter noch größer ist, akkumulieren kann, ist aber bedeutend kleiner als im Falle nach Symbol II in Bild 17.

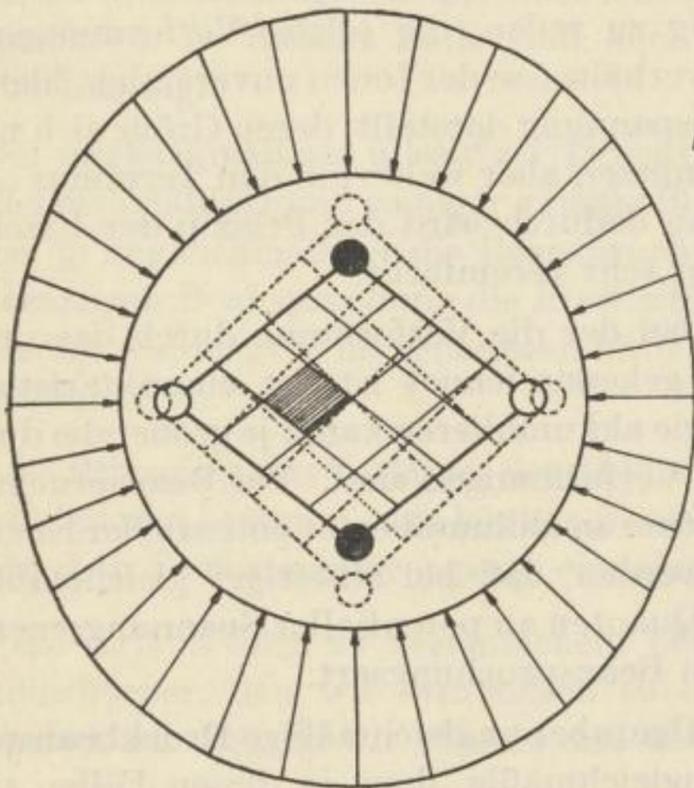


Bild 16

II

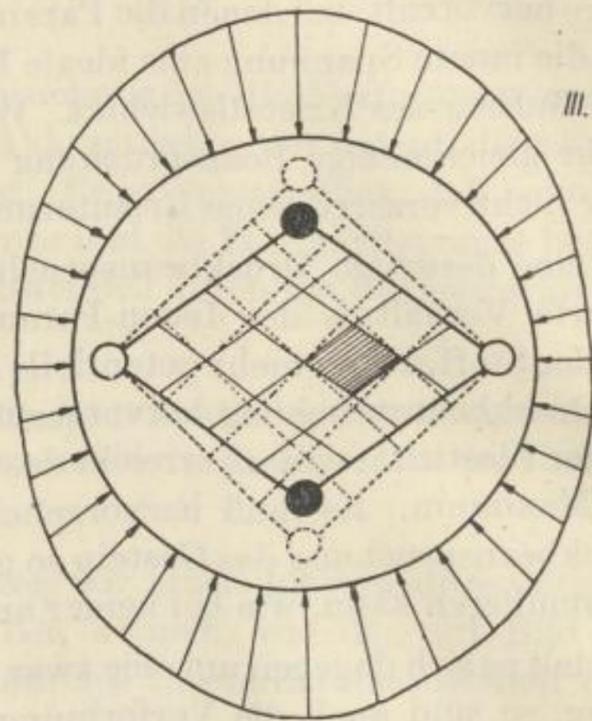
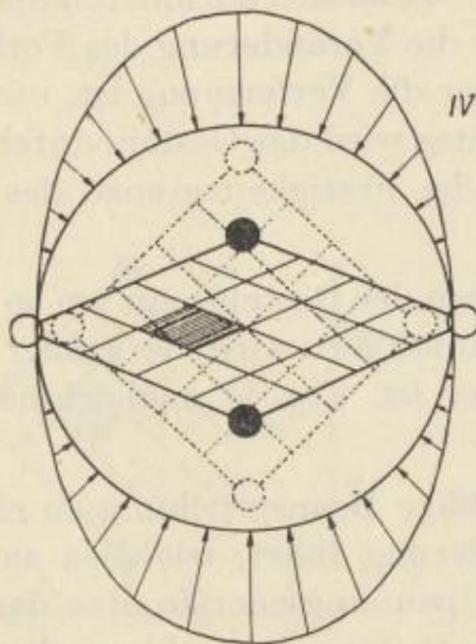


Bild 17

III



IV

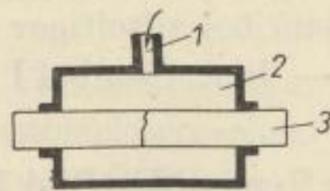


Bild 18

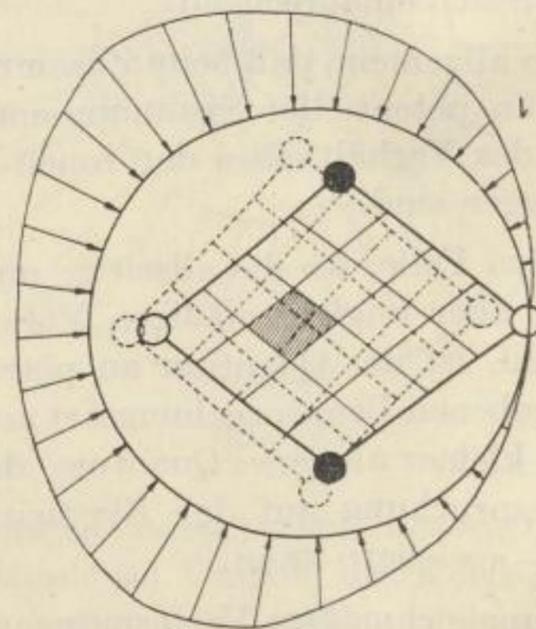


Bild 19

Noch kleiner ist die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren, wenn die allseitige ungleichmäßige Beanspruchung einen extremen Charakter hat, der dadurch gekennzeichnet ist, daß an manchen Stellen die Beanspruchung den

Wert Null annimmt. Ein Beispiel einer extremen symmetrischen Ungleichmäßigkeit der Beanspruchung und Verformung stellt das Symbol IV auf Bild 18 dar. Dieser Fall der extremen ungleichmäßigen Beanspruchung ist gut bekannt und wurde an Gesteinsproben zylindrischer Form demonstriert. Dabei wurden die Proben nur durch einen Manteldruck beansprucht; die Zylinderenden blieben unbelastet. Der untere Teil des Bildes 18 zeigt das Schema des Prüfapparates und der Probeanordnung. (Zuführung des Drucköls 1, mit dem in der Kammer 2 ein großer Manteldruck auf die Mantelfläche des zylindrischen Probekörpers 3 ausgeübt wurde.) Bei einer bestimmten Größe des Druckes wurde die Probe durch Reißbildung, die am Probekörper 3 deutlich wird, zerstört.

Meistens ist aber die extreme ungleichmäßige Beanspruchung unsymmetrisch, und deren Verformungscharakteristik entspricht dem Symbol V, das in Bild 19 gezeigt wird. Diese Charakteristik der Beanspruchung der Ionen-Anordnung (im Sinne ungleichmäßiger Verschiebungen) ist dadurch gekennzeichnet, daß die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren, sehr klein ist. Elastizitäts- und Festigkeitsgrenze des Gesteins sind bei dieser Verformungscharakteristik stark herabgesetzt.

Das Quantum an potentieller Spannungsenergie ist vom Verformungscharakter abhängig. An verschiedenen Stellen des beanspruchten Körpers ist der Verformungsgrad verschieden. Deshalb ist auch das Quantum an potentieller Spannungsenergie im beanspruchten Körper nicht überall gleich groß, sondern es ist an verschiedenen Stellen des Körpers verschieden groß.

Um eine Vorstellung von der Abhängigkeit der Menge an potentieller Spannungsenergie von der Verformungscharakteristik zu vermitteln, ist in Bild 20 schematisch angegeben, welches größte Quantum an potentieller Spannungsenergie vom Gestein auf der Elastizitätsgrenze bei verschiedenen Verformungscharakteristiken (nach den Symbolen I bis V) akkumuliert werden kann.

Die den einzelnen Verformungscharakteristiken entsprechenden Mengen an potentieller Spannungsenergie sind in Bild 20 schraffiert angegeben. Die punktierten Flächen geben uns annähernd eine Vorstellung über die bei den einzelnen Verformungscharakteristiken auftretende Änderung der Wirksamkeit der Schubspannungen, welche die Zerstörung des Gesteins — durch Herabsetzung der Elastizitäts- und Festigkeitsgrenze — bewirken. Für die Zerstörung ist nicht die Größe der Schubspannung des Gesteins, sondern deren „Wirksamkeit“ maßgebend. Die Wirksamkeit ist um so größer, je größer die Ungleichmäßigkeit der Verformungscharakteristik ist. Dies folgt auch daraus, daß sich durch die Steigerung der Ungleichmäßigkeit der Verformung die Festigkeits- und die Elastizitätsgrenze des Gesteins vermindert.

Erörtern wir jetzt den Verlauf des Verformungsvorganges und der Akkumulation der potentiellen Energie bei einem Gesteinskörper, auf dessen Druckflächen starke Reibung ausgeübt wird. Um die Erklärung zu vereinfachen, betrachten wir einen zylindrischen Körper, der in der Richtung seiner Achse zwischen zwei Preßplatten gleichmäßig beansprucht wird.

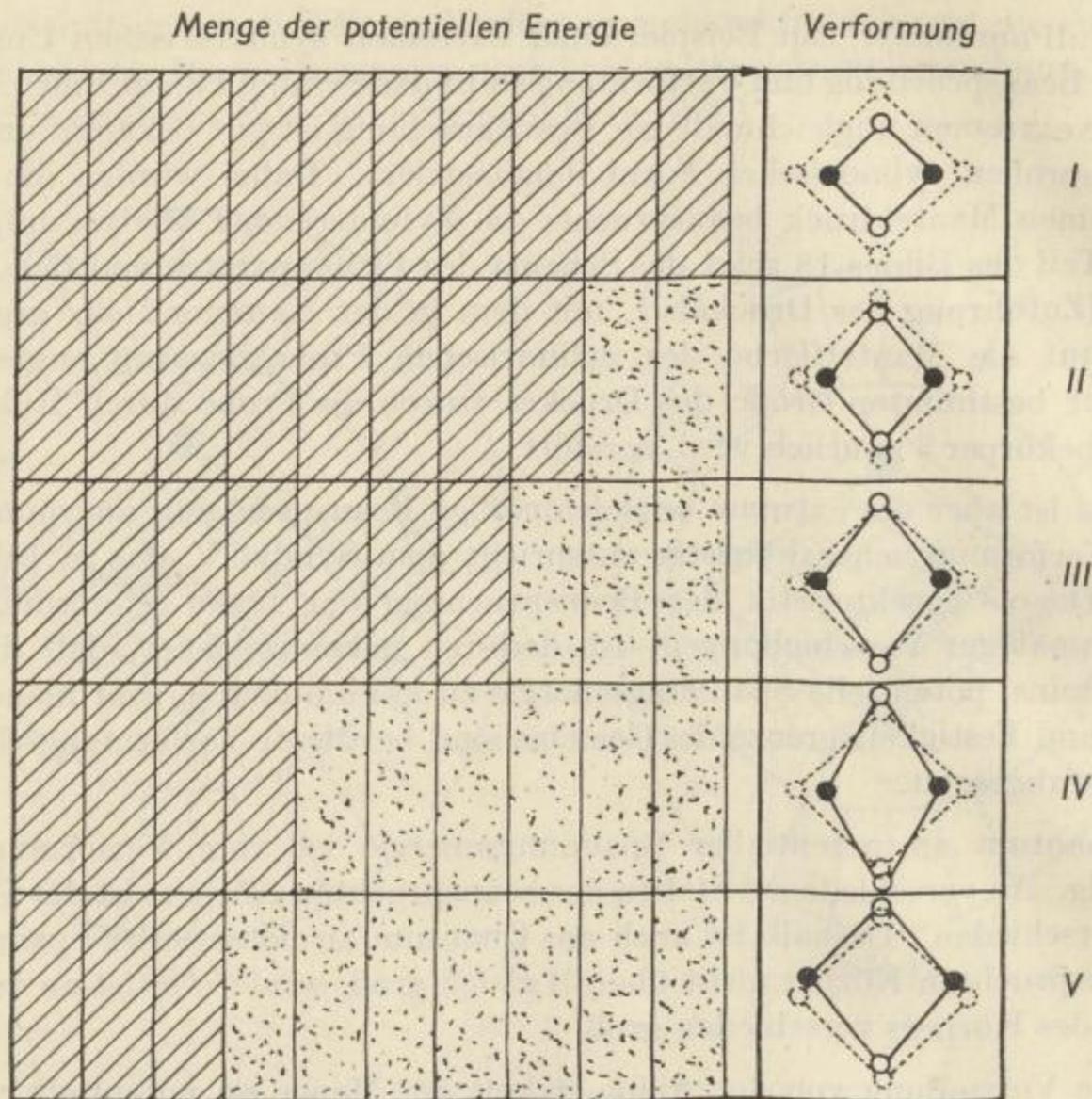


Bild 20

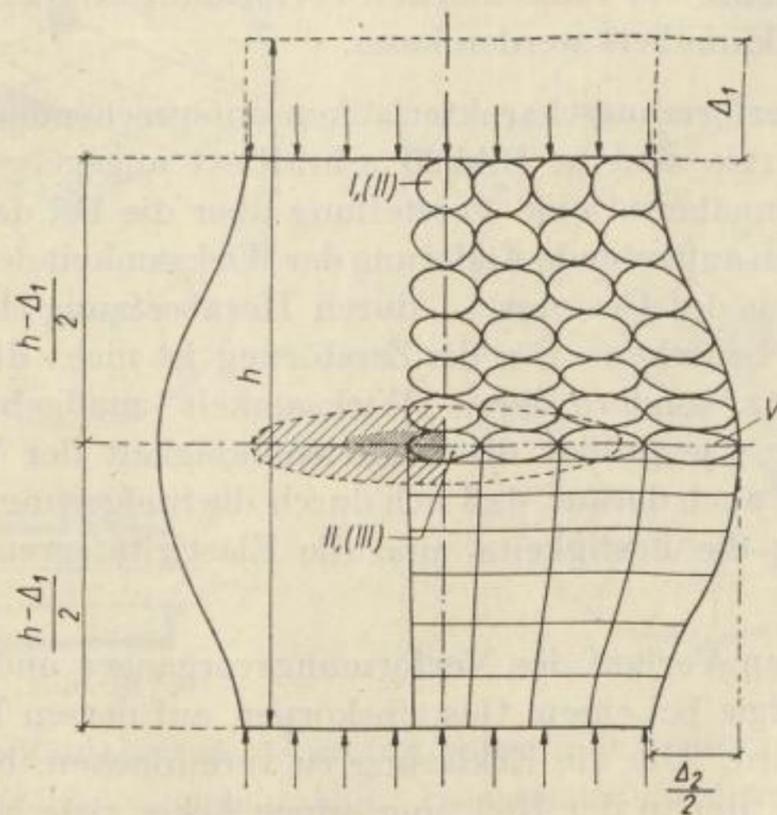


Bild 21

Infolge der Druckbeanspruchung verformt sich der Körper, dessen axiale Verformung wir mit Δ_1 , seine Querverformung mit Δ_2 bezeichnen.

Die größte Querverformung tritt in halber Höhe des beanspruchten Körpers auf, also an der Stelle $\frac{h - \Delta_1}{2}$ (Bild 21).

Verfolgen wir den Verformungsprozeß an verschiedenen Stellen eines beanspruchten sehr kleinen Gesteinskörpers. Dabei müssen wir im ganzen Bereich den Einfluß der umgebenden differentiellen Teilchen berücksichtigen, der an verschiedenen Stellen des beanspruchten Körpers verschieden groß ist. Die kleinen Körper oder die Gesteinsteilchen sind jedoch einander eng verbunden. Ihre gegenseitige Beeinflussung ist dann ein Faktor, der einen bestimmten Verformungscharakter des untersuchten Teilchens bedingt. Auf Bild 21 sind die „gedachten“ kleinen Gesteinsteilchen schematisch im beanspruchten Zustand als kreisförmig angenommen.

In der Mitte der Druckfläche, auf der sich starke Reibung mit der Preßplatte geltend macht, wird das Gesteinsteilchen fast allseitig gleichmäßig beansprucht, so daß dessen Verformungscharakteristik theoretisch dem Symbol I (siehe Bild 15a und 15b) gleicht. Von oben wirkt auf das Körperteilchen die Druckplatte, von unten und an den Seiten ist es von anderen Körperteilchen umschlossen. Hierbei ist zu betonen, daß die Körperteilchen, welche an den Seiten in der Ebene der Druckfläche liegen, eine sehr stabile Stellung haben, die durch starke Reibung zwischen dem Gestein und der Preßplatte gegeben ist. In Wirklichkeit wird aber das Körperteilchen in der Mitte der Druckfläche allseitig ungleichmäßig beansprucht, und zwar entsprechend Symbol II (siehe Bild 16). Die untersuchten Teilchen sind auf Bild 20 mit römischen Nummern bezeichnet, welche den Nummern der Symbole der Verformungscharakteristiken (siehe Bild 15 bis 19) entsprechen.

In Richtung der senkrechten Achse bis zur Mitte der Körperhöhe vermindert sich der Einfluß der seitlich liegenden Körperteilchen; theoretisch nähert sich der Verformungscharakter des in der Achsenmitte liegenden Körperteilchens dem Symbol II, in Wirklichkeit entspricht jedoch der Verformungscharakter Symbol III (siehe Bild 17). In der Richtung zur Mantelfläche des Probekörpers vermindert sich der Einfluß der seitlich liegenden Körperteilchen, und es ändert sich daher auch der Verformungscharakter. Das an der Mantelfläche in halber Höhe des Probekörpers liegende Körperteilchen wird entsprechend Symbol V (siehe Bild 19) beansprucht und verformt.

In speziellen Fällen — z. B. wenn die Breite des Probekörpers größer ist als dessen Höhe und wenn dessen Stoff günstig ist (z. B. Kunstharz) — kann in der mittleren Zone des beanspruchten Körpers ein Gebiet teilweiser Plastizität entstehen, denn die seitlich liegenden Körperteilchen bewirken — auf Grund deren Einflusses — eine allseitige relativ starke Beanspruchung. Die Zone der teilweisen Plastizität ist in Bild 21 schraffiert und durch eine gestrichelte Ellipse begrenzt.

Der Verformungsverlauf eines Körpers, auf dessen Druckflächen keine oder eine stark verminderte Reibung ausgeübt wurde, ist schematisch in Bild 22 eingezeichnet.

Da eine Reibung in der Ebene der Druckflächen ausgeschlossen wurde und die Querverformung bei allen Querschnitten in beliebiger Höhe des Probekörpers gleich groß ist, liegen die Zonen gleicher Verformungscharakteristik untereinander. In der senkrechten Achse des Probekörpers haben die Gesteinsteilchen einen Verformungscharakter, der dem Symbol III (Bild 17) ähnlich ist. An der Mantelwand des Probekörpers entspricht der Verformungscharakter der Körperteilchen dem Symbol V (siehe Bild 19). Auch die Charakteristiken der Beanspruchungsart sind in beiden Fällen gleich.

Die unterschiedliche Querverformung beim geschmierten und ungeschmierten Druckversuch kann wie folgt erklärt werden:

Die Zonen der Querverformung sind beim Körper, auf dessen Druckflächen fast keine Reibung besteht, volumenmäßig größer als beim Körper, auf dessen Druck-

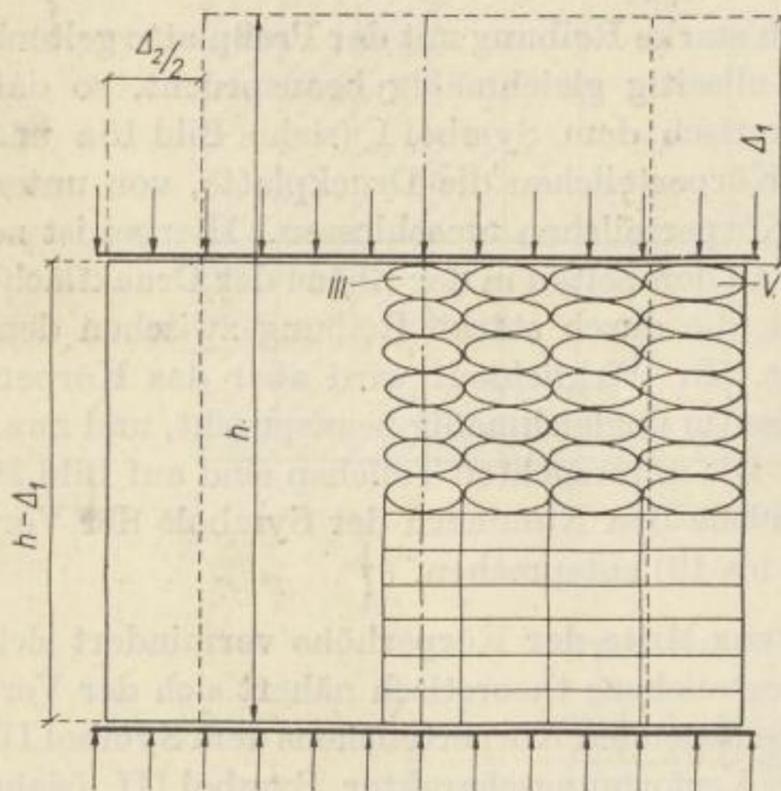


Bild 22

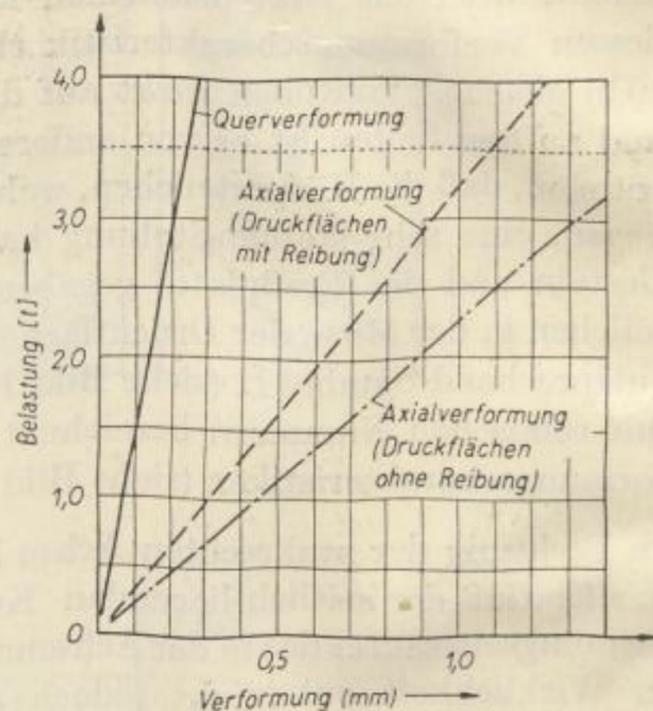


Bild 23

flächen starke Reibung vorliegt und bei dem die Querverformung in der Ebene der Druckflächen einen Nullwert hat.

Bild 23 enthält ein Diagramm, das im Prinzip die Charakteristik der Unterschiedlichkeit der axialen Verformung in den beiden angeführten Fällen zeigt. Die Querverformung wurde in beiden Fällen in halber Körperhöhe zwischen den Druckflächen gemessen. Da die Verformungen der Gesteine sehr klein sind, wurden zur Bestimmung des Prinzips zylindrische Proben aus Plexiglas benutzt (Durchmesser = 30 mm; Höhe = 60 mm). Die axiale Verformung des geprüften Körpers mit Schmierung auf den Druckflächen war etwa um 14% größer, als die eines Körpers, auf dessen Druckflächen starke Reibung vorlag.

Auf Grund der Bestimmung der Verformungscharakteristiken an den einzelnen Stellen des beanspruchten Körpers und unter Anwendung der Erkenntnisse über die Abhängigkeit der Akkumulation der potentiellen Spannungsenergie von der Verformungs-

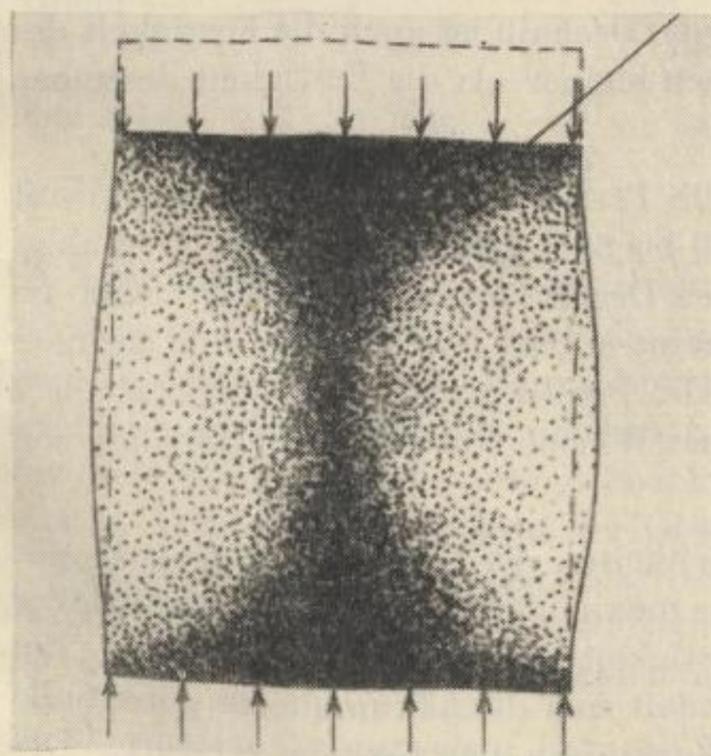


Bild 24

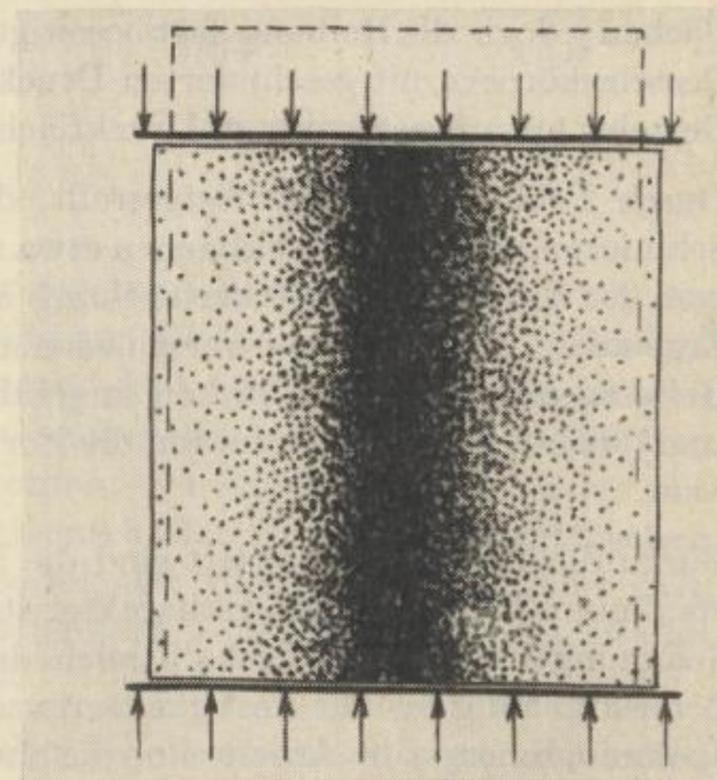


Bild 25

charakteristik (Tabelle 1) können wir den Verlauf der Akkumulation von potentieller Energie schematisch darstellen, und zwar sowohl für den Fall, daß die Druckflächen des Probekörpers einer Reibung ausgesetzt sind (Bild 24 und 25), als auch für den Fall mit Schmierung der Druckflächen.

Das Quantum der akkumulierten potentiellen Spannungsenergie wurde in beiden Fällen so dargestellt, daß es der Punktdichte direkt proportional ist. Der Unterschied in der lokalen Anhäufung der akkumulierten potentiellen Energie in Abhängigkeit von der lokalen Verformungscharakteristik begründet sowohl die Zerstörungsform als auch die Unterschiede der beiden Zerstörungsformen.

Beim ungeschmierten Druckversuch akkumuliert sich die potentielle Energie annähernd in Form zweier Kegel, die eine gemeinsame Achse haben und sich mit ihren Spitzen berühren (Bild 24). Das größte Quantum an potentieller Energie ist in der Mitte der Druckflächen des Gesteinskörpers akkumuliert; denn hier sind die Bedingungen für die Akkumulation am günstigsten.

Beim geschmierten Druckversuch (Bild 25) wird das größte Quantum an potentieller Energie in einer zylindrischen Zone um die senkrechte Achse des beanspruchten Körpers akkumuliert, während in Richtung zur Mantelwand des Körpers sich das Quantum von akkumulierter potentieller Energie vermindert. Die Zonen mit einem gleichen Quantum von akkumulierter potentieller Energie laufen deshalb parallel zur Achse des zylinderförmigen Probekörpers. Das Gestein wird durch senkrechte Risse zerstört; diese verbinden Stellen mit einem gleichen Quantum an akkumulierter potentieller Energie.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß ein Gesteinskörper, auf dessen Druckflächen starke Reibung besteht, insgesamt ein größeres Quantum an potentieller Energie akkumuliert als ein Körper aus dem gleichen Gestein, auf dessen Druckflächen jedoch die Reibung fast beseitigt wurde. Deshalb ist auch die Festigkeit des Gesteinskörpers mit geschmierten Druckflächen kleiner als die Festigkeit desselben Gesteins mit ungeschmierten Druckflächen.

Durch Prüfungen wurde festgestellt, daß die Festigkeit des Gesteinskörpers mit Schmierung auf den Druckflächen etwa um 30 bis 50% kleiner ist als die Tragfähigkeit des Körpers mit starker Reibung auf den Druckflächen. In Tabelle I sind die Ergebnisse von Prüfungen verschiedener Gesteine mit starker Reibung und geringer Reibung auf den Druckflächen angeführt. Die Probekörper der in der Tabelle I angeführten Festigkeiten hatten die Form eines Würfels mit einer Kantenlänge von 6 cm.

Durch die Beanspruchungsart sind die Möglichkeiten des Gesteins hinsichtlich des Maximums der Verformungscharakteristik des maximalen Quantums an potentieller Spannungsenergie und deshalb auch der Festigkeit des Gesteins beschränkt. Bei Beanspruchung bis zur Festigkeitsgrenze wandelt sich die akkumulierte potentielle Spannungsenergie in Arbeit um, die durch Zerklüften das Gestein zerstört. Die Umwandlung verläuft folgerichtig, indem in jedem sich abtrennenden Teilchen des durch Zerklüften zerstörten Gesteinsmassivs die Umwandlung der potentiellen Energie in Arbeit zur Annullierung der vorangehenden Verformung führt.

Aus den bisherigen Ausführungen resultieren einige wichtige *Schlußfolgerungen*; Die Eigenschaften des Gesteins sind nicht an allen Stellen des beanspruchten Körpers gleich, sondern sie ändern sich in Abhängigkeit von der Verformungscharakteristik,

Tabelle 1. Festigkeit verschiedener Gesteine, die an Würfelproben mit 6 cm Kantenlänge ermittelt wurde

Gesteinsart	Festigkeit ohne Schmierung auf den Druckflächen kg/cm ²	Festigkeit mit Schmierung auf den Druckflächen kg/cm ²	Festigkeitsverminderung bei Verminderung der Reibung auf den Druckflächen kg/cm ²	Festigkeitsverminderung bei Verminderung der Reibung auf den Druckflächen in bezug zur Festigkeit bei voller Reibung auf den Druckflächen %
Diabas	1930	117	810	42
Diorit	1780	985	795	44,6
Basalt	2450	1300	1150	47
Wacke	1860	1185	675	36,3
Sandstein — fest	1670	950	720	43
Sandstein — weniger fest	790	515	275	34,8
Kalkstein — sehr fest	2050	1210	840	41
Kalkstein — weniger fest	730	450	280	38,4
Granit — sehr fest	2375	1405	970	40,8
Granit — mittelfest	1340	805	535	40

die durch eine bestimmte Beanspruchungsart gegeben ist. Es ändern sich nicht nur die mechanischen, sondern auch die physikalischen Eigenschaften des Gesteins. — Diese Tatsache muß bei der Beurteilung der Genauigkeit verschiedener Meßverfahren, durch die z. B. der Elastizitätsmodul des Gesteins um unterirdische Hohlräume bestimmt werden soll, unbedingt beachtet werden. Die Ergebnisse können im günstigsten Falle nur Mittelwerte der Gesteinseigenschaften in dem Abschnitt geben, in dem gemessen wurde. Der Elastizitätsmodul, der von der Beanspruchungsart und von der Verformungscharakteristik abhängig ist, ist an verschiedenen Stellen des beanspruchten Gesteins verschieden groß.

Die erwähnten theoretischen Erkenntnisse über die Gesteinszerstörung durch Zerklüften können insbesondere im Bergbau ausgenutzt werden.

Eines der kritischsten Probleme des Bergbaus ist das Problem der Tragfähigkeit der Pfeiler, das eng mit dem Problem der Pfeilerzerstörung verbunden ist.

Aus der Erklärung über die Gesteinszerstörung durch Zerklüften ist uns schon bekannt, daß die Tragfähigkeit des Gesteinskörpers mit Schmierung auf den Druckflächen um ca. 30 bis 50% kleiner ist als die Tragfähigkeit des Gesteinskörpers



Bild 26

mit voller Reibung auf den Druckflächen. Diese Erkenntnis läßt sich sinngemäß auch auf Pfeiler (Bergfesten) übertragen.

Eine Reibungsverminderung auf den Druckflächen des Pfeilers kann schon dann auftreten, wenn sich in der Ebene des Hangenden und des Liegenden z. B. eine dünne Tonschicht befindet. In manchen Fällen können auch Schichtenflächen die Funktion der Reibungsverminderung übernehmen. Auch ist es nicht Bedingung, daß die Flächen mit verminderter Reibung nur in der Ebene des Hangenden und des Liegenden sich befinden müssen. Es können auch mehrere dieser Flächen vorhanden und diese die Pfeilerhöhe entlang beliebig verteilt sein. In vielen Fällen übt die in die Tonschicht eindringende Feuchtigkeit einen großen Einfluß auf die Reibungsverminderung aus.

Ein Rest eines Gesteinskörpers, auf dessen Druckflächen starke Reibung war, ist auf Bild 26 zu sehen. Er hat die charakteristische Form eines Doppelkegels.

Die Gesetzmäßigkeiten, die für die Gesteinszerstörung nach Bild 26 gelten, haben auch für die Zerstörung der Pfeiler volle Gültigkeit, auf dessen Druckflächen starke Reibung besteht, wie dies die Photographie eines Hartsalz-Pfeilers in einer Südharz-Grube (Bild 27 nach Höfer, Freib. Forsch.-H. A 100) beweist.

Bild 28 zeigt die Zerstörung einer Gesteinsprobe, deren Druckflächen geschmiert wurden. Damit die Zerstörung den natürlichen Bedingungen entspricht, wurde die Probe — auch nach Erscheinen der ersten Risse — weiter beansprucht. Dadurch kam es zu einer sekundären Zerstörung, die den klassischen Verlauf der Risse etwas verwischte.

Auch die Gesetzmäßigkeit nach Bild 28 wird durch die Grubenpraxis bestätigt, wie das in Bild 29 angeführte Beispiel der Zerstörung eines Hartsalzpfeilers beweist.

Die Wirkung der Reibungsverminderung auf den Druckflächen macht sich auch dann geltend, wenn nur auf einem bestimmten Teil einer Druckfläche die Reibung vermindert wird. Bild 30 zeigt beispielsweise eine Gesteinsprobe, bei der lediglich unter einer Würfecke die Reibung beseitigt wurde, indem Paraffin aufgetragen wurde. Die Reibung auf einer Fläche in Form eines Dreiecks ist vermindert und befindet sich auf der unteren Druckfläche.

Dieser Gesteinsprobewürfel wurde der Prüfung unterworfen, deren Ergebnis auf Bild 31 zu sehen ist. Bei lokaler Reibungsverminderung, in unserem Falle unter

einer Würfecke der unteren Druckfläche, hat sich der Eckteil vom Gesteinskörper auf die charakteristische Art und Weise abgetrennt. Die Grundfläche des abgetrennten Eckteiles entspricht der Fläche, auf der die Reibung vermindert wurde.

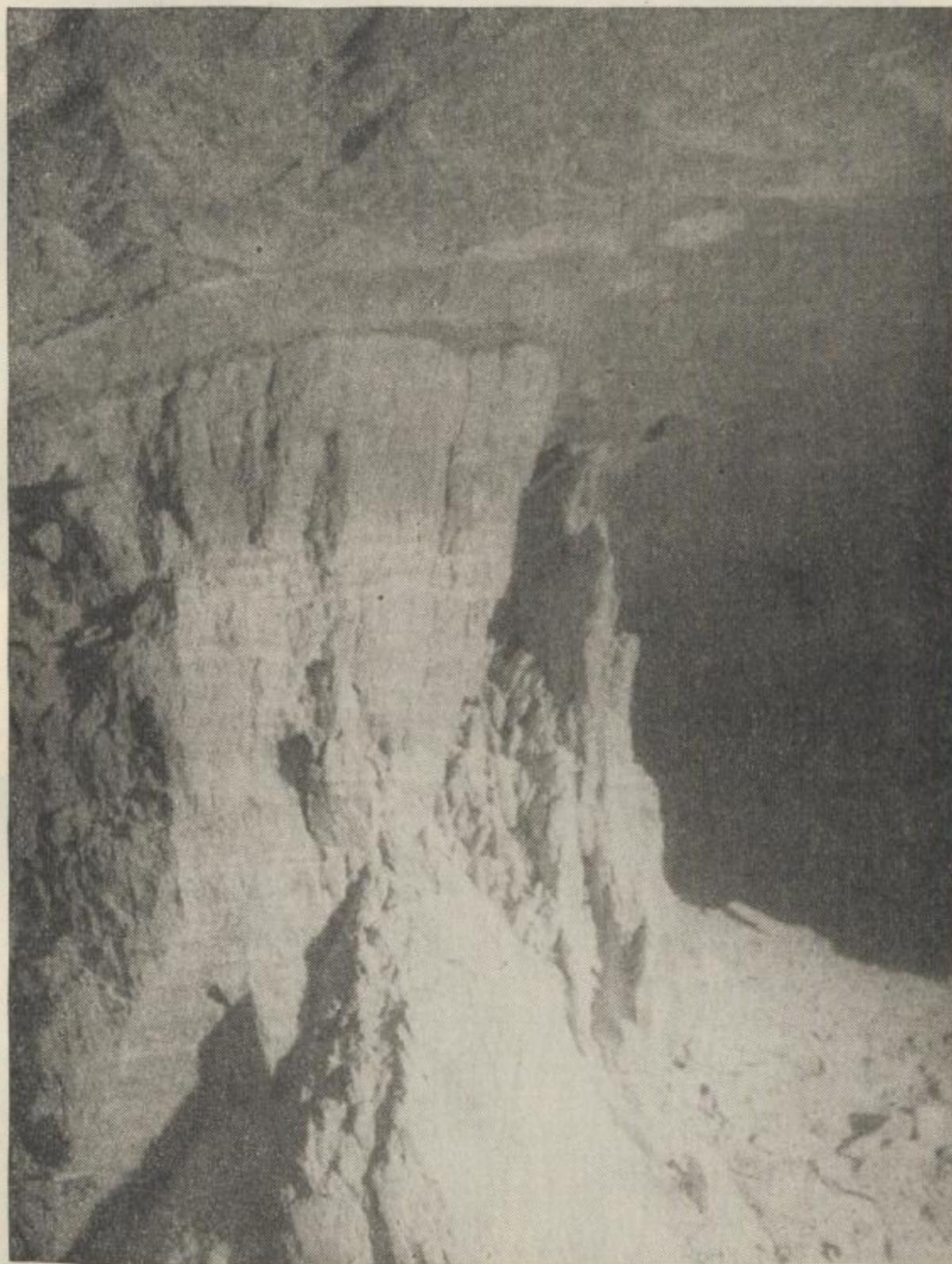


Bild 27

Diese und ähnliche Fälle der Pfeilerzerstörung sind in der Bergbaupraxis sehr gut bekannt. Ein Beispiel dafür gibt die Photographie auf Bild 32 wieder. Die Pfeilerecke wurde hier auf gleiche Art und Weise zerstört wie die Würfecke in Bild 31, d. h. durch Reibungsverminderung auf der Druckfläche unter der Pfeilerecke.

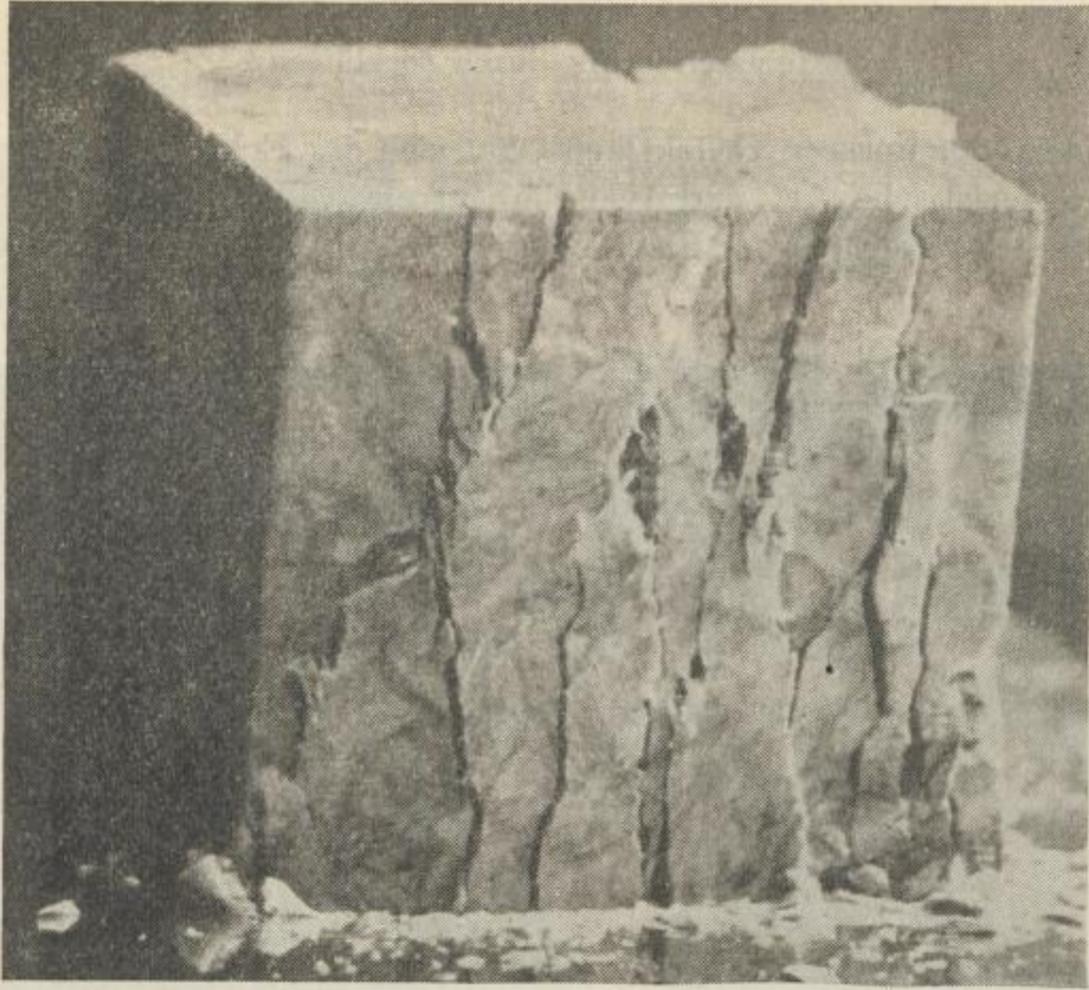


Bild 28



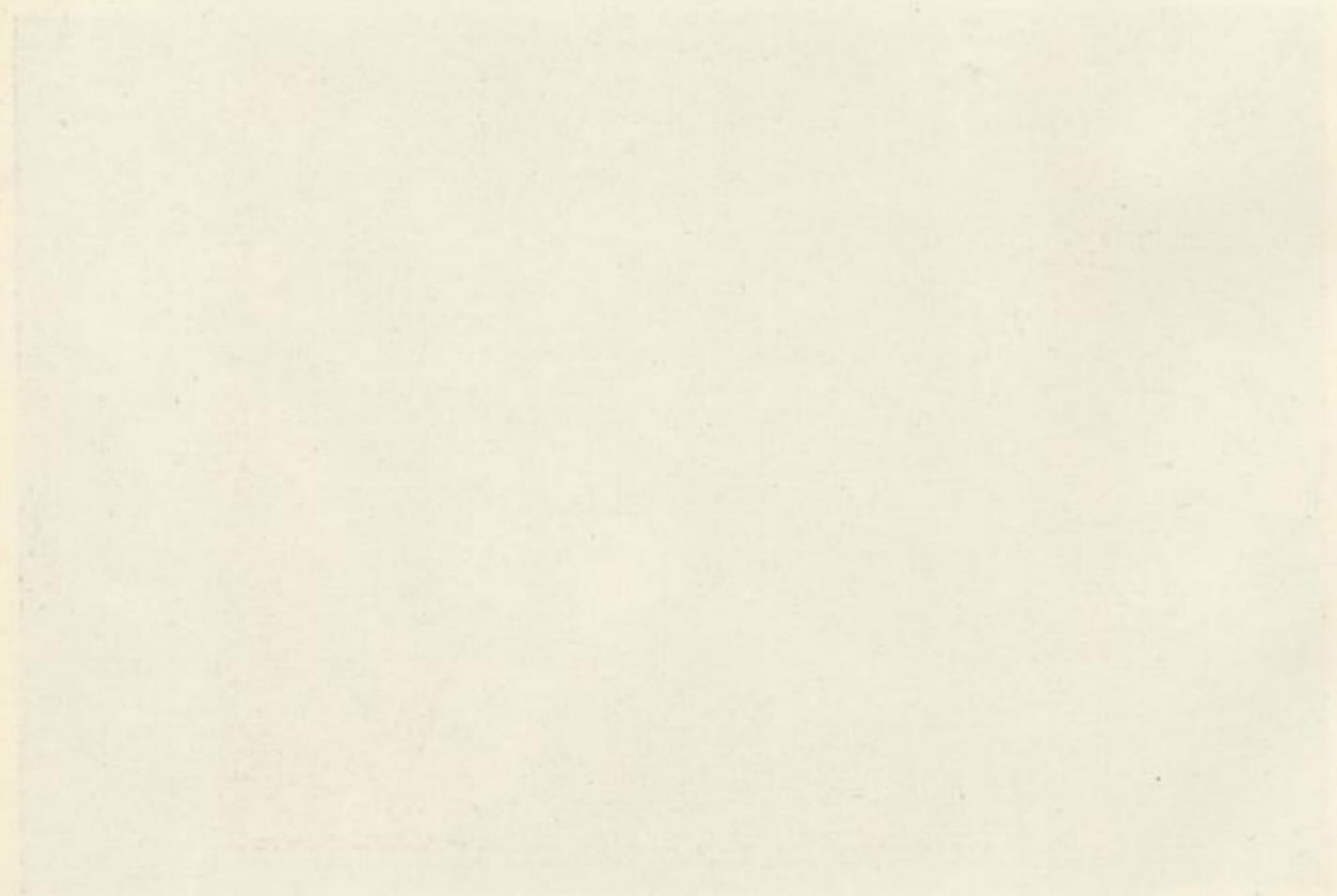
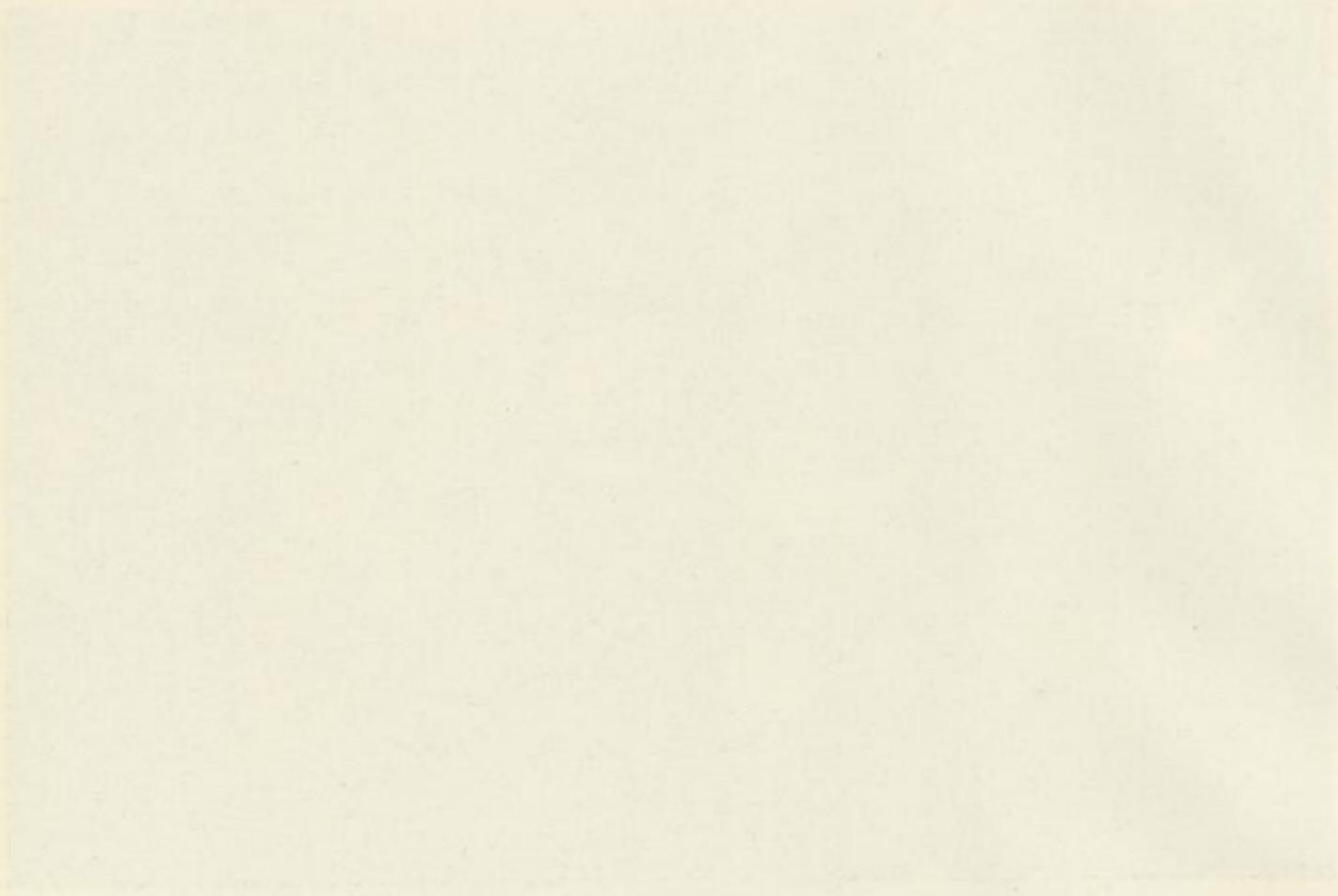
Bild 29



Bild 31



Bild 32



Eine sehr häufig auftretende Erscheinung im Bergbau ist die Entstehung von kammförmigen Schalen, die mit der Grundfläche im Liegenden parallel mit den Stößen der Gänge und Kammern verlaufen. Diese kammförmigen Schalen entstehen auch infolge teilweiser Reibungsverminderung auf der unteren Druckfläche, und zwar auf einem Streifen, der parallel mit dem Abbauraum verläuft. In Laborverhältnissen wurde diese Zerstörungsform genau studiert und so nachgeahmt, wie es auf Bild 33 zu

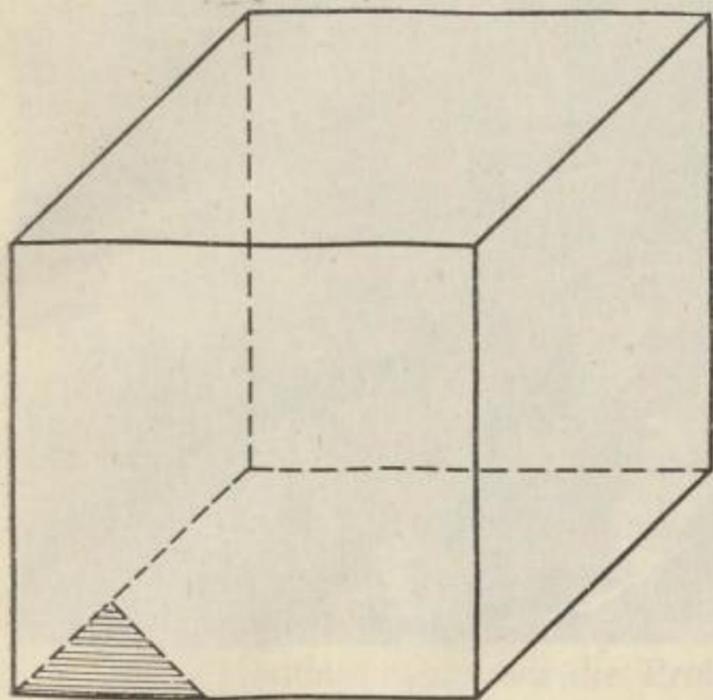


Bild 30

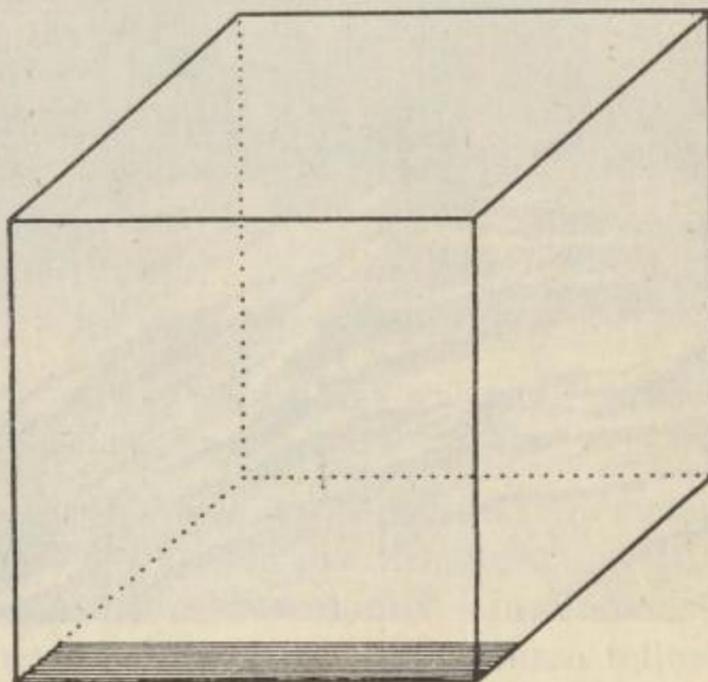


Bild 33



Bild 34 a



Bild 34 b

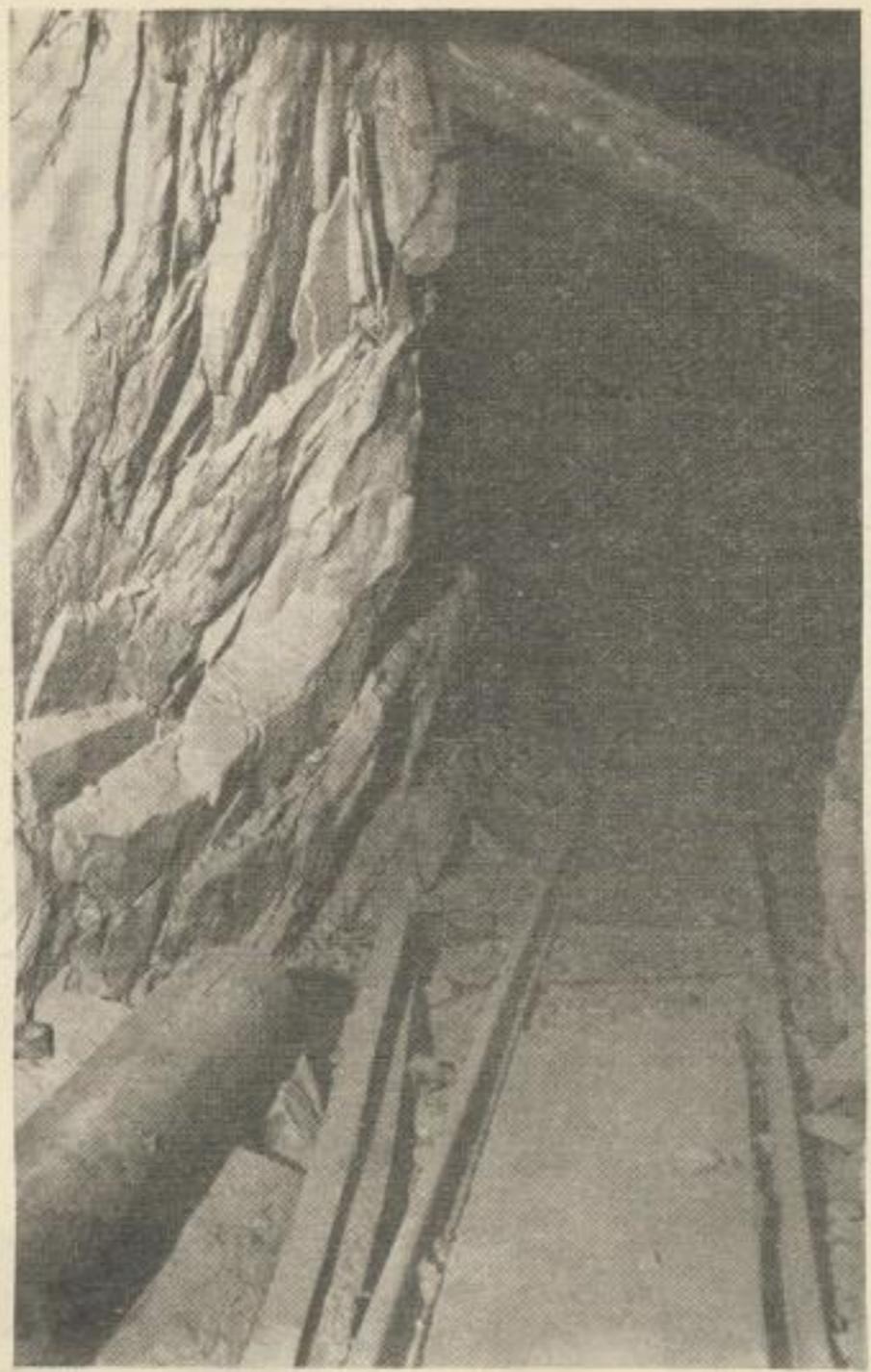


Bild 34 c

sehen ist; auf einem Streifen (schraffiert) der Seitenwand des Probekörpers wurde die Reibung vermindert.

Das Ergebnis dieser Prüfung ist auf Bild 34a zu sehen.

Daraus geht die Bildung der kammförmigen Schalen infolge lokaler Reibungsverminderung so klar hervor, daß für die auf Bild 34b und c angeführten Beispiele von kammförmigen Schalen in natürlichen Verhältnissen jede weitere Erklärung überflüssig ist.

In vielen Fällen können wir die kammförmige Schalenbildung der Strecken- und Kammerstöße sehr wirksam bekämpfen, und zwar mit Hilfe eines richtig durchgeführten Ankerbaues.

Gesteinszerstörung durch Plastizität vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie

In diesem Kapitel werden wir uns mit den Problemen der wahren Plastizität, d. h. mit der teilweisen und der absoluten Plastizität befassen.

Die Erscheinungen der Gesteinszerstörung sind in ihrem Wesen Naturgesetzen untergeordnet, deren Hauptprinzip durch das Gesetz von der Erhaltung der Masse und der Energie gekennzeichnet ist. Dessen müssen wir uns im vollen Umfang bewußt sein, besonders wenn wir die Probleme der Gesteinszerstörung durch teilweise und absolute Plastizität studieren wollen.

Für die Erforschung der wahren Plastizität sind einige Grundkenntnisse der Physik auf dem Gebiet des Stoffaufbaues nötig. Wir wollen nur eine wenig komplizierte und möglichst kurzgefaßte Erklärung geben.

Die Moleküle oder Ionen befinden sich im Kristallgitter nicht in Ruhe, sondern sie führen Schwingungsbewegungen um die Gleichgewichtslagen aus. Die Kräftewirkung der Moleküle oder Ionen, die bei Molekülen durch die Valenzbindung und bei Ionen durch die elektrostatischen Anziehungskräfte gegeben ist, verleiht diesen potentielle Energie. Im unbeanspruchten Zustand handelt es sich um die potentielle Grundenergie, die auch als innere potentielle Energie bezeichnet wird. Ist der Stoff (das Gestein) im natürlichen festen Aggregatzustand, so ist seine potentielle Energie viel größer als seine kinetische Energie, die durch die Schwingungsbewegungen der Ionen oder Moleküle um die Gleichgewichtsanlagen gegeben ist.

Bildlich können wir die Funktion beider Energieformen im Kristallgitter so ausdrücken:

Die potentielle Energie arbeitet für die Stabilität des Kristallgitters, die kinetische Energie der Massepunkte dagegen für die Labilität des Kristallgitters. Die Gültigkeit dieser Feststellung wird eindeutig bestätigt, wenn wir das Gestein aus dem festen Aggregatzustand durch hohe Temperatur in den flüssigen Aggregatzustand überführen (z. B. Basaltschmelzung). Durch Erwärmung vergrößern sich die Abstände zwischen den Massepunkten so erheblich, daß sich die potentielle Energie vermindert. Auf Grund dessen erhöht sich die kinetische Energie stark; denn den Schwingungs-

bewegungen der Ionen steht praktisch nichts mehr im Wege, ihre Amplituden zu vergrößern. Die sich aus diesem Zustand ergebende kinetische Energie ist so groß, daß sich bei gleichzeitiger bedeutender Wirkungsverminderung der potentiellen Energie die Ionen beliebig ausschwenken und ihre ursprüngliche Lage ganz verlassen können, denn im gegebenen Zustand sind diese frei — labil. Auf diese Weise geht der ursprünglich feste Stoff durch Erwärmung in den flüssigen Aggregatzustand über. Es ist selbstverständlich, daß dabei das Kristallgitter verschwindet.

Dieser Erscheinung ähnelt der Zustand wahrer Plastizität. Wir wissen, daß sich das maximale Quantum an potentieller Energie im Gestein bei Beanspruchung bis zur Elastizitätsgrenze akkumuliert, und zwar bei unveränderter Art der Beanspruchung. Dies gilt auch für die allseitige Beanspruchung sowohl durch gleichmäßigen als auch durch ungleichmäßigen Druck; das maximale Quantum an potentieller Energie wird bei Beanspruchung auf der Elastizitätsgrenze erreicht. Bei weiterwirkender allseitiger Beanspruchung erhöht sich das Quantum an potentieller Energie nicht weiter, sondern es tritt eine Abschwächung ihrer Wirksamkeit auf, und zwar proportional den Verschiebungen der Massepunkte, wobei die potentielle Energie verbraucht wird. Dabei verwandelt sich die potentielle Energie in andere Energieformen, z. B. in Wärme, elektrische Energie oder Strahlungsenergie. Infolge dieses Prozesses steigt jedoch die Intensität der Schwingungsbewegungen der Massepunkte und damit auch die Wirkung ihrer kinetischen Energie, so daß bei einer bestimmten Größe des allseitigen Druckes die Massepunkte nicht mehr an ihre ursprüngliche Lage gebunden sind. Der feste Aggregatzustand des Gesteins geht in den plastischen Aggregatzustand über, wobei das Kristallgitter allmählich verschwindet.

Das Schwinden des Kristallgitters und Beginn der Plastizität

Vom energetischen Standpunkt ist die Stabilität der Massepunkte im Kristallgitter durch die Wirksamkeit der potentiellen Energie gegeben. Bei allseitiger Beanspruchung über die Elastizitätsgrenze hinaus steigt die Intensität der kinetischen Energie, die sich aus der intensiveren Schwingungsbewegung der Massepunkte ergibt, und zwar auf Kosten der Wirksamkeit der potentiellen Energie. — Bei allseitiger Druckbeanspruchung über der Elastizitätsgrenze vermindert sich also infolge der Zunahme an kinetischer Energie die Stabilität der Massepunkte in ihren Gleichgewichtslagen, denn gleichzeitig vermindert sich die Wirksamkeit der potentiellen Energie, die andererseits für die Stabilität der Massepunkte in ihren Gleichgewichtslagen arbeitet.

Direkte Folge einer weiteren Steigerung der allseitigen Druckbeanspruchung ist die Lockerung der Massepunkte im Kristallgitter, die dann nicht mehr fest an die Gleichgewichtslage des Kristallgitters gebunden sind. Durch Wirkung äußerer Kräfte können die Massepunkte also versetzt werden. Der Zeitpunkt, wo der Massepunkt aufhört, an seine Lage im Kristallgitter gebunden zu sein, stellt den Grenzpunkt zwischen dem festen und dem plastischen Aggregatzustand dar oder, besser gesagt — den Beginn der Plastizität.

Kurzgefaßt kann gesagt werden:

Die Plastizität beginnt in dem Moment, wo die kinetische Energie der Massepunkte — die sich aus der Intensivierung der Schwingungsbewegungen ergibt — mindestens ebenso groß ist wie die augenblickliche potentielle Energie. Das heißt, daß der Beginn der Plastizität durch einen Zustand gekennzeichnet ist, wo die energetische Komponente, die für die Labilität des Kristallgitters arbeitet (und dies ist die Wirksamkeit der kinetischen Energie, die sich aus den Schwingungsbewegungen der Massepunkte ergibt), wenigstens so groß ist wie die energetische Komponente, die für die Stabilität des Kristallgitters arbeitet (und dies ist die Wirksamkeit der potentiellen Energie).

Den Beginn der Plastizität können wir auf Grund der angeführten Erläuterung durch folgende vereinfachte symbolische Gleichung

$$E_p = E_k \quad (1)$$

ausdrücken, wobei E_k die für die Labilität des Kristallgitters arbeitende Komponente — die kinetische Energie — und E_p die für die Stabilität des Kristallgitters arbeitende Komponente — die potentielle Energie — bedeutet.

Es muß bemerkt werden, daß die erwähnte Erläuterung sehr vereinfacht ist, denn die dabei verlaufenden energetischen Prozesse sind sehr kompliziert, da sie sich wechselseitig beeinflussen und bedingen. Die erwähnten Prozesse haben unbedingt eine Umwandlung der Energie in andere Energieformen, z. B. Wärme, elektrische Energie und Strahlungsenergie, zur Folge. — Die Bezeichnung Wärme, elektrische Energie und Strahlungsenergie werden hier nur zur Vereinfachung der Erklärung benutzt, da diese Ausdrücke allgemein benutzt werden. Im Grunde handelt es sich jedoch bei den dreiangeführten Energieformen um Strahlungsenergie mit dem charakteristischen Zeichen der räumlichen Verbreitung. —

Bei der energetischen Umwandlung entfällt wahrscheinlich der größte Teil auf die Wärme. Diese begünstigt weiter die Intensität der Schwingungsbewegungen der Massenteilchen und unterstützt dadurch auch die Steigerung der Labilität.

Infolge der Wirkungsverminderung der potentiellen Energie bei gleichzeitiger Steigerung der Wirksamkeit der kinetischen Energie — einschließlich der umgewandelten Wärme, elektrischen Energie und Strahlungsenergie, die auch die Wirksamkeit der kinetischen Energie unterstützen — bleiben die Massepunkte nicht mehr an die Gleichgewichtslagen im Kristallgitter gebunden, was schließlich auf das Schwinden des Kristallgitters hinwirkt.

Das Schwinden des Kristallgitters bei der Gesteinsplastizität, bedingt durch die Auflockerung der Massepunkte in den Gleichgewichtslagen, beginnt in dem Moment, wo die Summe der Wirksamkeit der kinetischen Energie und der Strahlungsenergie mindestens so groß ist, wie die Wirksamkeit der momentanen potentiellen Energie. Das Kristallgitter beginnt also in dem Moment zu schwinden, dessen Zustand durch die vorangeführte symbolische Gleichung (1) gekennzeichnet ist.

Bei weiterer Steigerung der allseitigen Druckbeanspruchung (Zusammendrücken) steigt auch die Labilität der Massepunkte an, und das Schwinden des Kristallgitters

wird deutlicher. Das Schwinden des Kristallgitters können wir vom energetischen Standpunkt symbolisch durch die Gleichung

$$E_k + (E_w + E_e + E_s) = E_p \quad (2)$$

ausdrücken (E_w — Wärmeenergie, E_e — elektrische Energie, E_s — Strahlungsenergie; E_k und E_p wie in Gleichung (1)).

Die Plastizität ist also durch ein bestimmtes Verhältnis der Wirksamkeiten der beteiligten Energieformen bedingt, und zwar in dem Sinne, daß diejenigen energetischen Komponenten eine größere Wirksamkeit haben, die für die Labilität des Kristallgitters arbeiten, als diejenigen Komponenten, die für dessen Stabilität arbeiten.

Plastizitätsgrad

In Abhängigkeit von der Größe der allseitigen Druckbeanspruchung kann die Plastizität verschiedenartig sein. Die Qualität der Plastizität können wir theoretisch durch den Plastizitätsgrad ausdrücken, der das Verhältnis von der Wirksamkeit der die Labilität des Kristallgitters verursachenden energetischen Komponenten zur Wirksamkeit der für die Stabilität des Kristallgitters arbeitenden energetischen Komponenten darstellt.

Bezeichnen wir die Wirksamkeit der kinetischen Energie und der Komponenten, die für die Labilität des Kristallgitters arbeiten, mit W_k und die Wirksamkeit der für die Stabilität arbeitenden energetischen Komponenten, also die Wirksamkeit der potentiellen Energie mit W_p , dann gilt für den Beginn der Plastizität die Beziehung

$$W_k = W_p \quad (3)$$

Der niedrigste Plastizitätsgrad besteht am Beginn der Plastizität, wobei

$$\frac{W_k}{W_p} = 1 \quad (4)$$

Der höchste Plastizitätsgrad wird bei vollkommener, theoretisch absoluter Plastizität erreicht. Dabei hat die Wirksamkeit der potentiellen Energie, d. h. die Wirksamkeit derjenigen energetischen Komponenten, die für die Stabilität des Kristallgitters arbeiten, einen sehr kleinen, zu Null konvergierenden Wert, so daß wir schreiben können:

$$W_p \rightarrow 0 \quad (5)$$

Die Wirksamkeit der kinetischen Energie und derjenigen energetischen Komponenten, die deren Wirksamkeit verstärken, also die Wirksamkeit aller Komponenten, die für die Labilität des Kristallgitters arbeiten, erreicht dabei jedoch einen bestimmten Maximalwert, den wir mit A_{max} bezeichnen. Auf Grund des Gesagten können wir dann schreiben:

$$W_k = A_{max} \quad (6)$$

Zusammenfassend können wir feststellen, daß die vollkommene, theoretisch absolute Plastizität des Gesteins — vom energetischen Standpunkt gesehen — durch einen

Zustand gekennzeichnet ist, in dem die Wirksamkeit der potentiellen Energie so klein ist, daß sie sich dem Nullwert nähert, während die Wirksamkeit der kinetischen Energie einen bestimmten Wert erreicht, der für sie — unter den gegebenen Bedingungen — einen Maximalwert darstellt.

Der Plastizitätsgrad bei vollkommener, theoretisch absoluter Plastizität kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{A_{max}}{W_p \rightarrow 0} = \infty \quad (7)$$

Das bedeutet also, daß bei absoluter Plastizität der Plastizitätsgrad gleich ∞ ist.

Handelt es sich nicht um Stoffe mit höchstem Plastizitätsgrad, dann sind die energetischen Teilwerte der Wirksamkeit der beteiligten Energien bei verschiedenen Stoffen verschieden groß. Sehr stark machen sich hier die Einflüsse äußerer Faktoren, z. B. der Geschwindigkeit und die Art der Beanspruchung, der Strahlungsenergie usw. geltend. Es gibt eine Anzahl beeinflussender Faktoren, deren genaue Wirksamkeit kaum bekannt ist. Es sind noch nicht einmal alle beeinflussenden Faktoren bekannt.

Zur Bestimmung der Plastizitätsqualität, d. h. des Plastizitätsgrades, wird es nötig sein, die einzelnen energetischen Werte — sei es auf direkte oder indirekte Weise — festzustellen. Bei der Bestimmung der einzelnen energetischen Komponenten stehen wir mit unseren heutigen Kenntnissen erst am Anfang; die Lösung des Kernproblems wird noch viel Arbeit erfordern.

Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken im plastischen Zustand

Eine sehr wichtige Erscheinung, die beim Gestein im plastischen Zustand auftritt, ist die Steigerung des Gesteinswiderstandes gegen Zusammendrücken. Dies läßt sich wie folgt erklären: Im plastischen Zustand verkleinert sich die Oberfläche des Gesteinskörpers; seine Massenteilchen sind, da sie nicht an ihre Gleichgewichtslagen gebunden sind, frei und können sich einander sehr annähern, gegebenenfalls auch berühren. Bei mechanischer Beanspruchung verlaufen die Verformungsprozesse in den Bindungen der Massenteilchen; die Massenteilchen selbst können durch mechanische Beanspruchung nicht verformt werden. Diese Gegebenheit begründet also die Steigerung des Gesteinswiderstandes gegen Zusammendrücken im plastischen Zustand des Gesteins.

Es ist offensichtlich, daß der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken vom Plastizitätsgrad abhängig ist. Diese Abhängigkeit kann man so definieren:

Der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken ist um so größer, je größer der Plastizitätsgrad des Gesteins ist.

Wir können also sagen, daß der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken direkt proportional dem Plastizitätsgrad des Gesteins ist.

Aus dieser Bestimmung der Abhängigkeit des Gesteinswiderstandes gegen Zusammendrücken vom Plastizitätsgrad geht hervor, daß der größte Gesteinswiderstand gegen

Zusammendrücken in dem Moment erreicht wird, in dem das Gestein im Zustand absoluter Plastizität ist. Bei absoluter Plastizität ist der Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken absolut (unendlich groß).

Das Eintreten des absoluten Gesteinswiderstandes gegen Zusammendrücken läßt sich auf mehrere Arten definieren:

- a) Der absolute Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken ist durch die absolute Plastizität des Gesteins bedingt.
- b) Beim Plastizitätsgrad gleich ∞ ist der Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken absolut (unendlich groß).
- c) Der Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken ist unendlich groß, wenn auch der Plastizitätsgrad des Gesteins unendlich groß ist.

Aus diesen theoretischen Formulierungen geht eine wichtige Erkenntnis hervor, die eine wichtige Gesteinscharakteristik im Zustand absoluter Plastizität bestimmt:

Bei absoluter Plastizität ist das Gestein durch eine weitere Steigerung der mechanischen Beanspruchung unzerdrückbar.

Absolute Plastizität

Die absolute Plastizität haben wir eigentlich schon bei der Erklärung des höchsten Plastizitätsgrades bestimmt. Vom energetischen Standpunkt können wir die absolute Plastizität symbolisch so ausdrücken:

$$W_p \rightarrow 0, \text{ wobei } W_k = A_{max} \quad (8)$$

Da bei absoluter Plastizität die für die Stabilität arbeitenden energetischen Komponenten (also die potentielle Energie) sehr klein sind und deren Wirksamkeit sich Null nähert, gibt es hier keine Faktoren, die die Bewegung der Massepunkte aus ihren Gleichgewichtslagen verhindern könnten, die für das Kristallgitter im festen Zustand kennzeichnend sind. Daher besitzt das Gestein bei absoluter Plastizität kein Kristallgitter. Ist das Gestein in diesem Zustand, so kann nicht vom Winkel der inneren Reibung gesprochen werden; denn bei absoluter Plastizität, wo die Massepunkte labil sind und das Gestein kein Kristallgitter hat, ist der Winkel der inneren Reibung gleich Null.

In Anbetracht dessen, daß durch die absolute Plastizität die mechanischen und physikalischen Grundeigenschaften des Gesteins geändert werden, dürfte dieser Zustand des Gesteins als die höchste Form der Gesteinszerstörung infolge mechanischer Beanspruchung zu betrachten sein.

Als Beanspruchungsart, durch die die absolute Plastizität erreicht wird, ist die allseitige und gleichmäßige Druckbeanspruchung charakteristisch.

Ihr Vorkommen in der Natur kann in der Übergangszone zwischen der Lithosphäre und dem Inneren der Erdkugel angenommen werden. Obwohl bisher noch keine eingehenderen Forschungen über die energetischen Umwandlungen im Zustand absoluter Plastizität vorgenommen wurden (mangels geeigneter Meßapparaturen), kann

nicht die Hypothese ausgeschaltet werden, daß die hohen Temperaturen der unteren Grenzgebiete der Lithosphäre aus den exothermen Umwandlungsreaktionen der energetischen Komponenten, die an der Bildung der Plastizität teilnehmen, resultieren. (Dafür sind noch andere Faktoren verantwortlich, z. B. der Zerfall radioaktiver Stoffe.) In der Übergangszone zwischen der Lithosphäre und dem Inneren der Erde vollziehen sich ununterbrochen energetische Umwandlungen, die mit dem periodischen Verformungsprozeß der harten Erdrinde zusammenhängen. Sehr stark kann sich der Einfluß der periodischen Änderungen mancher physikalischen Größen der Erde geltend machen, z. B. der Einfluß der Frühjahrsverzögerung und zeitiger Beginn des Herbstes der Erdrotation, der Einfluß der durch die Anziehungskraft des Mondes hervorgerufenen Erdzeiten usw.

An die Zone der absoluten Plastizität schließt sich die Zone des 5. Aggregatzustandes an, d. h. des Aggregatzustandes der Atomverdichtung, den wir im Inneren der Erde voraussetzen.

Teilweise Plastizität

Die Gesteinszerstörung durch teilweise Plastizität ist — in Hinsicht auf die möglichen Plastizitätsgrade — sehr umfangreich. Im Gegensatz zu der absoluten Plastizität wird die teilweise Plastizität durch eine allseitige, jedoch ungleichmäßige Druckbeanspruchung verursacht. Die Ungleichmäßigkeit der Druckbeanspruchung hat zur Folge, daß das Verhältnis der Wirksamkeiten der energetischen Komponenten, die für die Labilität oder die Stabilität des Kristallgitters arbeiten, und die Änderungen des Verhältnisses der energetischen Wirksamkeiten nicht gleichzeitig in allen Richtungen verlaufen, sondern daß eine der gegebenen Richtungen überwiegt.

Bei teilweiser Plastizität ist die Labilität der Massepunkte nicht in allen Richtungen gleich groß, sondern sie ist in der Richtung der überwiegenden Beanspruchung größer. Durch Erreichung der Labilität in Richtung der überwiegenden Beanspruchung wird die Entstehung der Gesamtlabilität in den anderen Richtungen bedeutend erleichtert. Auf Grund des Gesagten kann eine bestimmte Labilität und demnach auch ein bestimmter Grad teilweiser Plastizität leichter erreicht werden, d. h. durch eine summarisch kleinere allseitige Druckbeanspruchung als bei absoluter Plastizität, bei der — auch bei deren Beginn — die Labilität der Massepunkte gleichmäßig und gleichzeitig gesteigert wird, wie dies die allseitige gleichmäßige Druckbeanspruchung bedingt.

Infolge Ungleichmäßigkeit der allseitigen Druckbeanspruchung wird der Zustand teilweiser Plastizität durch ein kleineres Quantum potentieller Energie erreicht, als es für das allseitige gleichmäßige Zusammendrücken und für den Übergang auf die absolute Plastizität kennzeichnend ist. Dies ist durch die Verformungscharakteristik bedingt; denn bei einem allseitigen ungleichmäßigen Zusammendrücken sind auch die Verformungen ungleichmäßig.

Der Beginn der teilweisen Plastizität ist durch die symbolische Gleichung (1) $E_k = E_p$ gekennzeichnet. Bei Steigerung der allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung

Symbolische Gleichung
 (1) $E_k = E_p$
 Freiberg, i. Sa.

steigt dann der Plastizitätsgrad der teilweisen Plastizität, wobei dieser Prozeß (vom energetischen Standpunkt) durch die Gleichung (2)

$$E_k + (E_w + E_e + E_s) = E_p$$

gekennzeichnet ist.

Bei Steigerung der allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung und demnach bei Steigerung des Grades der teilweisen Plastizität ist die Labilität des Kristallgitters in der Richtung der überwiegenden Druckbeanspruchung größer. Man kann jedoch voraussetzen, daß bei unverändertem ungleichmäßigem allseitigem Druck nach einer bestimmten Zeit ein Ausgleich der Labilität der Massepunkte in verschiedenen Richtungen auftreten kann.

Es ist klar, daß sich bei teilweiser Plastizität der Gesteinswiderstand gegen mechanisches Zusammendrücken geltend macht, wobei der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken proportional dem Plastizitätsgrad bei teilweiser Plastizität ist. Durch teilweise Plastizität kann der absolute Widerstand gegen Zusammendrücken nicht erreicht werden, denn im Zustand teilweiser Plastizität können die Massepunkte nicht in einem so kleinen Raum zusammengestellt sein, wie dies bei absoluter Plastizität möglich ist.

Beim Schwinden des Kristallgitters bei teilweiser Plastizität tritt kein so vollständiger Verlust des Kristallgitters auf wie bei absoluter Plastizität, auch wenn bei einem hohen Grad teilweiser Plastizität die Labilität der Massepunkte — besonders in manchen Richtungen — sehr markant ist. Dies ist jedoch durch das allseitige, aber ungleichmäßige Zusammendrücken und durch den ungleichmäßigen Verformungsverlauf, also durch die Charakteristik der Beanspruchung und der Verformung bedingt.

Die Erforschung des Zustandes teilweiser Plastizität der Gesteine ist von großer Bedeutung für die wissenschaftlichen und technischen Zweige, die direkt mit der Natur, mit den Gesteinen zusammenhängen. Größte Bedeutung wird sie wohl für die Forschung auf dem Gebiet der Tektonik haben. Viele tektonische Erscheinungen sind bisher noch nicht befriedigend erklärt und begründet worden; denn es sind noch nicht diejenigen Naturgesetze bestimmt worden, nach denen sich die Gesteine unter verschiedenen Bedingungen, die in der Natur auftreten, richten.

Viele tektonische Formationen entstanden im Zustand teilweiser Plastizität; die Bestimmung der Prinzipien ihrer Entstehung ist ohne tiefe Kenntnisse über die Gesteinsplastizität unmöglich. Zu einer weiteren Erforschung dieser Problematik werden neue Meßgeräte und Apparate benutzt werden müssen, deren Anschaffungskosten sehr groß sein werden, und zwar proportional den Ergebnissen, die wir erreichen wollen.

Es kommt darauf an, in welchem Bereich die natürlichen Einflußfaktoren (z. B. Einfluß der Wärme, der natürlichen Strahlungsenergie, die durch den Zerfall der radioaktiven Elemente nach den Zerfallsreihen Uran-Radium, Thorium oder Aktinium usw. frei wird) erfaßt werden sollen.

Mit Bestimmtheit kann aber schon heute gesagt werden, daß bei Anwendung geeigneter Apparate und Geräte allmählich die Prinzipien aller tektonischen Erscheinun-

gen gelöst werden können, und zwar hauptsächlich mit Hilfe des Laborexperimentes. Die Lösung der Prinzipien tektonischer Probleme wird für die Forschung eine große Bedeutung haben, die jetzt noch nicht richtig abgeschätzt werden kann; die neuen Ergebnisse werden nicht nur auf dem Gebiet der Tektonik und der Geologie ausgenutzt werden, sondern auch auf vielen anderen Gebieten menschlicher Tätigkeit, z. B. in der Geophysik, in der geologischen Prospektion, in der Mineralogie, besonders aber auch im Bergbau.

Da für die Erforschung der teilweisen Plastizität bis jetzt noch keine geeigneten Geräte und Apparate konstruiert wurden, konnte dieser Fragenkomplex bisher nur mit äußerst primitiven Mitteln untersucht werden. Zu den Prüfungen wurden relativ weiche natürliche Gesteine eingesetzt, weil mit der vorhandenen Prüfungseinrichtung nicht so große Beanspruchungen möglich waren, durch die auch festere Gesteine in den Zustand teilweiser Plastizität überführt werden konnten. Die Belastung der Gesteinsproben wurde auf einer hydraulischen Presse vom VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig mit einer maximalen Leistung von 300 t erzeugt.

Bevorzugt wurden für die Versuche extrem plastische Gesteine, zu denen z. B. das Steinsalz (NaCl) gehört.

Steinsalzkristalle, in einen Stahlring geschüttet, der einen Seitendruck ausübte, wurden auf einer hydraulischen Presse belastet. Bei einer bestimmten Beanspruchung verbinden sich die Steinsalzkristalle. Diese Verschmelzung ist durch einen bestimmten Grad teilweiser Plastizität bedingt. Die Probe, die in Bild 35 dargestellt ist, wurde mit einem senkrechten Druck von 1000 kp/cm^2 beansprucht.

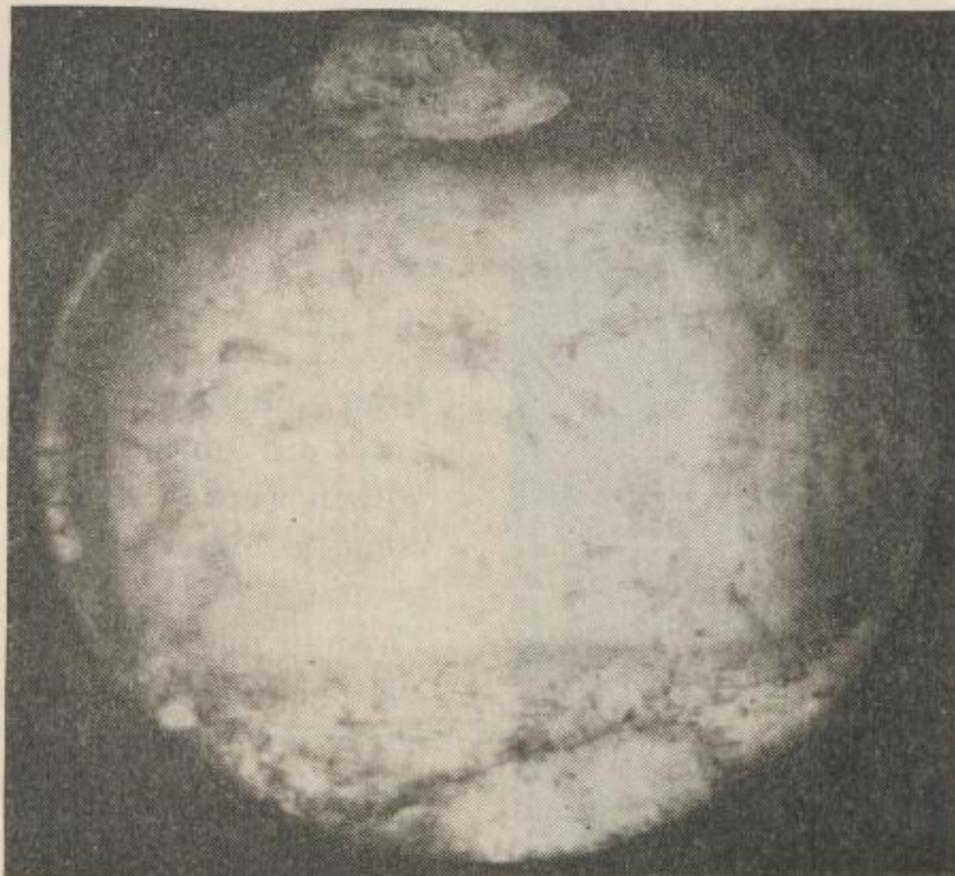


Bild 35

Wird die allseitige ungleichmäßige Beanspruchung erhöht, so wird ein höherer Grad teilweiser Plastizität erreicht, wobei die Kristalle noch besser verschmolzen werden. Nach Entlastung der Gesteinsprobe rekristallisiert das Gestein aus dem Zustand teilweiser Plastizität in den festen Zustand. Auf Bild 36a ist eine Probe mit zusammen-

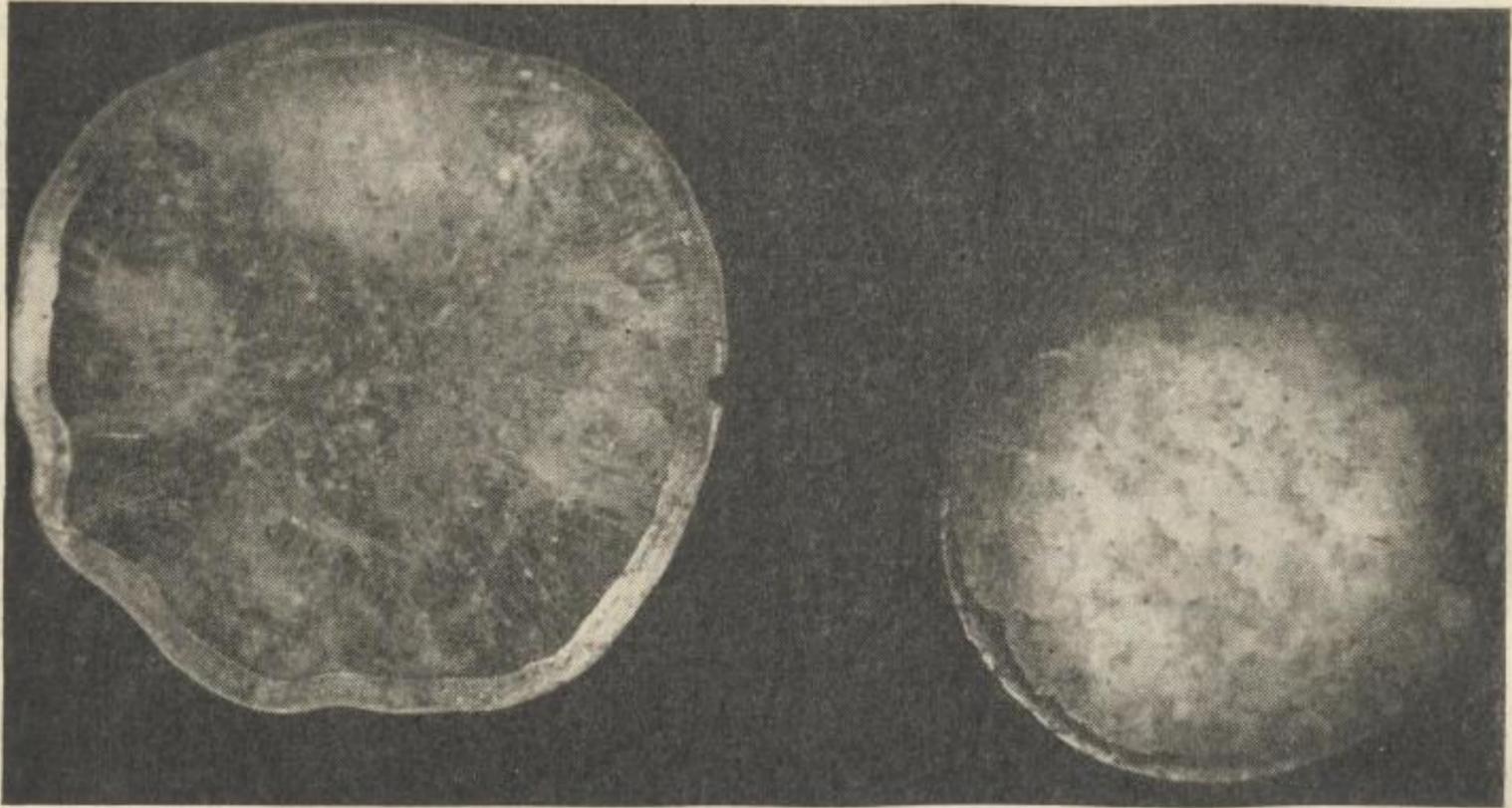


Bild 36

geschmolzenen Steinsalzkristallen dargestellt, die im Zustand teilweiser Plastizität bei einem senkrechten Druck von 1500 kp/cm^2 erreicht wurde.

Bei einer Druckbeanspruchung von 2100 kp/cm^2 wurde ein so hoher Grad teilweiser Plastizität erreicht, daß das Steinsalz im Stahlring in eine monolithische Platte über-

geführt wurde, wie dies auf Bild 36b zu sehen ist (die größere kreisförmige Fläche in der rechten Hälfte des Bildes 36b).

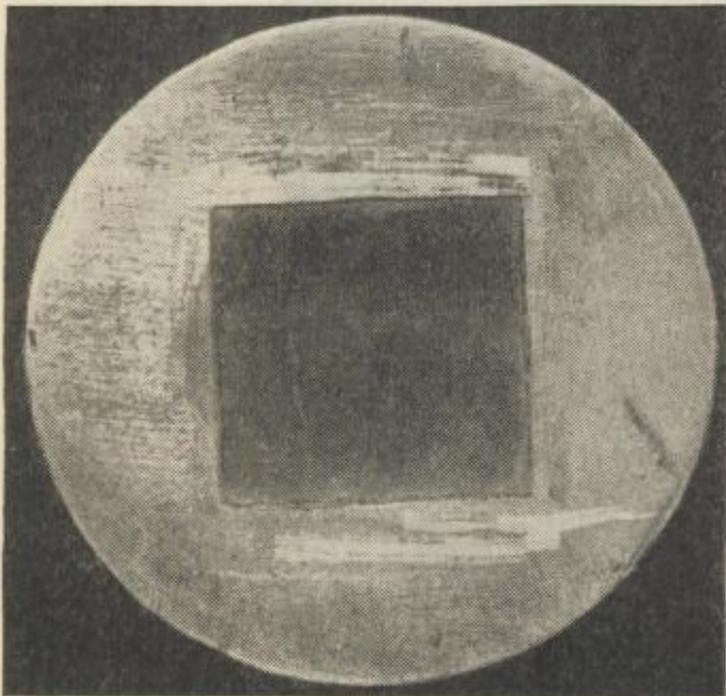


Bild 37

Ganz eindeutig kann die teilweise Plastizität auf einem Salzmonokristall bewiesen werden. Auf Bild 37 sieht man einen in eine metallische Fassung eingesetzten gleichhohen Salzkristall. Die Fassung mit dem Kristall wurde flach zwischen die parallelen Druckplatten der Presse gelegt. Bei Beanspruchung übte dann die metallische Fassung einen Manteldruck auf den Salzkristall aus. Bei einer Druckbeanspruchung von rund 2400 kp/cm^2 wurde ein verhält-

nismäßig hoher Grad teilweiser Plastizität erreicht, so daß der Kristall — nach Entlassung und nach Rekristallisierung aus dem Zustand teilweiser Plastizität — eindeutig bleibend verformt wurde (Bild 38). Es muß bemerkt werden, daß diese ausdrucksvollen Formänderungen des Salzkristalles, denen das Metall der Fassung weichen mußte, dadurch verursacht wurden, daß im Zustand teilweiser Plastizität der Widerstand des Salzes gegen Zusammendrücken wesentlich größer war als der Widerstand der metallischen Fassung. Diese Tatsache machte sich vor allem dort bemerkbar, wo die Fassung den kleinsten Querschnitt hatte; denn in Richtung

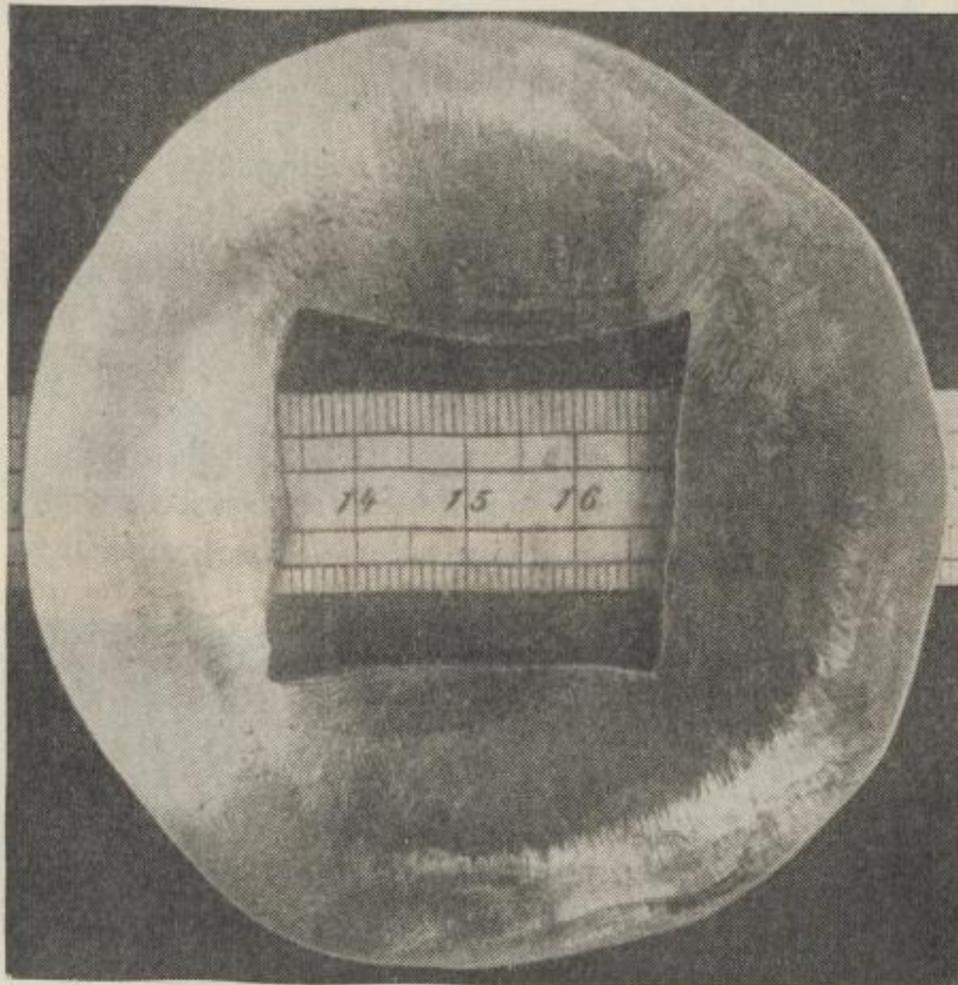


Bild 38

dieser Stellen leistete die Fassung dem sich im Zustand teilweiser Plastizität befindlichen Salz den kleinsten Widerstand.

Was für ein bedeutender und wirksamer Faktor der Widerstand des Gesteins gegen Zusammendrücken bei einem hohen Grad teilweiser Plastizität ist, macht Bild 39 deutlich. Die auf dem Querschnitt der stählernen Unterlegeplatte sichtbare Vertiefung wurde von dem kleinen Zylinder aus Salz, der sich im hohen Zustand teilweiser Plastizität befand, ausgedrückt.

Diese einfachen Grundexperimente gaben Veranlassung, einige einfache tektonische Erscheinungen auf Modellen aus natürlichen Gesteinen, besonders aus Steinsalz nachzuahmen.

Die Entstehung der Flexuren, die zu einer ausdrucksvollen Formänderung der Gesteinsschicht führte, wobei aber die Gesteinsschicht nicht durch Zerklüften zerstört

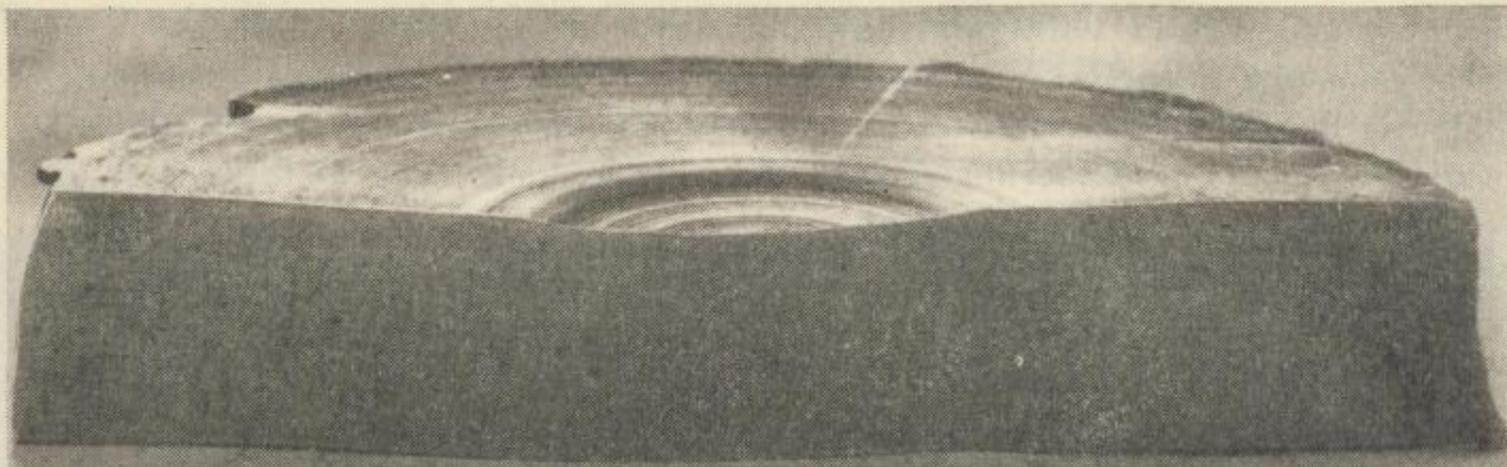


Bild 39

wurde, kann nur durch den Zustand teilweiser Plastizität des Gesteins begründet werden. Diese Voraussetzung wurde durch Laborversuche, bei denen ursprünglich gerade Steinsalzsichten flexurartig verformt wurden, eindeutig bestätigt. Bild 40 zeigt den Querschnitt einer flexurartig verformten Salzsicht. Die allseitige ungleichmäßige Beanspruchung wurde auf die Salzsicht mittels eines Blocks aus hartem Blei, in dem die Salzsicht vor der Prüfung eingepreßt wurde, übertragen. Der Block mit der eingepreßten Salzsicht wurde in einer stählernen Buchse unter der Presse beansprucht. Außerdem wurde die Modellprobe noch durch einzelne Lasten beansprucht, um eine flexurartige Verformung der Steinsalzsicht zu erreichen.



Bild 40

Die Ergebnisse ähnlicher Versuche, jedoch mit einer bedeutend größeren allseitigen und ungleichmäßigen Druckbeanspruchung, durch die ein höherer Grad teilweiser Plastizität erreicht werden sollte, sind auf Bild 41 und Bild 42 zu sehen.

Auf Bild 43 ist der Verlauf der Formänderungen einer Steinsalzschrift zu sehen, wobei — um eine bessere Vorstellung zu bekommen — der Bleiblock retuschiert wurde.

Auf Bild 43 ist oben die verformte Schicht des Modells aus Bild 41 und unten die verformte Schicht des Modells aus Bild 42 zu erkennen.

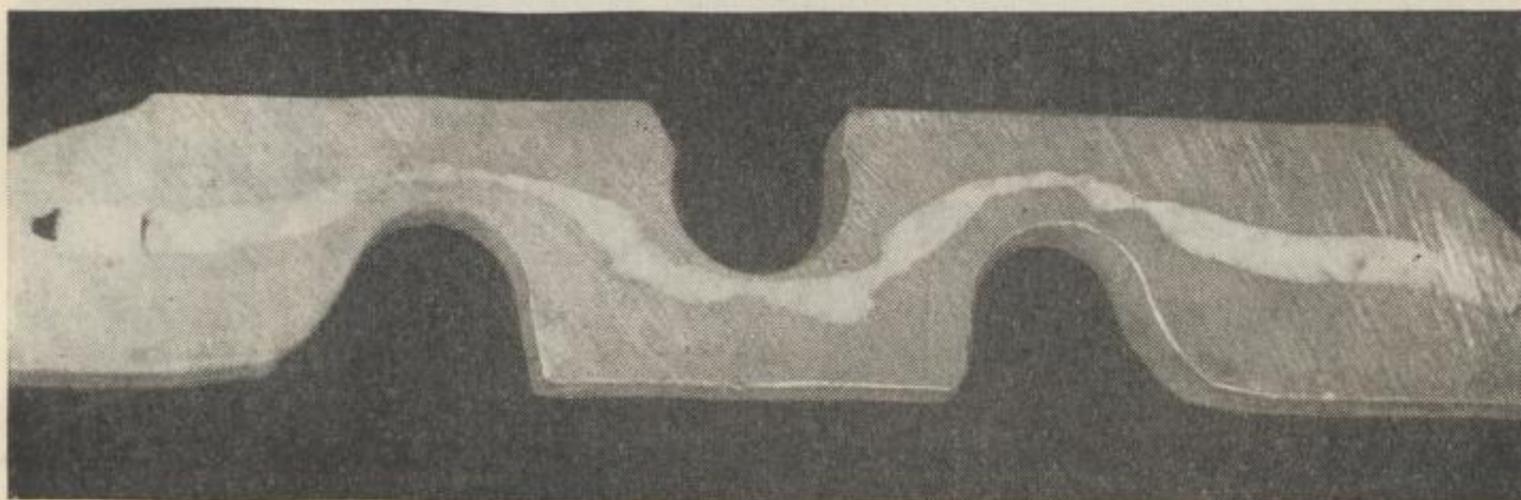


Bild 41

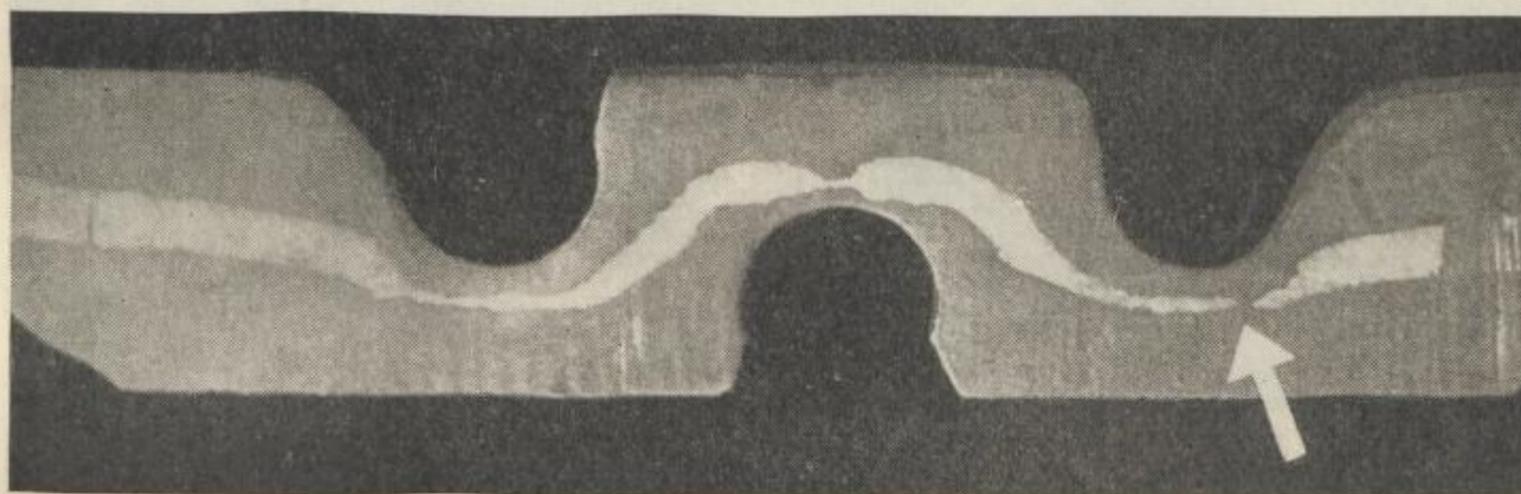


Bild 42

Wird die Beanspruchung noch weiter gesteigert, so daß ein noch höherer Grad teilweiser Plastizität erreicht wird, und besonders wenn wir die nötige Druckbeanspruchung längere Zeit wirken lassen, so kann eine ganz ausdrucksvolle Unterbrechung der Schicht auftreten, wie dies auf dem Modellquerschnitt auf Bild 44 zu sehen ist; Bild 45 zeigt die reine Salzschrift.

Die Steinsalzschriften waren bei allen Modellen (Bild 41 bis Bild 45) vor dem Versuch gerade und wurden in die Blöcke waagrecht eingesetzt. Die Formänderungen der Schichten entstanden im Zustand der teilweisen Plastizität des Gesteins. Die verformten, verschieden durchgebogenen und unterbrochenen Schichten haben keinerlei, auch keine mikroskopischen Risse.

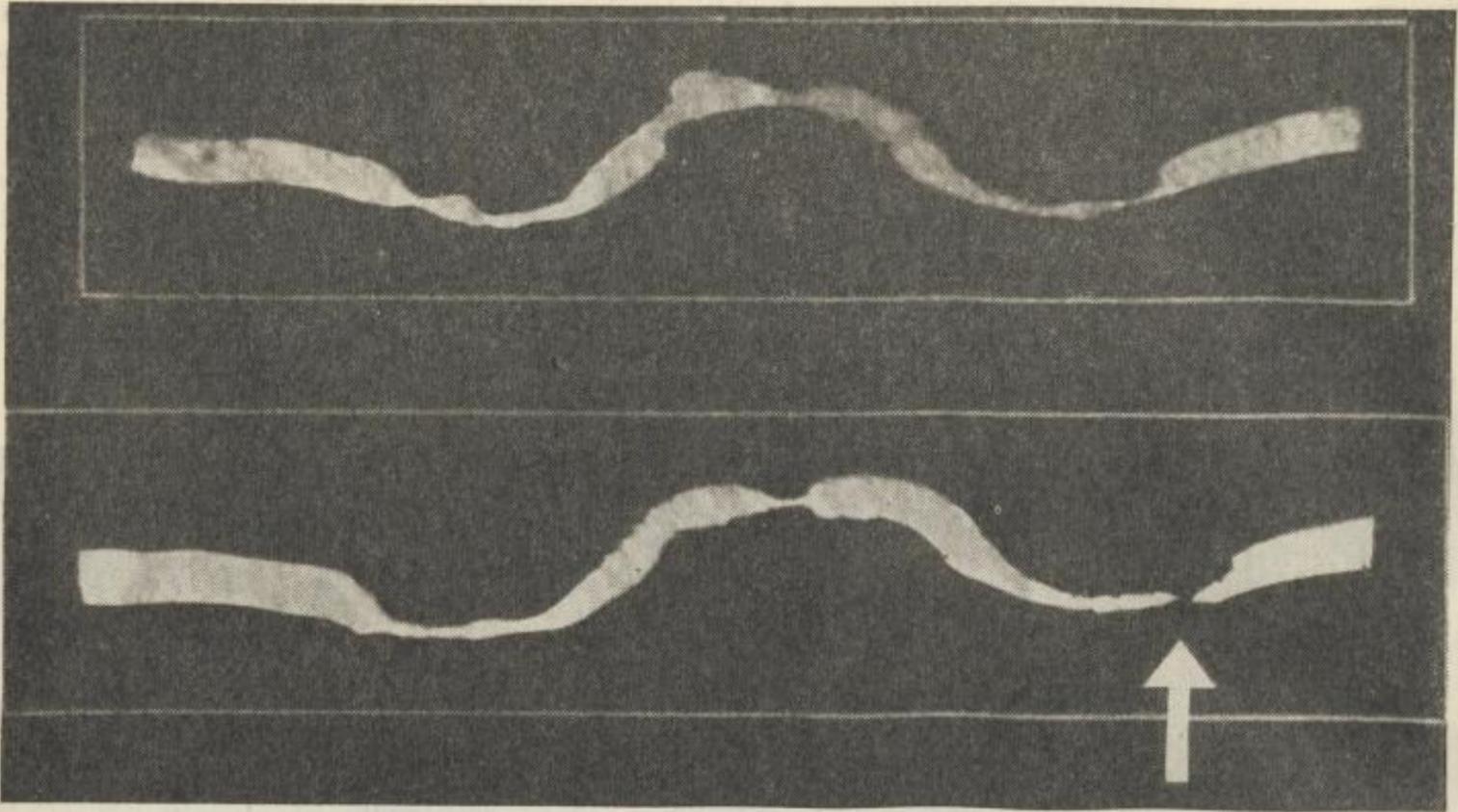


Bild 43

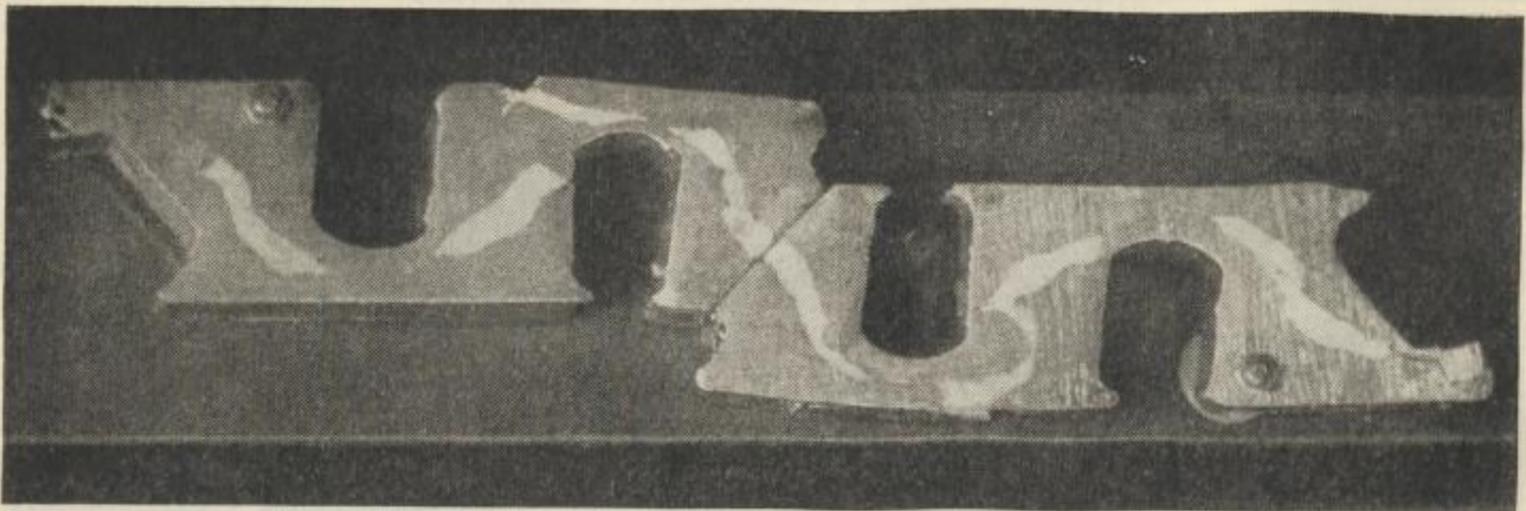


Bild 44

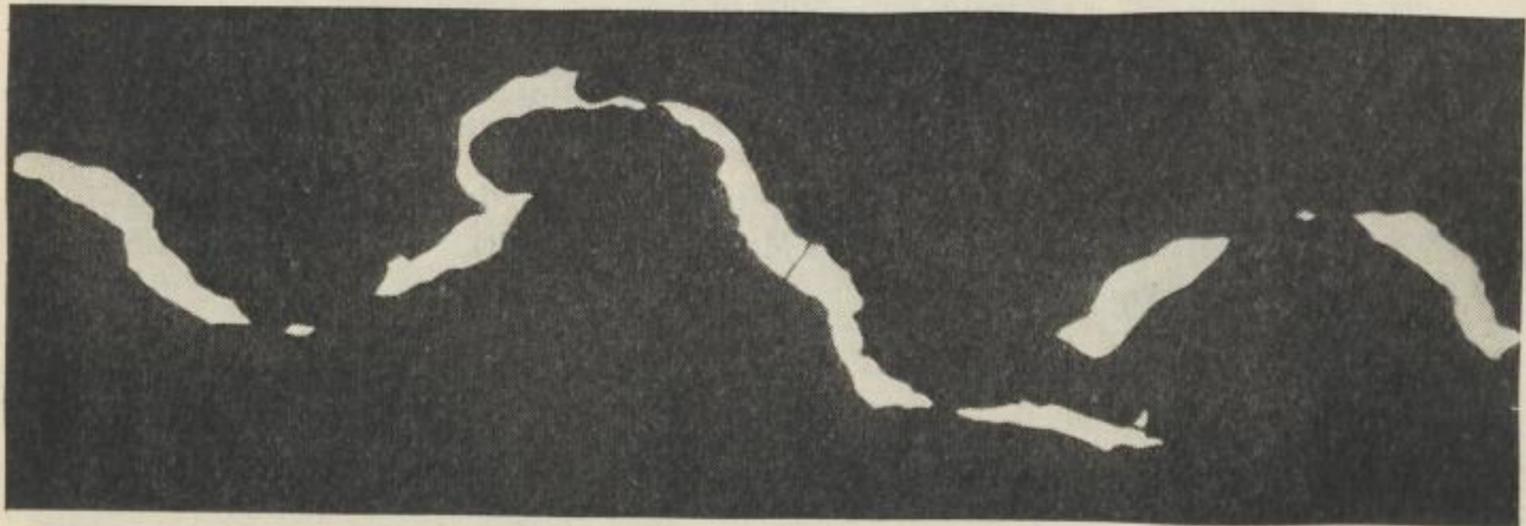


Bild 45

Auf Grund der durchgeführten Forschungsarbeiten wurde die gesetzmäßige Bedeutung des Plastizitätsgrades unter natürlichen Verhältnissen erkannt, die wie folgt ausgedrückt werden kann:

Ein Gestein mit einem höheren Plastizitätsgrad und demzufolge auch mit einem größeren Widerstand gegen Zusammendrücken zerdrückt Gesteine mit einem niedrigeren Plastizitätsgrad und einem kleineren Widerstand gegen Zusammendrücken.

Da ein Gestein im Zustand teilweiser Plastizität einen größeren Widerstand gegen Zusammendrücken leistet als ein Gestein im festen, elastischen Zustand, können wir die angeführte Erkenntnis auch auf Gesteine im festen, unplastischen Zustand übertragen.

Ein Gestein im Zustand einer bestimmten teilweisen Plastizität leistet einen bedeutend größeren Widerstand gegen Zusammendrücken als ein unplastisches Gestein, also als ein Gestein im festen Zustand.

Ein Gestein im Zustand teilweiser Plastizität kann deshalb massive harte Gesteine, die nicht im plastischen Zustand sind, zerdrücken, und zwar in Richtung des kleinsten Widerstandes.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist die Tatsache, daß ein Gestein um so leichter in den Zustand teilweiser Plastizität überführt werden kann, je kleiner die Festigkeit des Gesteins im elastischen (festen) Zustand ist. Dies ist von großer Bedeutung für die Beurteilung und Begründung tektonischer Erscheinungen, denn Gesteine, die im elastischen Zustand wenig fest sind, weisen bei einer allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung einen höheren Grad teilweiser Plastizität und also auch einen größeren Widerstand gegen Zusammendrücken auf als sehr feste und auf gleiche Weise beanspruchte Gesteine.

Auf Grund der durchgeführten Versuche war es möglich — wenn auch nur in groben Rissen — das Prinzip des Zeiteinflusses auf den plastischen Zustand des Gesteins zu bestimmen. Kurzgefaßt kann dies so definiert werden:

Bei einer langdauernden allseitigen und ungleichmäßigen Beanspruchung kann derselbe Grad teilweiser Plastizität durch einen kleineren allseitigen ungleichmäßigen Druck erzielt werden als durch einen Druck, der bei einer kurzandauernden Druckbeanspruchung benötigt würde.

Der Einfluß des Zeitfaktors auf die Erhöhung des Plastizitätsgrades steigt proportional mit der Zeitdauer.

Bedenken wir, daß die Vermittlung der Beanspruchung durch eine kontinuierliche Übertragung dieser Beanspruchung von einem zum anderen Massepunkt des Gesteins mittels seiner Kräftebindungen vorsichgeht — wozu bei einer bestimmten Größe und Art der Beanspruchung eine bestimmte Zeitdauer nötig ist —, so finden wir die Ursache, warum sich der Grad der teilweisen Plastizität mit der Wirkungsdauer des gegebenen allseitigen ungleichmäßigen Druckes erhöht. In Abhängigkeit von dem Zeitfaktor können sich in großem Maße auch bestimmte Störungen und Defekte geltend machen, und zwar in dem Sinne, daß diese die Steigerung des Plastizitätsgrades unterstützen.

Der Einfluß des Zeitfaktors kann auch im extremen Falle, d. h. bei sehr schneller Beanspruchung bewiesen werden. Es sind Beispiele plastischer Sinterung (Verschmelzung) von Steinsalzkristallen bekannt, die zum Besatz der Sprengstoffladung im Bohrloch verwendet wurden. Bei Explosion der Sprengstoffladung wurde eine sehr schnelle starke dynamische Beanspruchung hervorgerufen, so daß das zum Besatz des Bohrloches angewandte Steinsalzpulver in den Zustand teilweiser Plastizität überführt wurde. Aus den Salzblöcken können dann an den Bohrstellen durch Plastizität gesinterte (verschmolzene) Salzstangen herausgenommen werden. Dies ist jedoch ein Beispiel für unnatürliche Herstellung der teilweisen Plastizität; es ist ein künstlich hervorgerufener extremer Fall, für den es in der Natur wahrscheinlich kaum eine Analogie gibt. Er wurde hier nur deshalb angeführt, um zu beweisen, daß sich der Einfluß des Zeitfaktors auf den Zustand der Gesteinsplastizität auch im extremen Fall unbedingt geltend macht.

Rekristallisation der Gesteine aus dem Zustand teilweiser Plastizität und bleibende Verformung des Kristallgitters

Im Zustand teilweiser Plastizität ändern sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Gesteine; denn der feste Zustand des Gesteins geht in den plastischen Zustand über, und zwar für eine Zeitdauer, während der die Faktoren wirken, die die Plastizität bedingen.

In der Natur treffen wir meistens auf Erscheinungen, bei denen die Gesteine schon vor vielen tausend Jahren einer plastischen Verformung unterworfen wurden. Wollen wir wenigstens ungefähr das Wesen der natürlichen Vorgänge, bei denen das Gestein aus dem plastischen in den festen Zustand überging, begreifen, so müssen wir unsere Aufmerksamkeit dem Problem der Rekristallisation zuwenden.

Die Rekristallisation ist eine unbedingt nötige Bedingung für die Erneuerung des festen Zustandes aus dem Zustand teilweiser Plastizität.

Denken wir an das Gesetz von der Erhaltung der Masse und der Energie, dann können wir den Rekristallisationsprozeß des Gesteins vom energetischen Standpunkt kurz so definieren:

Vom energetischen Standpunkt verläuft der Rekristallisationsprozeß des Gesteins nach Beendigung seiner Plastizität in umgekehrter Folge als beim Übergang in den plastischen Zustand.

Das bedeutet also, daß sich bei Rekristallisation der Gesteine infolge der allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung, die die Plastizität bedingte, die Wirksamkeit der für die Labilität des Kristallgitters arbeitenden energetischen Komponenten vermindert. Die Wirksamkeit der energetischen Komponenten, die für die Stabilität der Massepunkte im Kristallgitter arbeiten, vergrößert sich.

Zusammengefaßt kann gesagt werden, daß der Rekristallisationsprozeß durch Steigerung der Wirksamkeit der energetischen Komponenten gekennzeichnet ist, die für die Stabilität des Kristallgitters arbeiten. Es ist logisch, daß der Beginn der Re-

kristallisation durch den Gleichheitszustand der gegenseitig wirkenden energetischen Komponenten gegeben ist, wie Gleichung (1) angibt.

Im Falle der Rekristallisation des Gesteins aus dem Zustand teilweiser Plastizität kann die sich allmählich vermindernde allseitige ungleichmäßige Druckbeanspruchung den Charakter der Ungleichmäßigkeit behalten. Dies führt dazu, daß die Rekristallisation in der einen Richtung schneller verläuft als in der anderen. Der so verlaufende Rekristallisationsprozeß hat zur Folge, daß das Gestein nach Rekristallisierung aus dem Zustand teilweiser Plastizität eine bleibende Verformung des Kristallgitters aufweisen kann.

In bezug auf die Größe der bleibenden Verformung des Kristallgitters kann vorausgesetzt werden, daß die bleibende Verformung (Deformation) des Kristallgitters um so ausdrucksvoller ist, je ungleichmäßiger die Beanspruchung des Gesteins beim Übergang aus dem Zustand teilweiser Plastizität in den festen Zustand war.

Es ist klar, daß z. B. in einer gefalteten Schicht die allseitige ungleichmäßige Druckbeanspruchung, die den plastischen Zustand des Gesteins und dann — bei abnehmendem Druck — die Rekristallisation des Gesteins bedingte, nicht an allen Stellen der gefalteten Schicht gleich groß war. Deshalb können in verschiedenen Abschnitten der gefalteten Gesteinsschicht verschiedenartig verformte Kristallgitter auftreten, was auf den verschiedenen Bedingungen im Laufe der Rekristallisation beruht.

Die Erscheinung einer bleibenden Verformung des Kristallgitters durch die Rekristallisation des Gesteins aus dem Zustand teilweiser Plastizität wurde im Laboratorium an vielen Proben untersucht.

Bild 46 zeigt Steinsalzkristalle in einer Metallfassung vor der Prüfung. Bei einer allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung dieser Probe, bei welcher der senkrechte Druck 2200 kp/cm^2 betrug, wurde eine teilweise Plastizität erreicht, während der sich die einzelnen Kristalle verbunden haben. Nach der Entlastung aus dem Zustand teilweiser Plastizität und auch nach der Rekristallisation bilden die Kristalle eine kompakte Platte (Bild 47).

Die Verformung des Kristallgitters kann in Grundrissen durch Vergleich der mikroröntgenologischen Aufnahmen bewiesen werden. Die auf Bild 48, 49a und 49b, Bild 52a und 52b angeführten Mikro-Röntgenbilder wurden nach der Laue-Methode hergestellt. Die Laue-Methode besteht darin, daß mit Hilfe einer Blende mit einer kleinen Öffnung ein schmales Röntgen-Strahlenbündel erzeugt wird, das man durch

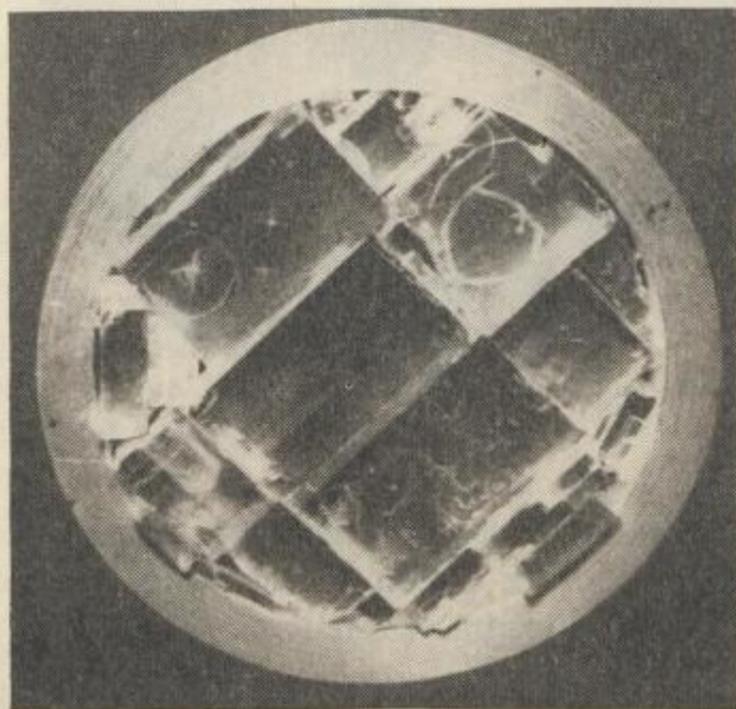


Bild 46

ein aus dem zu untersuchenden Kristall entnommenes Plättchen durchgehen läßt. Beim Durchgang durch das Kristallplättchen werden die Röntgenstrahlen — in Abhängigkeit von der Kristallstruktur — gebeugt und interferiert. Die Beugung und Interferenz der Röntgenstrahlen wird nach dem Durchgang der Strahlen durch das



Bild 47

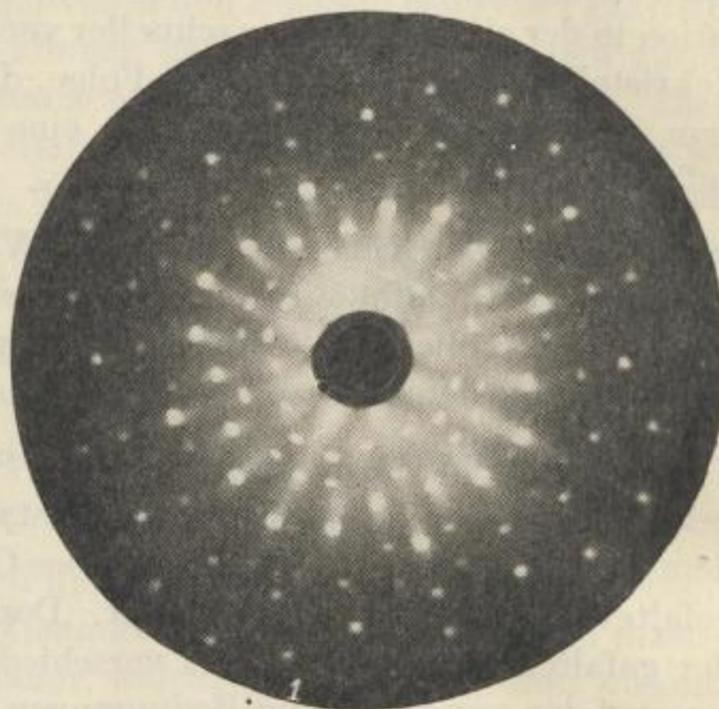


Bild 48

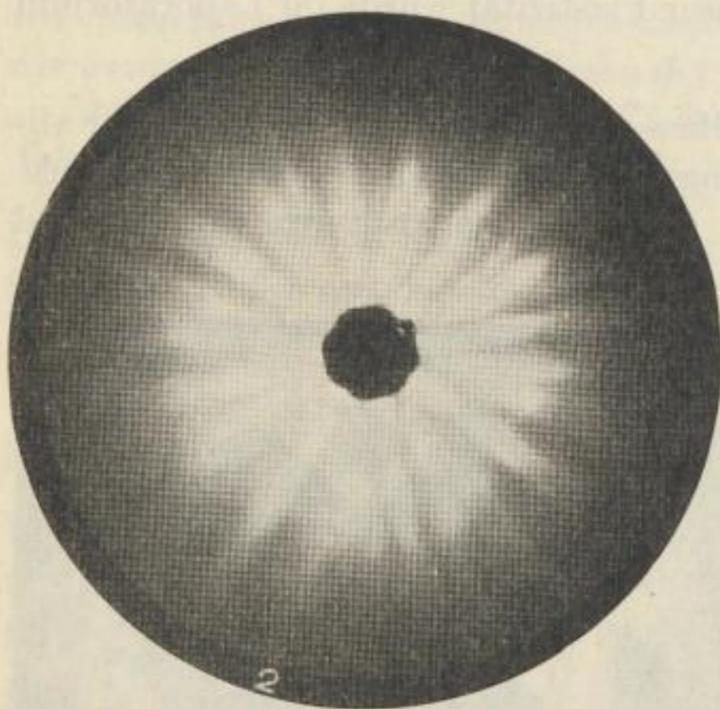


Bild 49 a

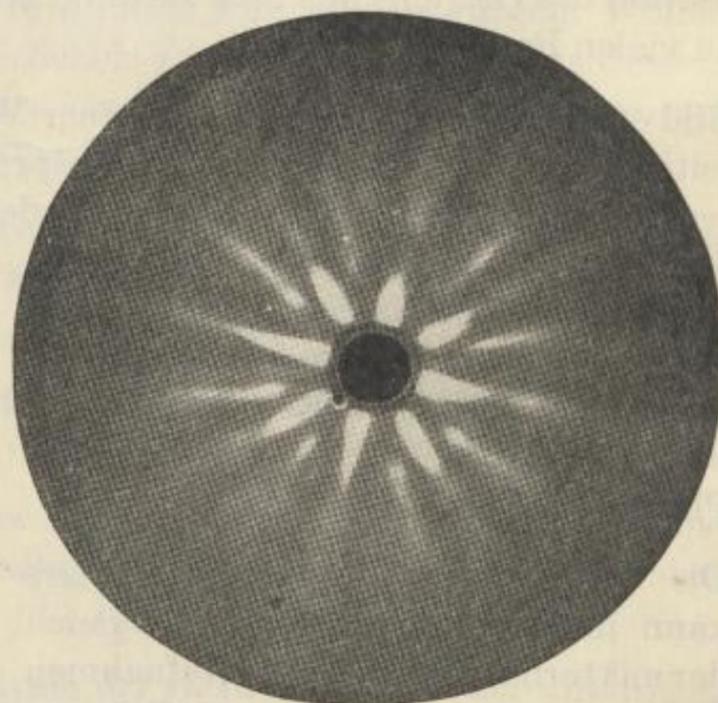


Bild 49 b

Kristallplättchen fotografiert. Auf dem Film bildet sich — in Abhängigkeit vom Kristallgitter — ein System von Flecken. Die so hergestellte Aufnahme wird als Laue-Diagramm bezeichnet.

Aus der Lage, der Verteilung und der Intensität der Flecke auf dem Laue-Diagramm kann dann die Atomanordnung im Strukturgitter des untersuchten Kristalls aus-

gerechnet werden. Die Laue-Methode eignet sich daher für eine genaue Auswertung der Kristallstruktur.

In unserem Falle wurden die Laue-Diagramme nicht eingehend und genau ausgewertet, sie sollten nur zur Bestätigung der Kristallverformung dienen. Vergleicht man die Laue-Diagramme des verformten und des nicht verformten Kristalls aus Bild 48, so ist die Verformung des Kristallgitters ganz offensichtlich.

Verschiedene Arbeitsbedingungen wurden bei der Herstellung von Laue-Diagrammen, die auf Bild 49a, 52a und b zu sehen sind, deshalb gewählt, um die Kristallverformung eindeutig beweisen bzw. bestätigen zu können.

(Eingehender ist die Laue-Methode in „Einführung in die geometrische und physikalische Kristallographie“ von F. RAZZ und H. TERTSCH/Wien: Springer-Verlag, 1958 beschrieben.)

Bild 48 enthält das Röntgenbild des nichtbeanspruchten Salzkristalles von Bild 46. Als Strahlungsquelle wurde die W-Röntgenlampe mit 40 kW, 20 mA benutzt; die Expositionszeit betrug 90 Minuten.

Bei dem aus dem Zustand teilweiser Plastizität rekristallisierten Salz (Bild 47) zeigt sich eine merkliche Verformung des Kristallgitters (Bild 49a).

Die Verformung desselben Kristallgitters ist sehr deutlich auch auf dem Röntgenbild (Bild 49b) zu sehen, das nach der Durchgangs-Methode, jedoch unter Benutzung einer $\text{CuK}\alpha$ -Strahlung (30 kV; 20 mA) bei einer Expositionszeit von 180 Minuten hergestellt wurde.

Die bleibende Verformung des Kristallgitters, die durch die Rekristallisation des Gesteins aus dem Zustand teilweiser Plastizität verursacht wurde, hat aber sowohl eine bestimmte Änderung der mechanischen als auch der physikalischen Eigenschaften des Gesteins zur Folge. Es tritt mitunter in manchen Richtungen eine Gesteinsverfestigung auf.

Auf den Verlauf der Rekristallisation haben ebenso wie auf die teilweise Plastizität hohe Temperaturen einen großen Einfluß. Sie unterstützen die Wirksamkeit jener energetischen Komponenten, die für die Labilität des Kristallgitters arbeiten und erleichtern so die Erreichung eines höheren Plastizitätsgrades. Davon können wir uns an Hand eines Beispiels überzeugen. Auf Bild 50 sehen wir eine Salzplatte in einer metallischen Fassung; das Salz wurde geschmolzen und in die angewärmte Ringform gegossen. Vor der Prüfung wurden auch die Druckplatten stark angewärmt. Danach wurde die Probe bei einer Temperatur von ca. 620°C allseitig beansprucht, wobei der maximale senkrechte Druck 1500 kp/cm^2 betrug. Die Prüfungstemperatur wurde allmählich bis auf die Temperatur der Umgebung, d. h. auf 22°C , herabgesenkt, und dann wurde die Probe entlastet. Die Rekristallisation verlief also im plastischen Zustand.

Das mikroskopische Röntgenbild des rekristallisierten Salzes der Probe von Bild 50 zeigt Bild 51. Es wurde unter folgenden Bedingungen hergestellt: 60 kV, 20 mA; $f = 800\text{ mm}$; Material-Fotochema Indux; Folie-Heyden Exacta.

Die bleibende Verformung des Kristallgitters durch Rekristallisation unter Einfluß der Temperatur ist markanter als die Deformation des Kristallgitters durch Rekristallisation aus dem Zustand teilweiser Plastizität ohne Temperatureinfluß, wie dies die Mikro-Röntgenbilder auf Bild 52a und 52b bestätigen (vgl. Bilder 49a und 49b).

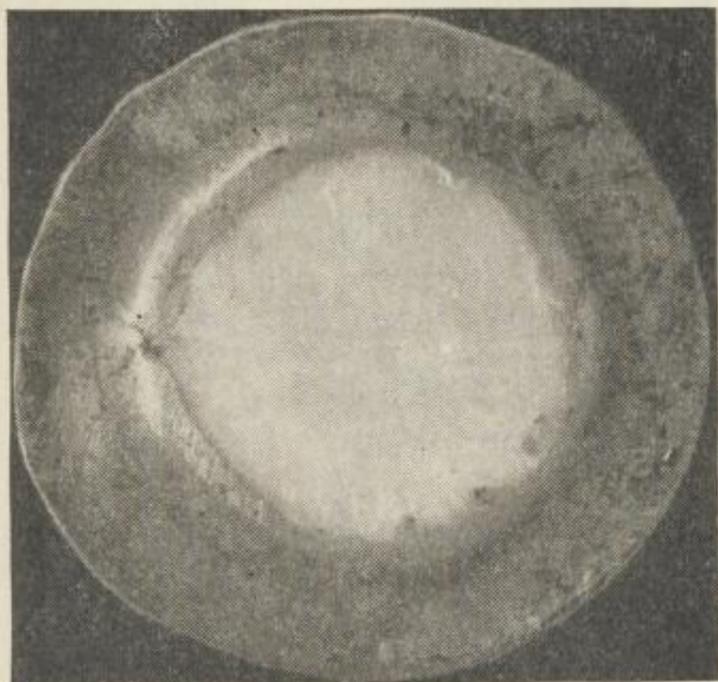


Bild 50

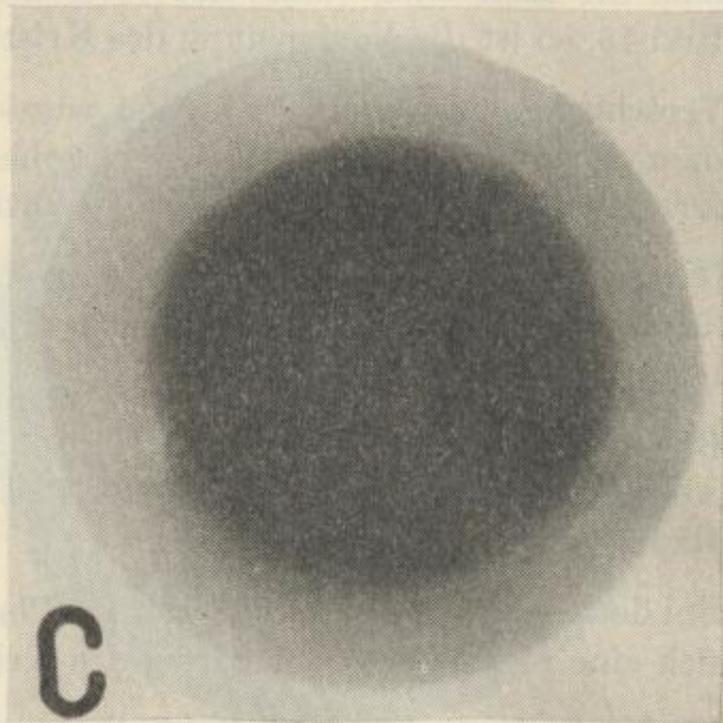


Bild 51

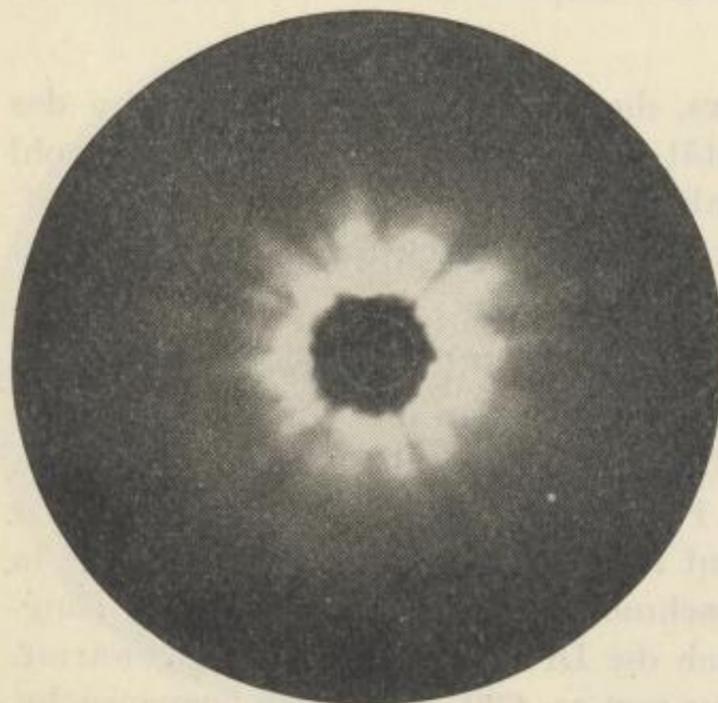


Bild 52 a

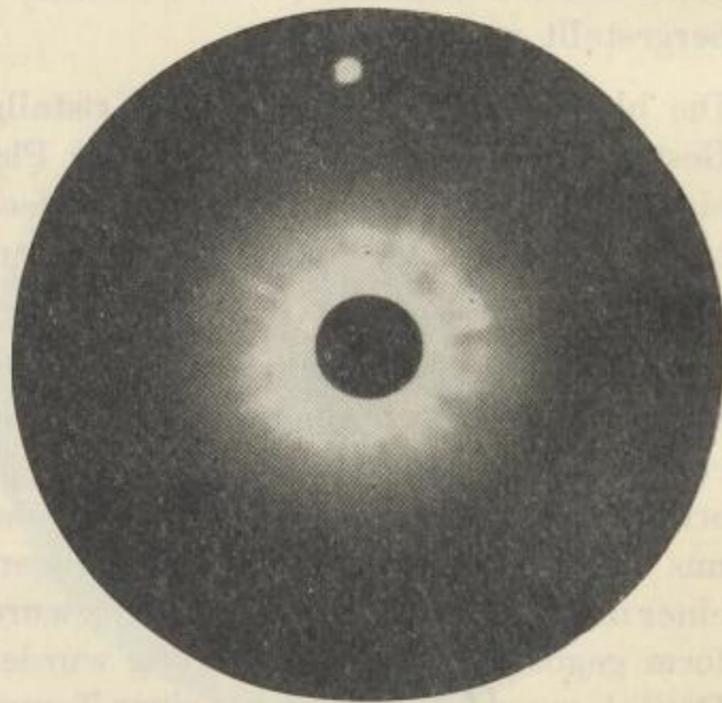


Bild 52 b

Die Arbeitsbedingungen bei der Herstellung der Bilder waren: Bild 52a: Strahlung $Wk_{\alpha\beta}$; $f = 40$ mm; 40 kV, 30 mA; Expositionszeit 120 Minuten; Bild 52b: Strahlung $Wk_{\alpha\beta}$; $f = 70$ mm; 40 kV, 30 mA; Expositionszeit 150 Minuten.

Aus dem durchgeführten Versuch geht hervor, daß die bleibende Verformung des Kristallgitters bei der Rekristallisation aus dem Zustand teilweiser Plastizität in den

Fällen, wo sich beim Rekristallisationsprozeß hohe Temperaturen geltend machen, größer und markanter ist als in Fällen, wo sich der Temperatureinfluß nicht bemerkbar macht.

Wie schon erwähnt, hat die Rekristallisation des Gesteins aus dem Zustand teilweiser Plastizität eine bestimmte Änderung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften zur Folge, die sich in der Verfestigung des Gesteins äußert. Die stärkste Verfestigung des Gesteins nach der Rekristallisation aus dem Zustand teilweiser Plastizität können wir in der Richtung voraussetzen, die der Richtung der größten Beanspruchung entspricht, der das Gestein bei einer allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung im Moment der Erneuerung des Kristallgitters ausgesetzt war. Die schwächste Verfestigung ist dagegen in der Richtung festzustellen, in der die allseitige ungleichmäßige Druckbeanspruchung den kleinsten Wert hatte.

Die Verfestigung des Gesteins durch Rekristallisierung aus dem Zustand teilweiser Plastizität ist deswegen von Bedeutung, weil das aus dem Zustand teilweiser Plastizität rekristallisierte Gestein wieder in den Zustand teilweiser Plastizität überführt werden kann, jedoch nur durch eine größere allseitige gleichmäßige Druckbeanspruchung, die der entspricht, die zur Erreichung des vorhergehenden plastischen Zustandes nötig war.

Daß durch die Rekristallisierung des Gesteins aus dem Zustand teilweiser Plastizität das Kristallgitter bleibend verformt und so eine Änderung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften und eine Verfestigung des Gesteins verursacht wird, können wir mit einer geeigneten Versuchseinrichtung bei allen Gesteinen nachweisen. Am besten kann diese mit Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) demonstriert werden.

Die durch Rekristallisierung aus dem Zustand teilweiser Plastizität verursachte Änderung des Gipses ist sehr markant. Bei einem hohen Grad teilweiser Plastizität wird aus dem Kristallgitter des Gipses das Wasser völlig verdrängt, so daß sich der Gips nach Entlastung und anschließender Rekristallisierung in Anhydrit (CaSO_4) verwandelt. Auf Bild 53a ist der Gips vor der Prüfung, auf Bild 53b der aus dem Gips durch Rekristallisierung aus dem Zustand teilweiser Plastizität gewonnene Anhydrit dargestellt.

Weiterhin wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen gleichzeitig verschiedene Gesteine in den Zustand teilweiser Plastizität überführt wurden. Das Ergebnis des Versuches ist auf Bild 54 zu sehen. Dieser Versuch wurde mit zwei Gesteinen durchgeführt, und zwar so, daß in das Kreisloch einer Anhydritscheibe (die Scheibe wurde durch Rekristallisierung aus Gips gewonnen, und aus ihrer Mitte wurde ein Kreisloch ausgeschnitten) körniges Steinsalz (NaCl) eingebracht wurde. Durch einen allseitigen ungleichmäßigen Druck (bei einer senkrechten Belastung von 3500 kp/cm^2) wurden beide Gesteine in den Zustand teilweiser Plastizität überführt. Nach Entlastung der Probe wurde festgestellt, daß das Steinsalz — da es einen etwas höheren Plastizitätsgrad erreicht und deshalb auch einen etwas größeren Widerstand gegen Zusammendrücken besessen hatte als die umgebende Anhydritschicht — den umgebenden Anhydrit zerdrückt hat (Bild 54).

Da bei teilweiser Plastizität Steinsalz und Anhydrit keinen sehr großen Unterschied im Plastizitätsgrad aufweisen, so besteht zwischen den beiden Gesteinen nach Rekristallisation keine markante Grenze, sondern beide Gesteine schmelzen zusammen. Eindeutig beweist dies das Makro-Röntgenbild (Bild 55).

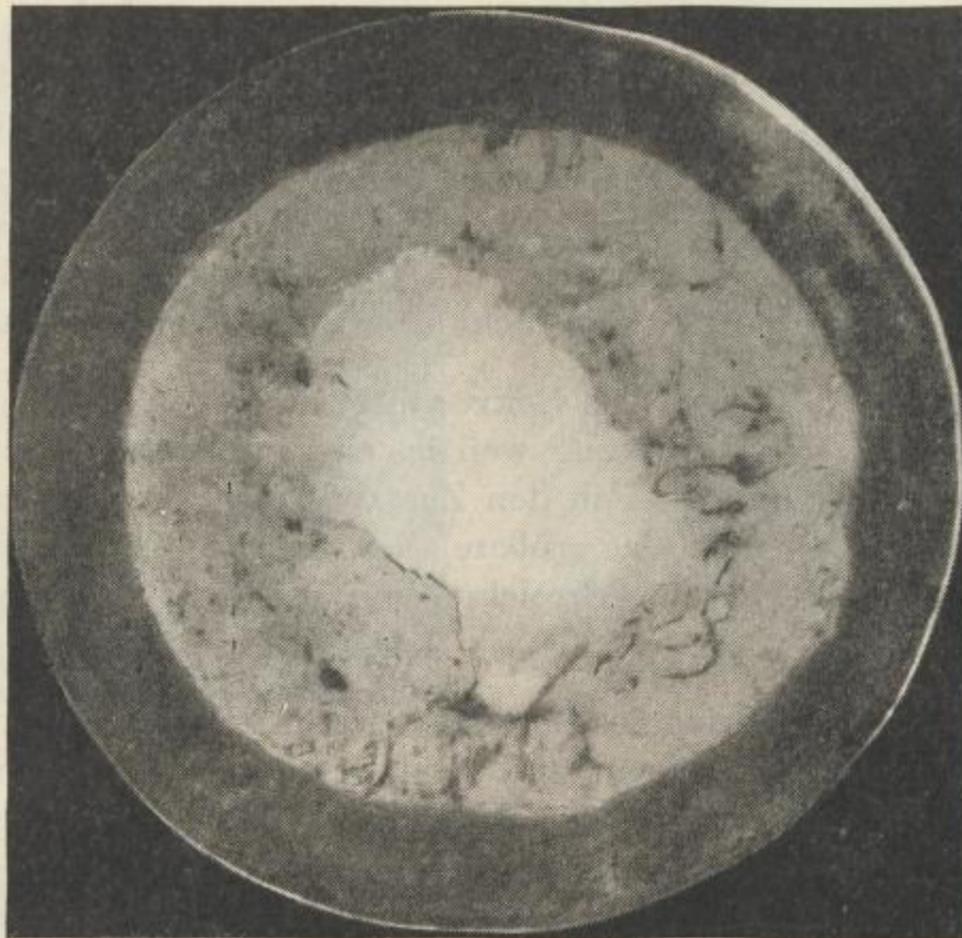


Bild 54

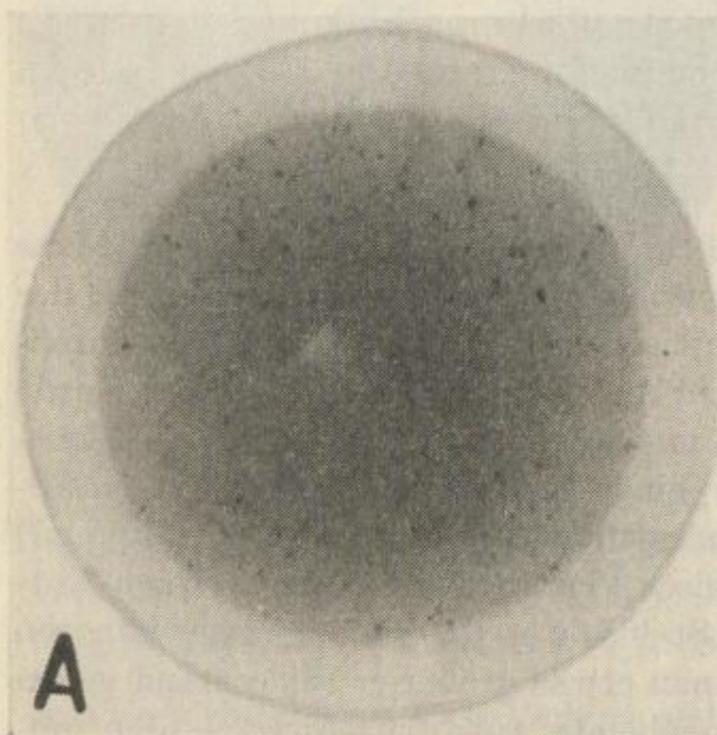


Bild 55

Durch zahlreiche andere Versuche wurde bestätigt, daß bei einem kleinen Unterschied des Plastizitätsgrades (im Falle teilweiser Plastizität) sich verschiedene Gesteine verbinden können. Diese Erscheinung kann so definiert werden:

Bei einem gleichen oder wenig unterschiedlichen Plastizitätsgrad zweier verschiedener Gesteine werden die Gesteine an den Berührungsflächen durch Verschmelzung dicht verbunden, wobei kein markanter Übergang mehr festgestellt werden kann. Es handelt sich um eine Dauerverbindung, die um so vollkommener ist, je kleiner der Unter-

schied zwischen den Plastizitätsgraden der Gesteine im teilweise plastischen Zustand gewesen war.

Die angeführten Feststellungen über die teilweise Plastizität der Gesteine führten zu prinzipiellen Untersuchungen der Entstehung einiger tektonischer Erscheinungen im Labormaßstab unter Nachahmung natürlicher Verhältnisse. Ohne Übertreibung kann gesagt werden, daß die Auswertung der Ergebnisse über die teilweise Plastizität ein neues Gebiet der Laborforschung eröffnet, die wir als experimentelle Tektonik bezeichnen können.

Für die wissenschaftlichen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der experimentellen Tektonik, die eine direkte Bestimmung der natürlichen Gesetze und Begründung tektonischer Prozesse ermöglichen würde, werden nicht nur spezielle Geräte und Apparate benötigt, sondern vor allem werden die Erkenntnisse über die Gesteinszerstörung und die Gebirgsmechanik vertieft werden müssen.

Bis heute konnten nur verhältnismäßig einfache Fälle im Labor nachgeahmt werden. So konnten z. B. keine Versuche mit sehr harten natürlichen Gesteinen durchgeführt werden, denn die unzureichende Ausstattung des Laboratoriums ermöglichte nicht, so hohe Drücke zu erreichen, bei denen auch die sehr harten Gesteine in den Zustand teilweiser Plastizität überführt werden konnten. Aus demselben Grunde konnten Versuche nur auf verhältnismäßig kleinen Modellen durchgeführt werden, die aber kein detailliertes Studium ermöglichen. Im ersten Stadium der Forschungsarbeiten war es auch nicht möglich — ebenfalls wegen unzureichender Ausstattung des Laboratoriums — in die Untersuchungen äußere energetische Einflüsse, wie z. B. den Einfluß der Wärme, der Strahlungsenergie usw., einzubeziehen.

Deshalb wurde das Prinzip der Ersatzbeanspruchung angewandt. Die allseitige ungleichmäßige Druckbeanspruchung wurde auf die Gesteinsschicht mittels eines Bleiblocks, in den die Schichten eingepreßt wurden, ausgeübt (Bild 56). Die einzelnen Gesteinsschichten wurden vor dem Einsatz in den Bleiblock in Ringformen aus Duralumin gepreßt. Der Bleiblock mit den Gesteinsschichten wurde dann in ein zylinderförmiges Loch einer kompakten Stahlunterlegplatte gelegt, dessen Mantel ein horizontales Zerdrücken des Bleiblockes bei Beanspruchung verhindert. Die Beanspruchung des Bleiblockes mit den eingepreßten Schichten wurde mit einem mächtigen zylinderförmigen

Stahlkopf erzeugt, der genau auf die zylindrische Hohlform des Bleiblockes paßt. In der Mitte des Stahlkopfes befindet sich eine senkrechte Bohrung in Form eines umgekehrten Trichters. Während des Versuches wurde auch die Bohrung in der Mitte des Trichters mit Blei oder einer Blei-Zink-Legierung verschlossen. Oben am Stahlkopf befindliche Kanäle, — deren Profil je nach Bedarf verkleinert oder

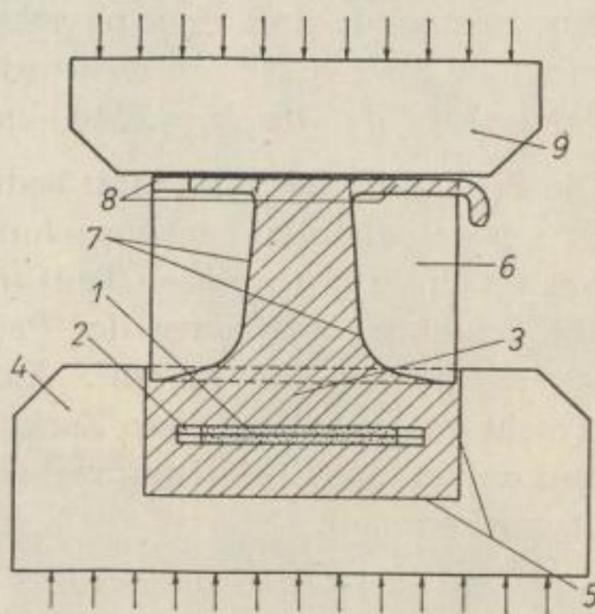


Bild 56

vergrößert werden kann — verbinden die Außenseite des Stahlkopfes mit der trichterförmigen Vertiefung. Die Kanäle dienen zum Abfluß des überschüssigen Bleis aus der trichterförmigen Vertiefung im Stahlkopf. Da das Durchflußprofil der Kanäle zu verstellen ist, konnte der Abfluß des Bleis und so auch die Intensität der Beanspruchung in der Druckapparatur reguliert werden. Der Kopf ist weiter oben mit einer stählernen Deckplatte versehen. Der derart zusammengestellte Apparat wurde unter einer hydraulischen Presse geprüft.

Die in Bild 56 dargestellte Vorrichtung diente zur Nachahmung von Salzdiapiren. Die Höhe und Form der trichterförmigen Bohrung (7) im Stahlkopf (6) sowie der Durchmesser der Kanäle (8) wurden so bemessen, daß der Druck im Bleiblock genügend groß war, um den gewünschten Grad teilweiser Plastizität der Gesteinschichten (1) zu erzeugen. Die Richtung des kleinsten Widerstandes wird durch die Achse der trichterförmigen Bohrung (7) bestimmt, seine Größe ist von der Größe der Kanaldurchmesser im oberen Teil des Stahlkopfes (6) abhängig.

Diapirformationen sind für manche Steinsalzlagerstätten charakteristisch. Deshalb wurden die ersten Forschungsarbeiten mit Steinsalzschiechten durchgeführt. Auf Bild 56a ist der Querschnitt eines aus fünf ursprünglich geraden Steinsalzschiechten bestehenden Modells zu sehen.

Da bei der Prüfung nur eine einfache Apparatur verwendet wurde, konnten die Spannungen nicht in verschiedenen Richtungen festgestellt werden. Es konnte nur die senkrechte, durch die Presse hervorgerufene Belastung bestimmt werden. Eine genaue Forschung wird erst mit Hilfe eines triaxialen Apparates mit einem großen Druckbereich, z. B. für 10000, 20000 und mehr Atmosphären, möglich sein. Um eine Verbindung der Steinsalzschiechten zu verhindern, wurden die einzelnen Schichten voneinander mit einer physikalischen Lehmschicht abgetrennt. Eine Formänderung der Steinsalzschiechten wurde im Zustand teilweiser Plastizität erreicht, wobei der senkrechte Druck ca. 2400 kp/cm² betrug.

Die durch teilweise Plastizität bedingten Formänderungen sind noch besser auf Bild 57 zu sehen; es stellt den Querschnitt durch ein Diapirmodell dar, das aus zwei Steinsalzschiechten (im unteren Teil) und einer Anhydritschicht (im oberen Teil) besteht. Die Schichten waren vor der Prüfung gerade und gleich dick. Die senkrechte Belastung betrug 3250 kp/cm². Auf Bild 57 ist die Zerklüftung der oberen Steinsalzschiecht gut sichtbar; diese Zerklüftung wurde durch eine verhältnismäßig schnelle und ungünstige Entlastung verursacht. Es entstanden Schollen, die auch in der Natur oft vorkommen.

Auf Bild 58 ist der Querschnitt eines extrem entwickelten Diapirs, der aus drei Schichten besteht (von unten nach oben: Steinsalz, Sylvinit und Anhydrit) zu sehen. Die Verformung der ursprünglich geraden Schichten verlief im Zustand teilweiser Plastizität, wobei der senkrechte Druck ca. 3400 kp/cm² betrug.

Eine sehr gute Nachahmung eines Diapirs, eines Salzstockes, so wie wir ihn in der Natur finden, ist auf dem Modell gelungen, dessen linke Hälfte auf Bild 59 und dessen rechte Hälfte auf Bild 60 gezeigt wird. Von unten nach oben liegen die Schichten folgendermaßen: 1. Steinsalz; 2. Anhydrit; 3. Steinsalz; 4. Sylvinit.

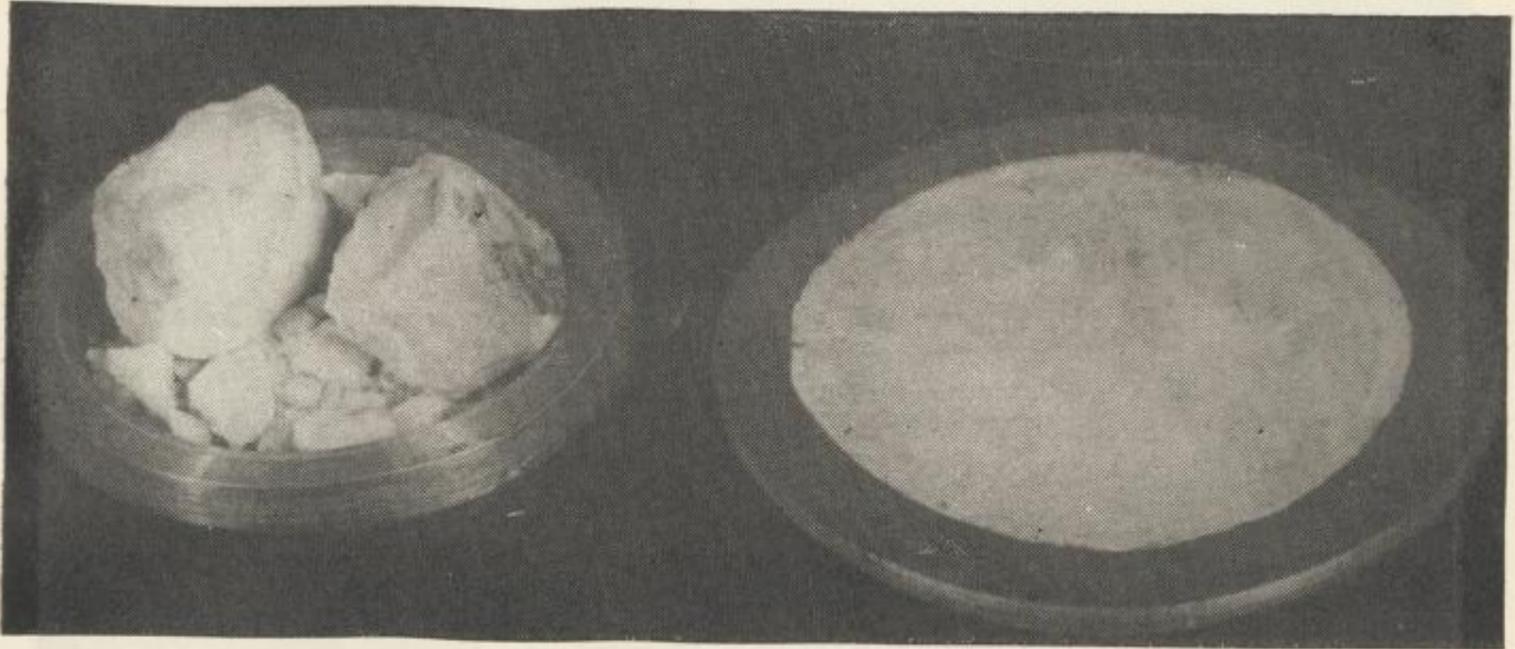


Bild 53

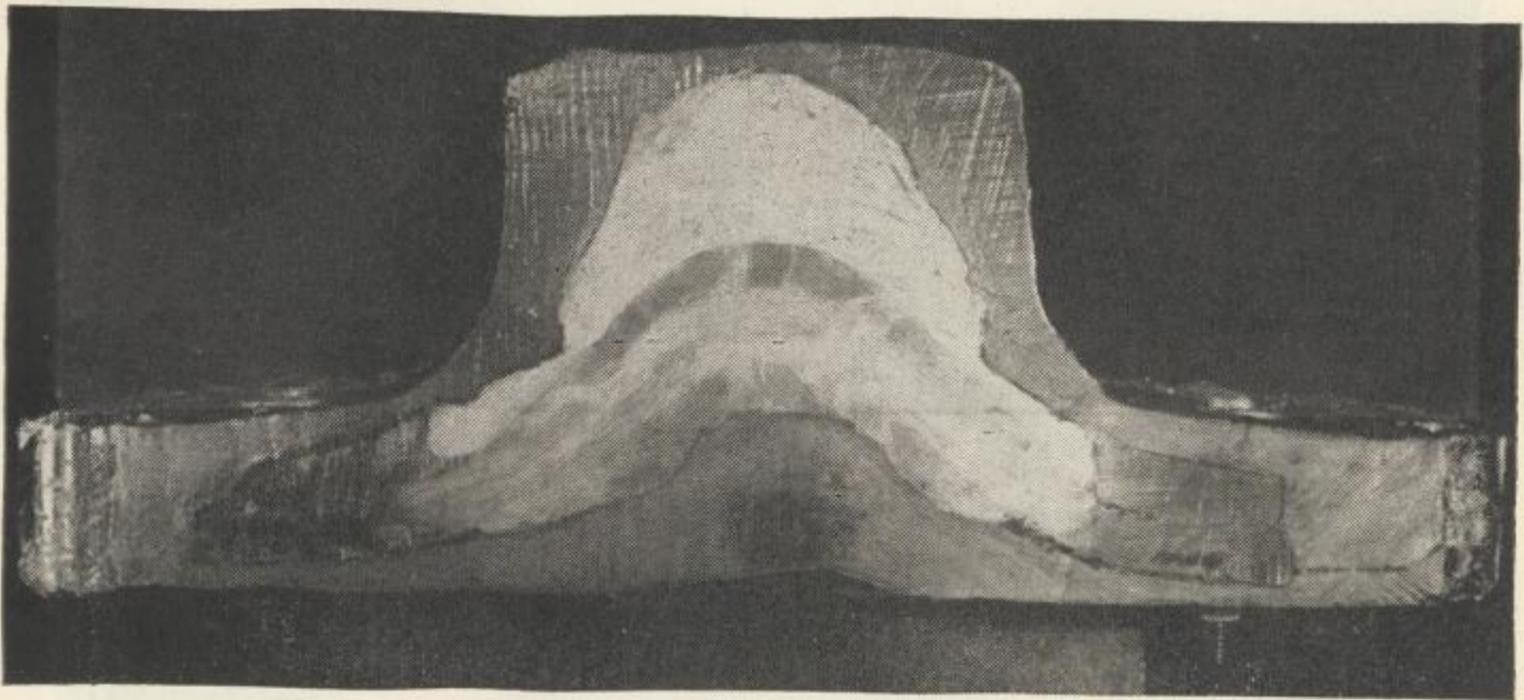


Bild 57

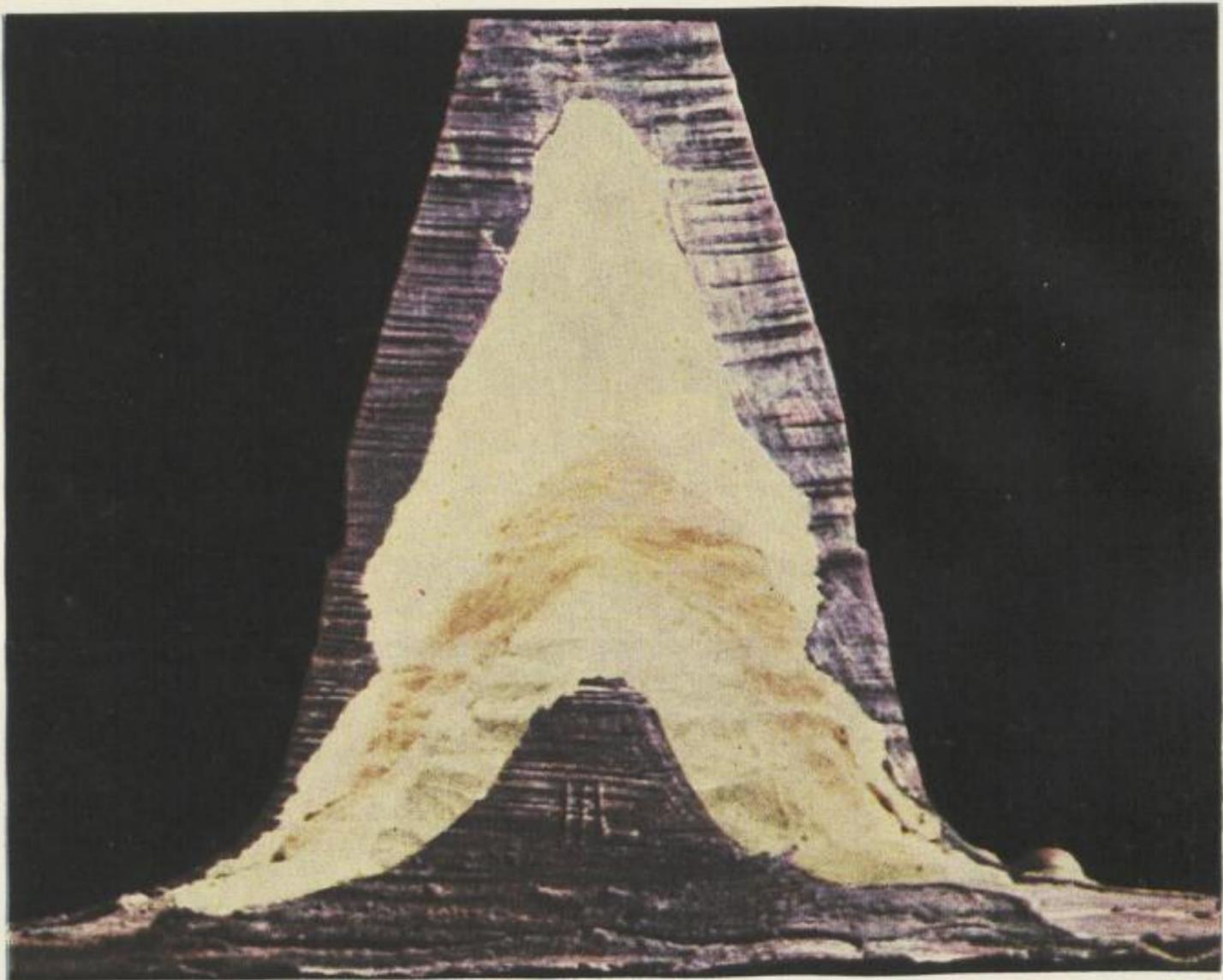


Bild 58

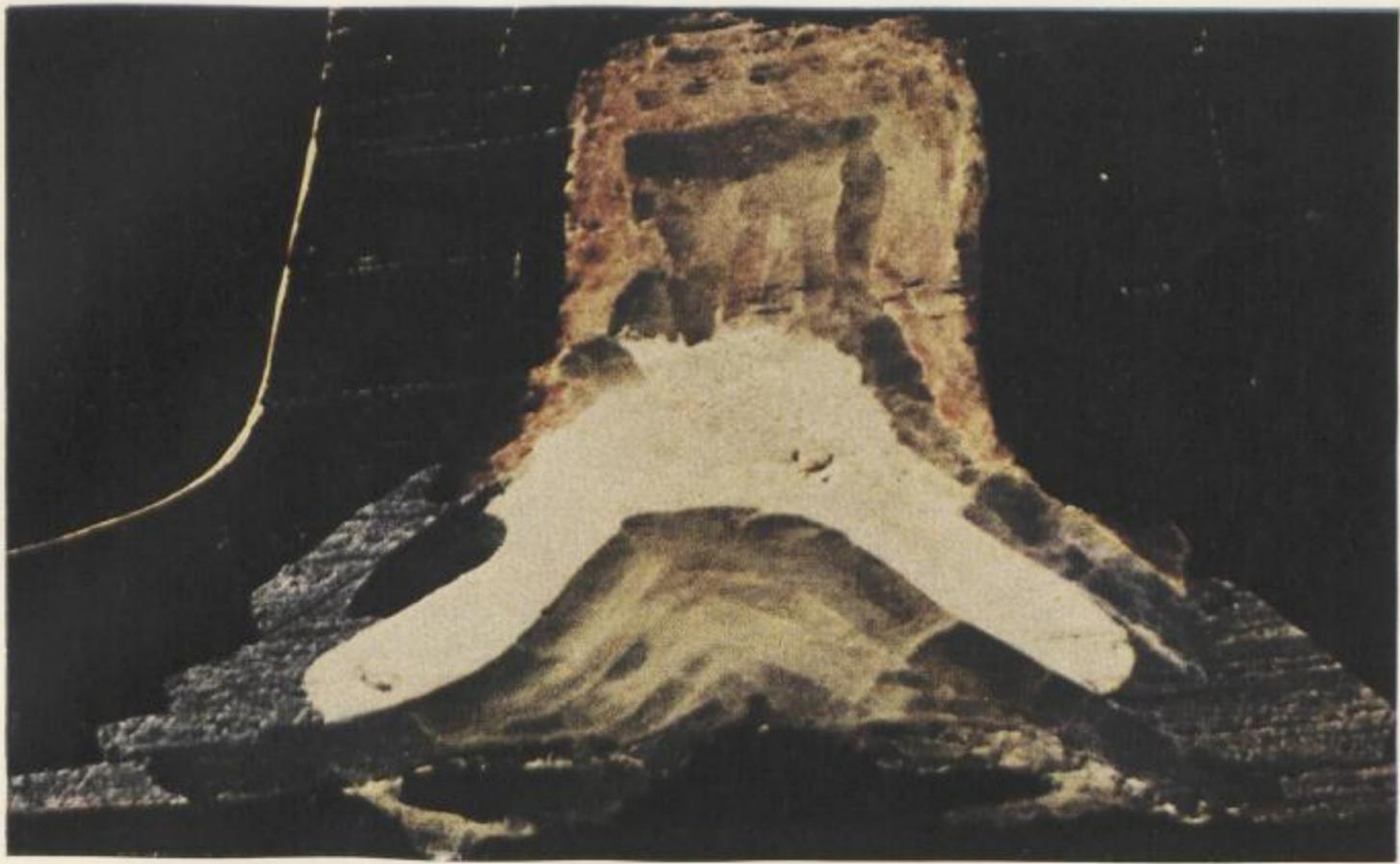


Bild 59

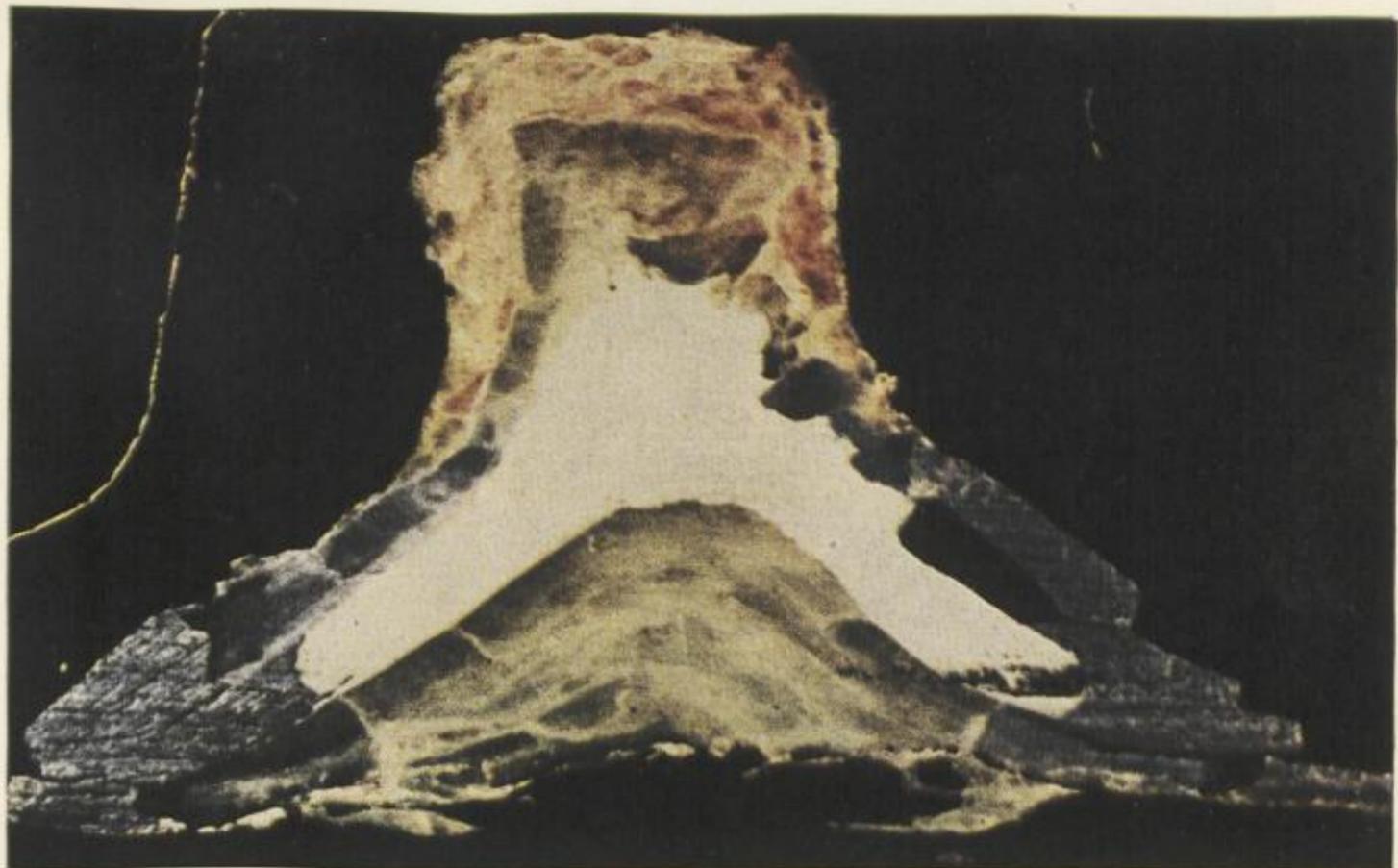


Bild 60

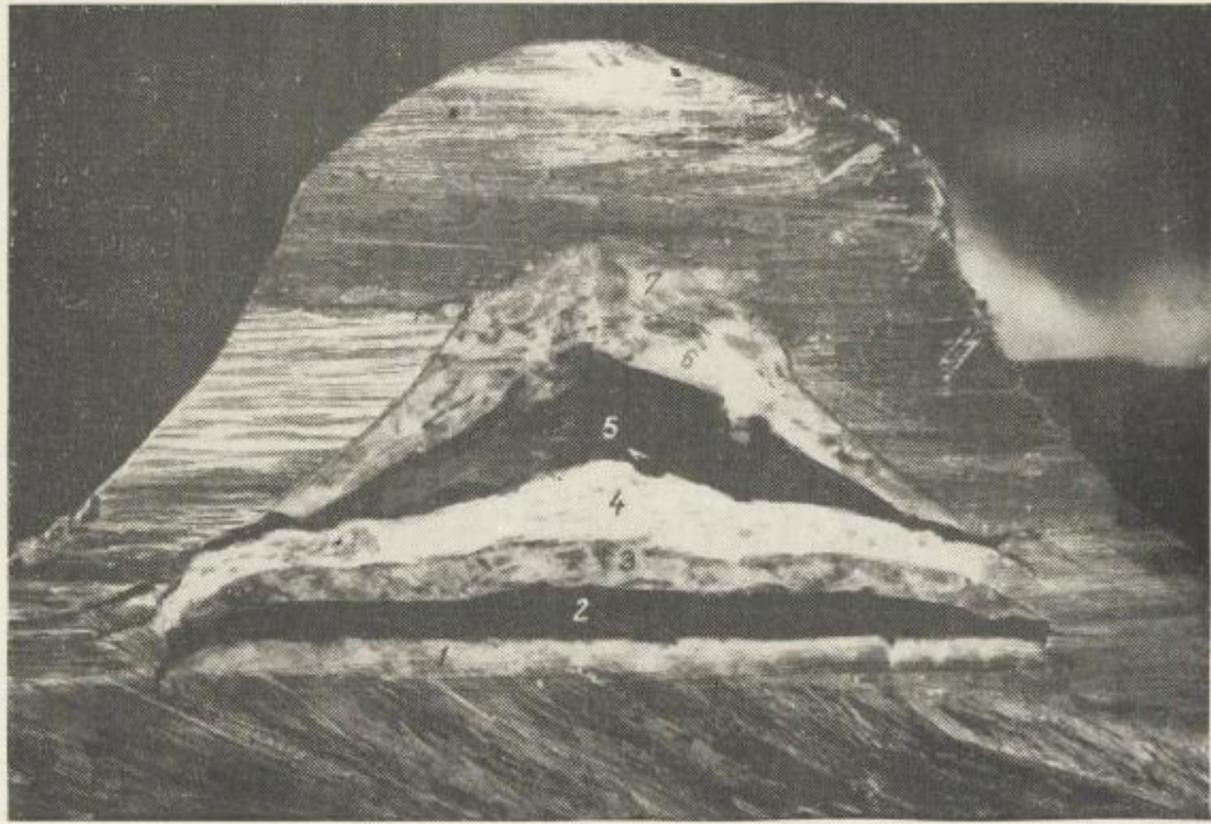


Bild 61

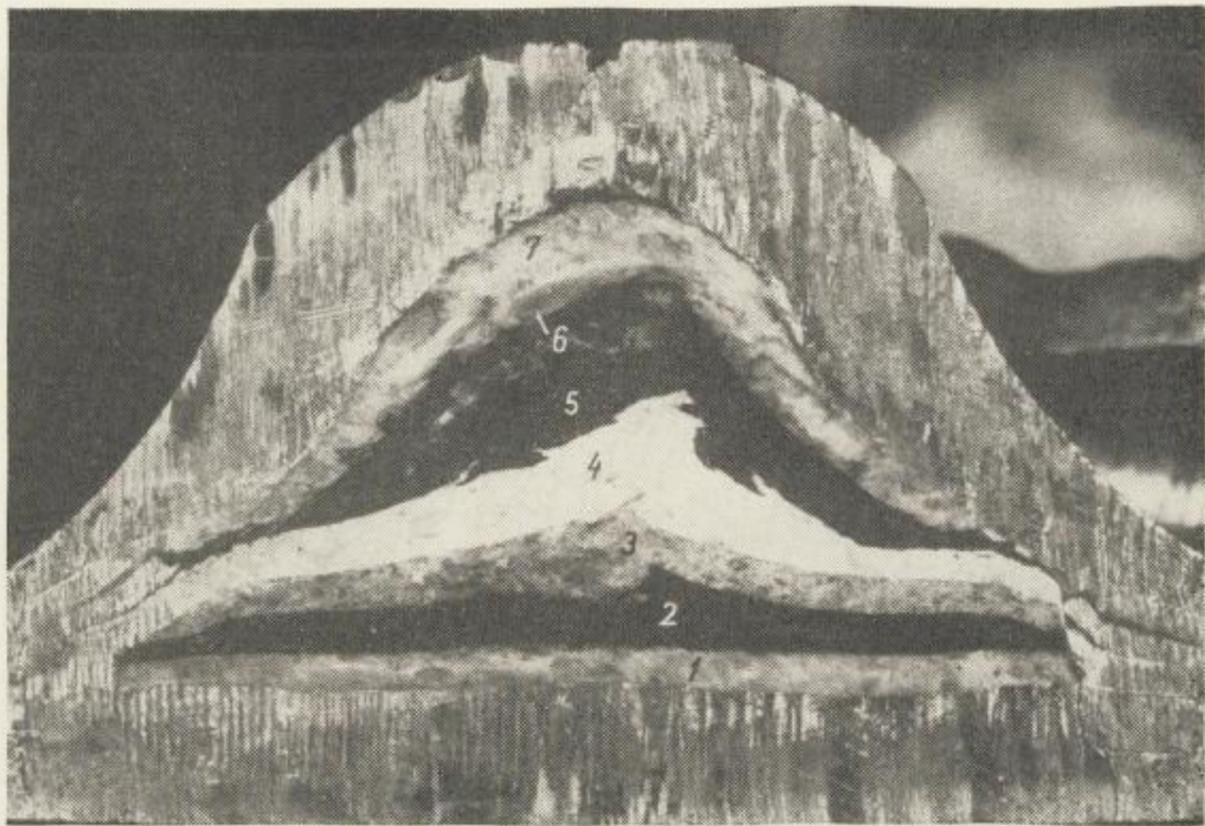


Bild 62

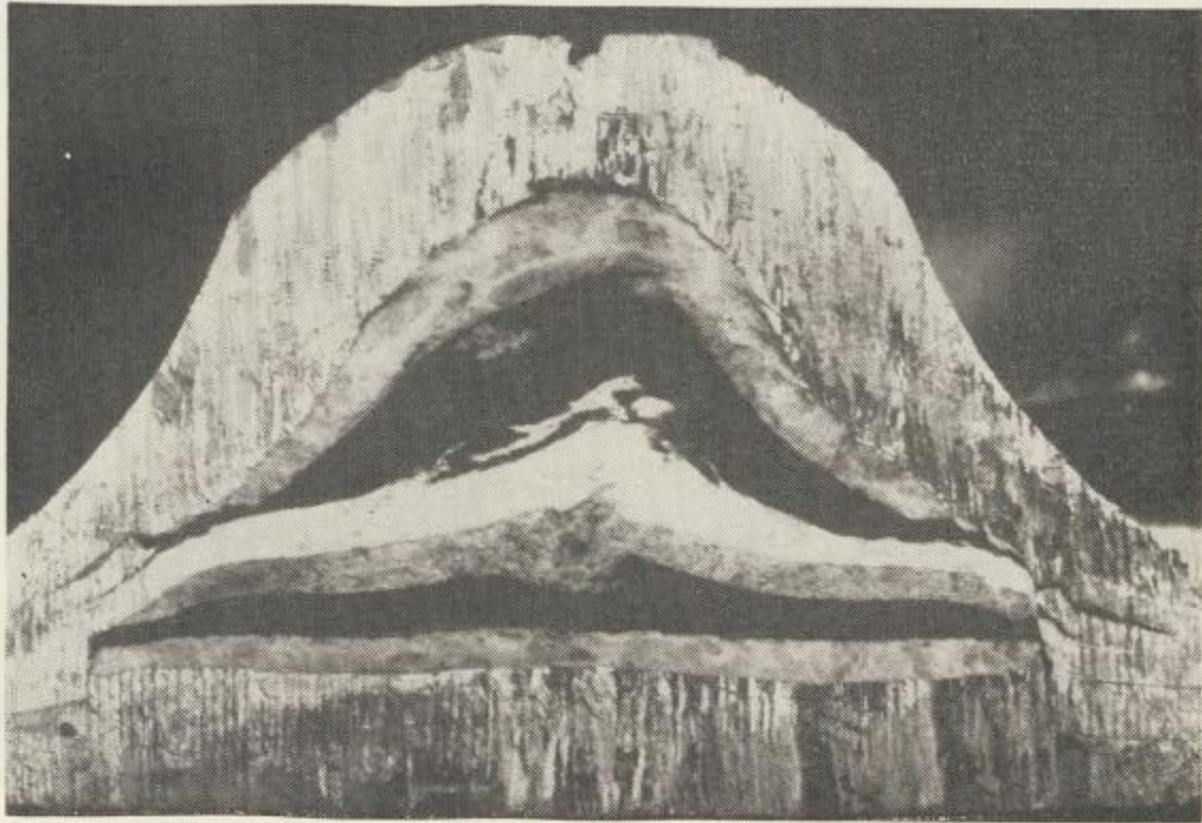


Bild 63

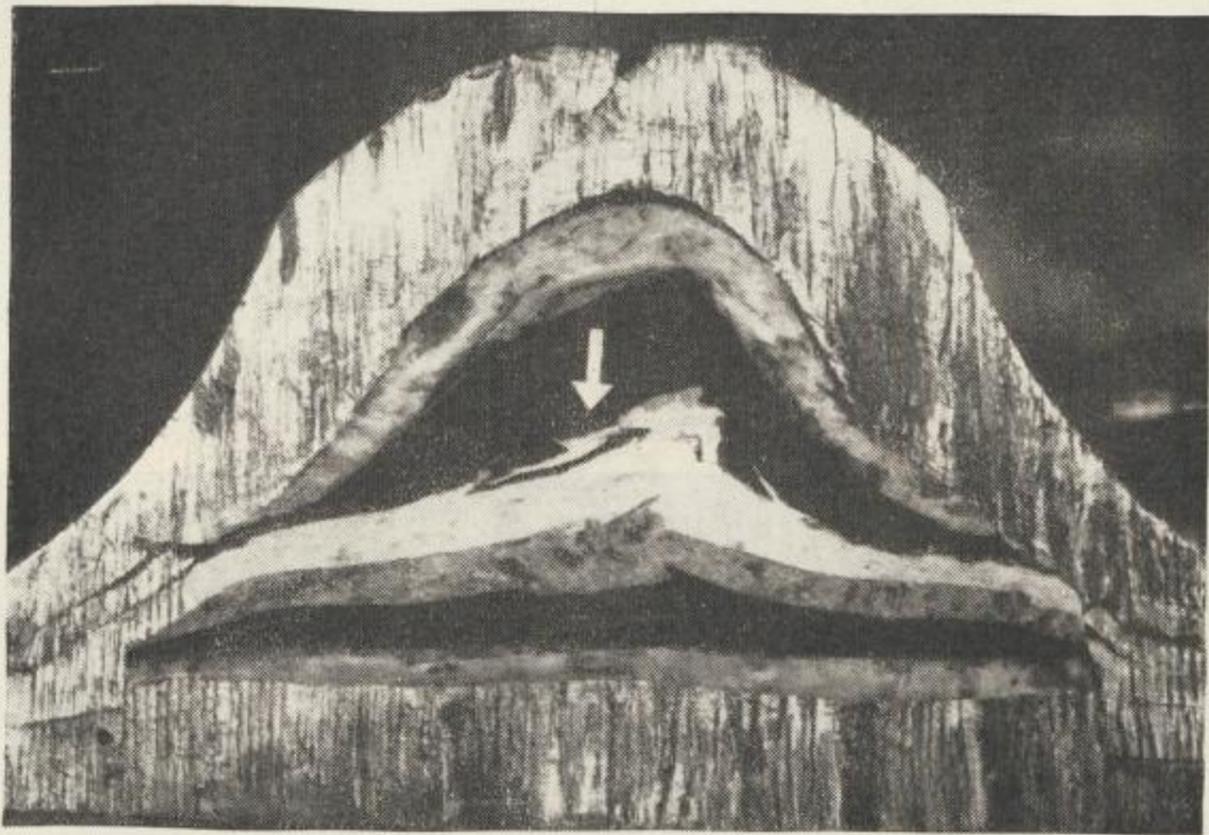


Bild 64

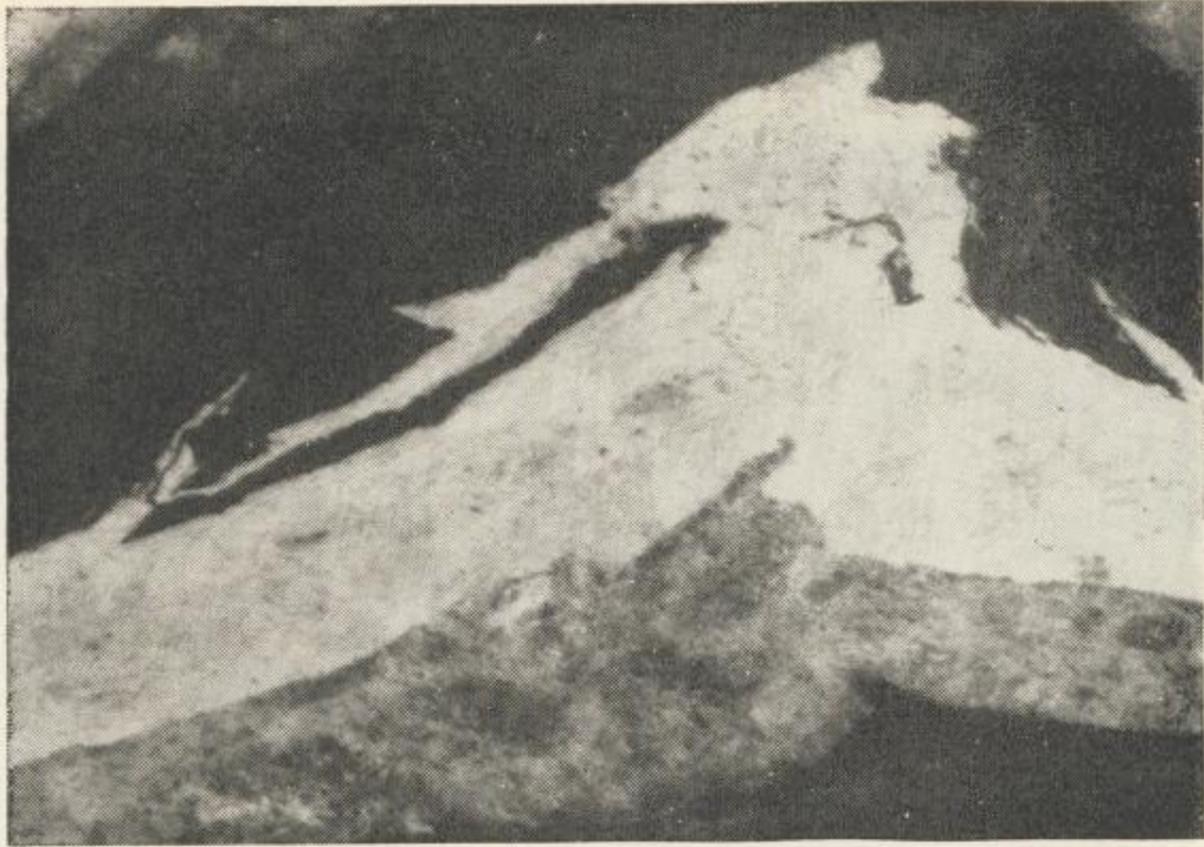


Bild 65

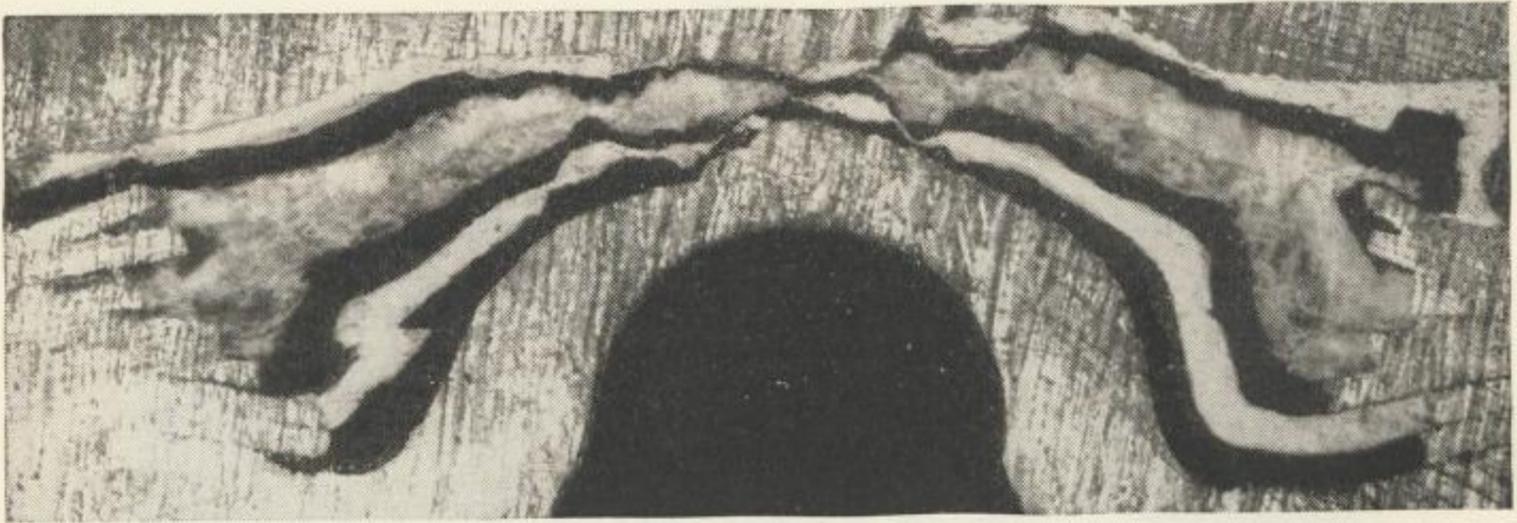


Bild 66 a

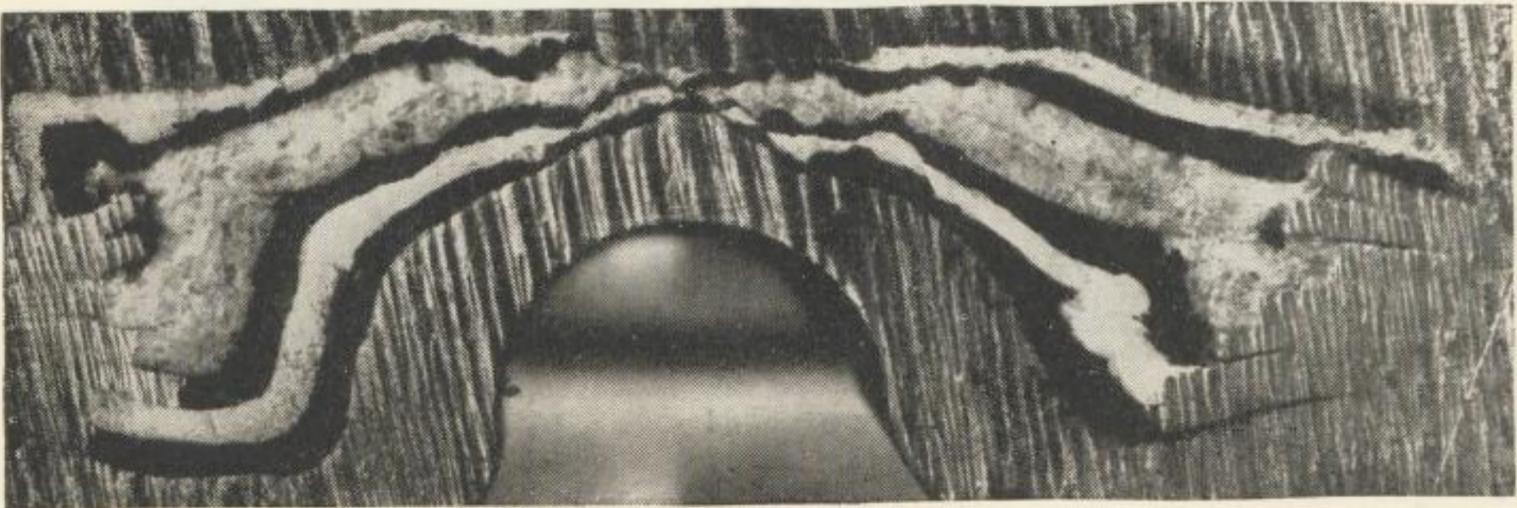


Bild 66 b

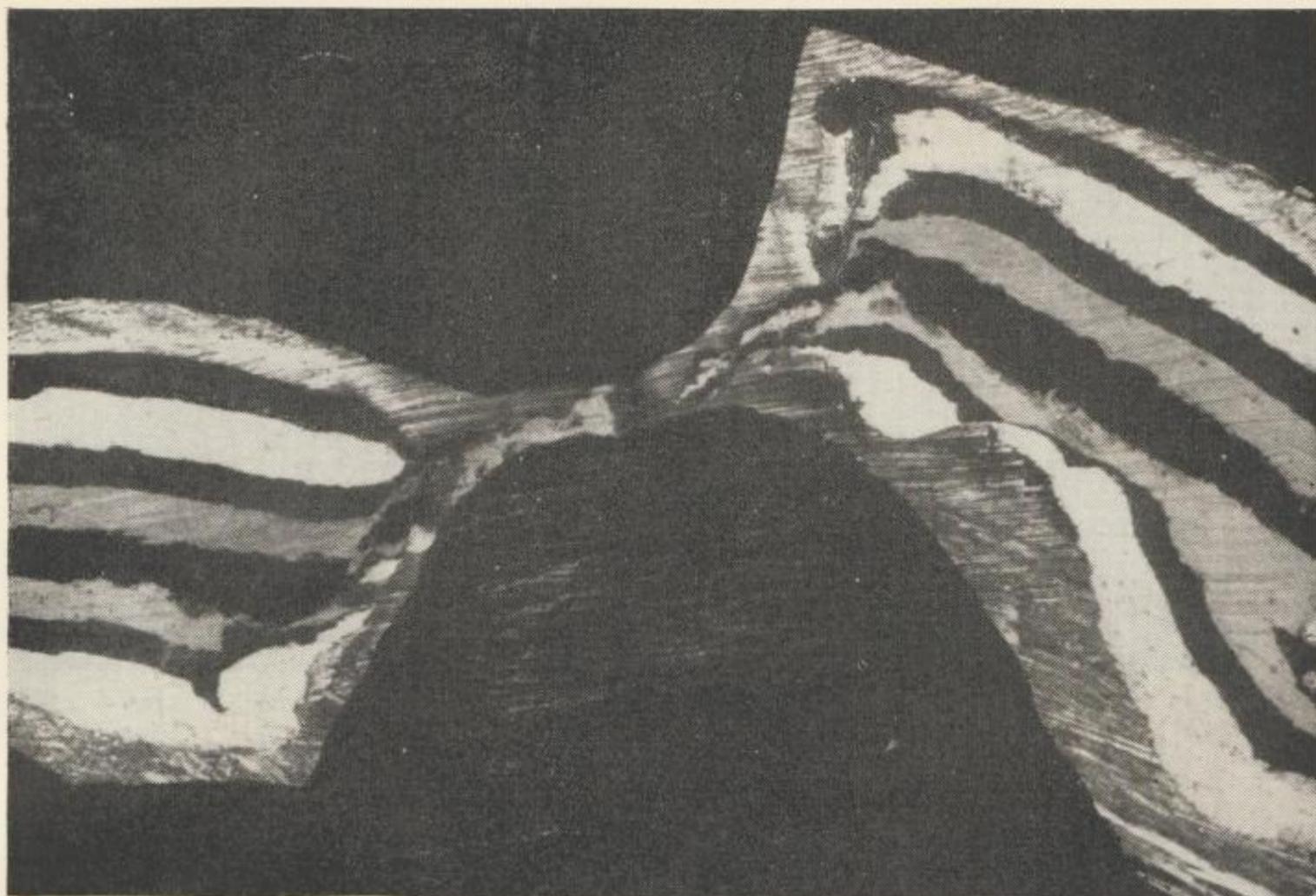


Bild
67 a

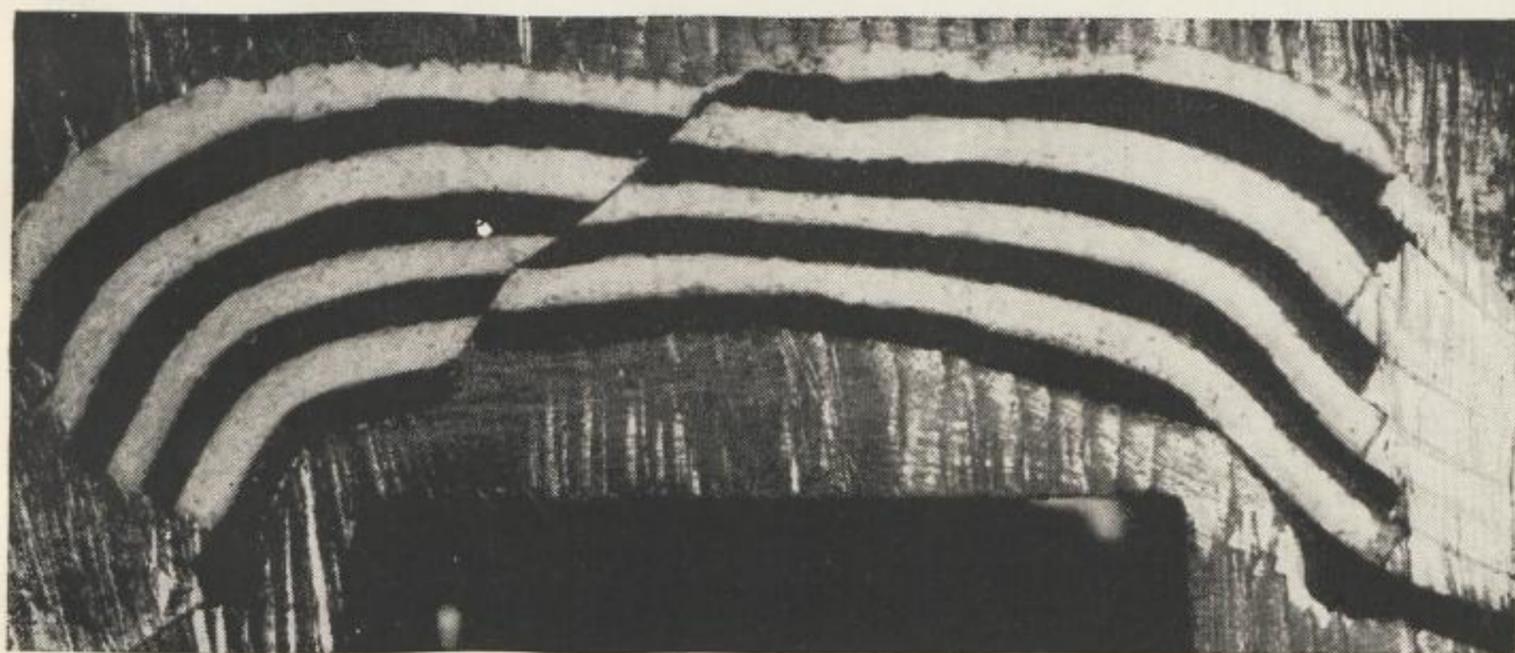


Bild
67 b



Bild
67 c

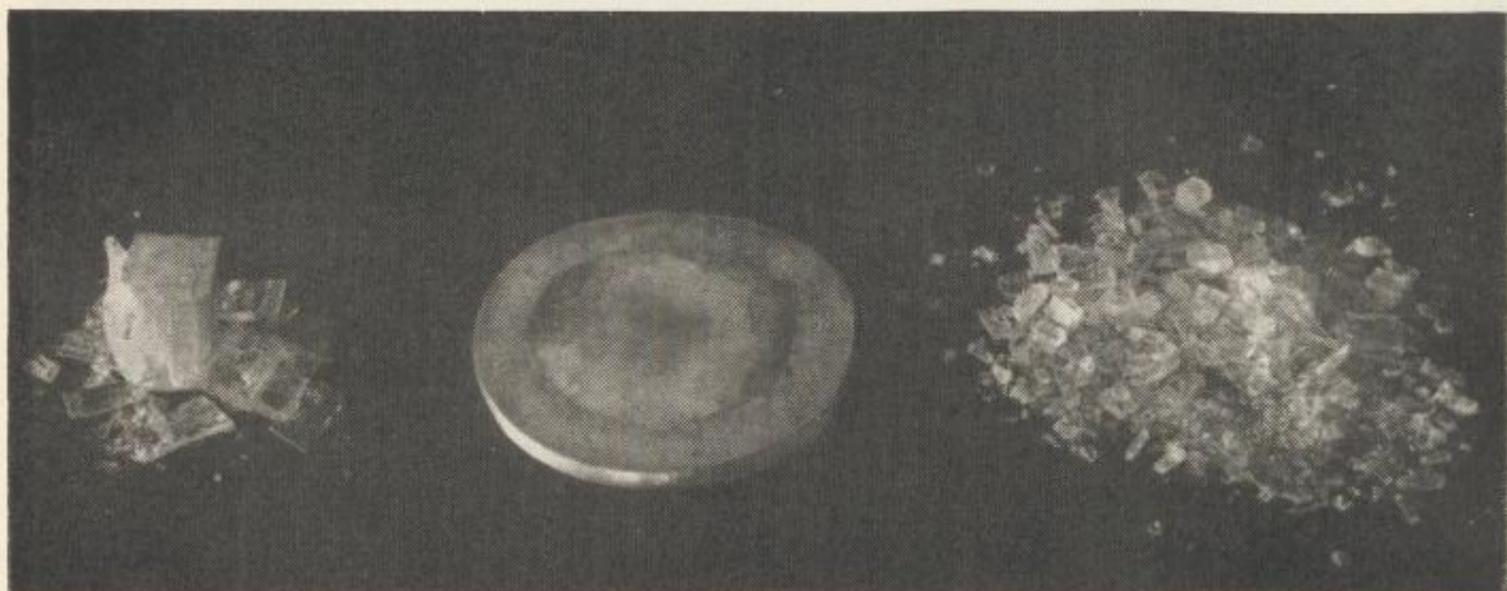


Bild 68

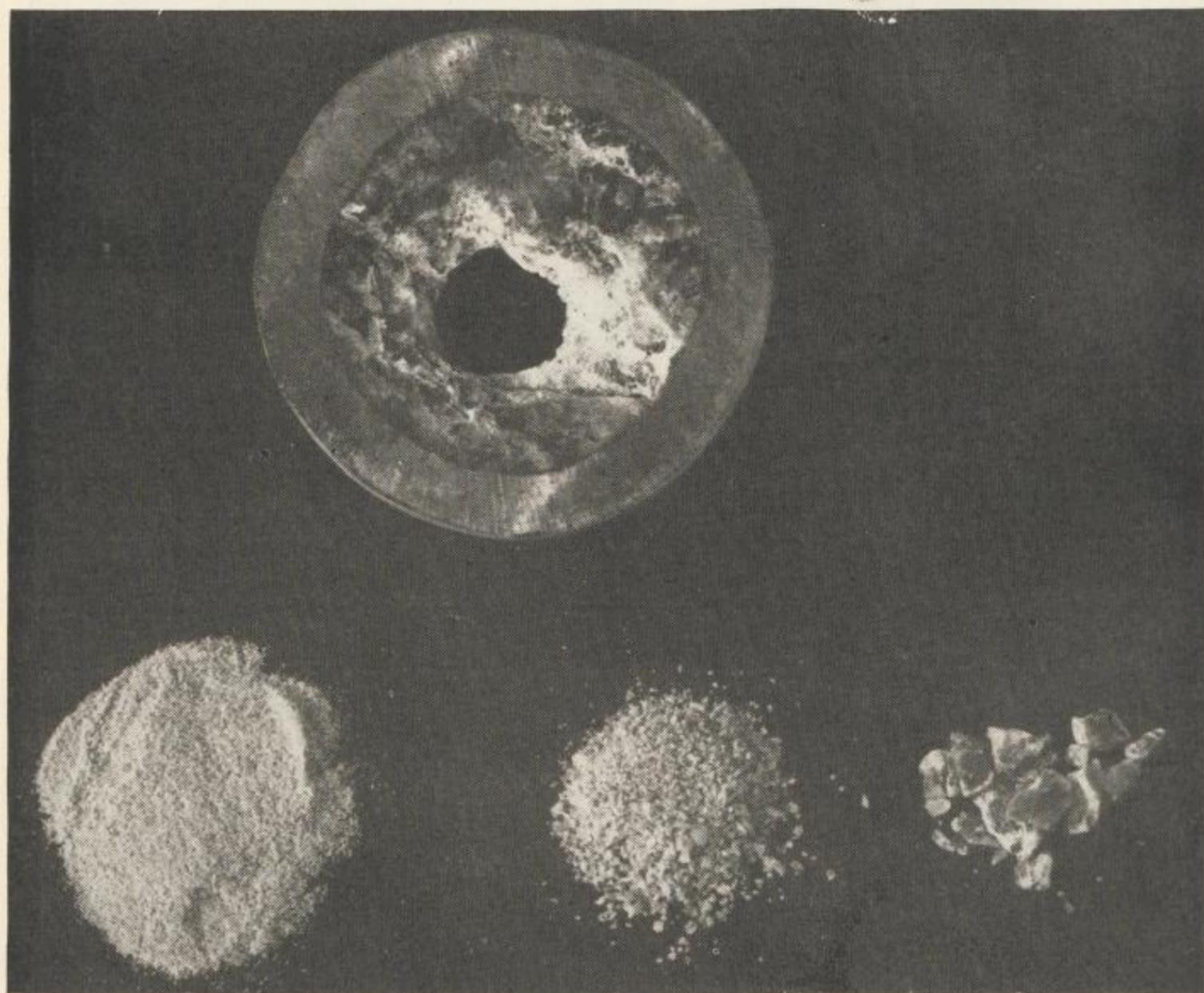


Bild 69

Die Gesteinsschichten dieses Modells wurden zweimal in den Zustand teilweiser Plastizität überführt, zuerst durch einen maximalen Druck von 2500 kp/cm^2 und dann — nach absoluter Entlastung — erneut durch einen senkrechten Druck von 3100 kp/cm^2 , wobei die Belastungsgeschwindigkeit größer war als in der ersten Phase der Belastung. Infolge der schnellen Belastungssteigerung wurde die obere Salzschicht an einigen Stellen an den Abhängen des entstandenen Diapirs zerrissen, wodurch charakteristische Brekzien entstanden sind, die besonders gut auf Bild 60 zu sehen sind. Da das Modell in der zweiten Belastungsphase eine bestimmte Zeit unter Wirkung eines maximalen allseitigen ungleichmäßigen Druckes lag, wurden die Gesteinsschichten nach wiederholter Überführung in den Zustand teilweiser Plastizität in eine kompakte Formation zusammengeschmolzen. Es sei hier bemerkt, daß die Charakteristik der Modelle nach Bild 59 und 60 prinzipiell in der Natur auftretenden Erscheinungen entspricht, z. B. den deutschen Salzstöcken.

Die Bilder 61 bis 64 zeigen einzelne Querschnitte eines Modells, das aus sieben, ursprünglich geraden Gesteinsschichten zusammengesetzt wurde. Der Reihenfolge nach von unten nach oben sind es: 1 Steinsalzschiefer — 2 Schieferschicht — 3 Sylvinit — 4 Anhydritschicht — 5 Schieferschicht — 6 Steinsalzschiefer — 7 Sylvinit.

Der Versuch wurde folgendermaßen durchgeführt: Das Modell wurde zuerst durch einen allseitigen ungleichmäßigen Druck beansprucht und so in den Zustand teilweiser Plastizität überführt; der senkrechte Druck betrug in diesem Falle 2200 kp/cm^2 . Danach wurde das Modell völlig entlastet. Dann wurden an zwei gegenüberliegenden Seiten des Bleiblocks Bleibänder angelegt, und der so hergerichtete Bleiblock wurde wieder in den Stahlkopf gesetzt und das Modell nochmals beansprucht. Mit Hilfe der Bleibänder wurde ein überwiegend waagerechter Seitendruck auf das Modell hervorgerufen. Durch wiederholte Belastung unter der Presse wurde eine sehr ungleichmäßige Beanspruchung hervorgerufen, durch die in den Zustand teilweiser Plastizität (bei einem niedrigen Plastizitätsgrad) nur die sehr wenig festen Gesteine, d. h. das Steinsalz und der Schiefer, überführt werden konnten. Die Anhydritschicht konnte noch nicht in den Zustand teilweiser Plastizität überführt werden, so daß diese Schicht infolge des zweiseitigen Seitendruckes (der durch die angelegten Bleibänder hervorgerufen wurde) zerstört werden mußte. In die Klüfte und Risse wurde jedoch sogleich das andere plastische Gestein eingepreßt. Nachdem die Anhydritschicht durchbrochen war, wurde das Modell wieder entlastet, die verformten Bleibänder wurden beseitigt und die Oberfläche des Bleiblocks in die Muffenform des Stahlkopfes hineingearbeitet. Anschließend wurde das Modell nochmals durch allseitigen ungleichmäßigen Druck beansprucht, wobei der maximale senkrechte Druck 3150 kp/cm^2 betrug. Bei einem so hohen Druck drangen die umliegenden plastischen Gesteine mit noch größerer Stärke in die Anhydritschicht ein, da ihr Plastizitätsgrad bedeutend größer war als derjenige des Anhydrits. Die Querschnitte auf den Bildern 61 bis 64 wurden in einer der waagerechten Druckwirkung entsprechenden Richtung geführt. Da das Modell rund ist (im Grundriß), macht sich die maximale Wirkung des waagerechten Druckes in der Hälfte der Modellhöhe geltend. Der Schnitt durch die Mitte des Modells, d. h. der Schnitt mit der maximalen Wirkung des waagerechten Druckes,

ist auf Bild 61 dargestellt. Die kleinste Wirkung macht sich auf dem Querschnitt bemerkbar, der am weitesten von der Modellmitte geführt wurde (Bild 61).

Da sich die Folgen der Beanspruchung auf den einzelnen Schnitten vergrößern, und zwar so, daß auf Bild 61 die kleinsten und auf Bild 64 die größten Wirkungen festzustellen sind, können wir die Querschnittsabbildungen in der angegebenen Reihenfolge annähernd als Phasen der studierten Erscheinung ansehen.

Auf Bild 64a ist das Detail der durchbrochenen Stelle und der später erfolgten plastischen Verformung der Anhydritschicht zu erkennen. Die Digitations-Form (fingerförmiges Hineinspießen einer Schicht in eine andere Schicht), bedingt durch einen hohen Grad teilweiser Plastizität des Schiefers, ist im Detail auf Bild 64a sehr gut zu sehen. Da der Plastizitätsgrad des Schiefers viel größer war als der Plastizitätsgrad des Anhydrits, sind die Anhydrit-Digitationen sehr scharf. Die Digitations-Formen sind um so weicher (ovaler), je kleiner der Unterschied im Plastizitätsgrad (bei teilweiser Plastizität) der beiden beteiligten Gesteine ist und umgekehrt.

Durch geeignete Anordnung und Durchführung der Modelluntersuchungen können auch andere tektonische Erscheinungen nachgeahmt werden. So z. B. kann das Prinzip eines mehrmals einsetzenden Gebirgsdrucks, der zu einer Verformung der Gesteinsschichten führt, nachgeahmt werden, und zwar durch wiederholte Überführung mehrerer Gesteinsschichten in den Zustand teilweiser Plastizität. Dies kann eindeutig durch eine Modellprobe bewiesen werden (Bild 65a linke Hälfte und Bild 65b rechte Hälfte). Das Modell wurde aus sieben Schichten zusammengestellt (von unten nach oben: 1 Schiefer — 2 Anhydrit — 3 Schiefer — 4 Sylvinit — 5 Steinsalz — 6 Schiefer — 7 Anhydrit).

Die weiteren Bilder enthalten Querschnitte von Modellen, auf denen das Prinzip der Verwerfung von Gesteinsschichten dargestellt ist. Die linke Hälfte eines Modells ist auf Bild 66a, die rechte auf Bild 66b wiedergegeben.

Dieses Modell wurde in drei Etappen beansprucht. In der ersten Etappe, während der der Zustand teilweiser Plastizität erreicht wurde, wurden die Gesteinsschichten bogenartig verformt. Danach wurde das Modell entlastet. In der zweiten Etappe wurde das Modell von den Seiten her zusammengedrückt, wobei die Gesteinsschichten im elastischen Zustand abgeschert wurden. In der dritten Etappe wurde das Modell wieder einer allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung ausgesetzt, wodurch die Gesteinsschichten nochmals in den Zustand teilweiser Plastizität überführt wurden. Hierbei kam es zu einer starken Verschiebung der abgescherten Teile. Der bei der elastischen Abscherung unten befindliche Teil wurde nach oben verschoben und umgekehrt. Bemerkenswert ist noch, daß die Gesamtdicke der Schichten auf der einen Seite der Schubstörung größer ist als auf der anderen. Diese Mächtigkeitsänderung war durch den Zustand teilweiser Plastizität bedingt, in dem das Gestein erst nach der elastischen Abscherung der Schichtengruppe überführt wurde. Das Modell wurde aus wechselnd gruppierten Schiefer- und Anhydritschichten zusammengesetzt.

Es muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß die Abscherung der Schichtengruppe auf dem beschriebenen Modell nicht im plastischen, sondern im elastischen

Zustand der Gesteinsschichten erfolgte. In natürlichen Verhältnissen treten aber Fälle auf, wo die Abscherung der Gesteine in deren plastischem Zustand vonstatten ging. Das Prinzip eines solchen Falles ist auf Bild 67 dargestellt.

Das Modell, dessen Querschnitt in diesem Bild zu sehen ist, wurde aus acht ursprünglich geraden Schichten aus natürlichen Gesteinen zusammengesetzt (von unten nach oben: 1. Anhydrit — 2. Schiefer — 3. Ton — 4. Steinkohle — 5. Ton — 6. Schiefer — 7. Anhydrit — 8. Schiefer). Bei einer starken allseitigen ungleichmäßigen Druckbeanspruchung, durch die die natürlichen Gesteine des Modells in einen hohen Spannungszustand gebracht wurden, ließ man die größten Drücke schräg auf das Modell einwirken. Es kam zu einer Art Abscherung, die aber keine Abscherung im wahren Sinne ist, da die Gesteine im plastischen Zustand (hoher Plastizitätsgrad) waren. Dadurch wurden die Gesteine eigentlich plastisch verformt, wobei die Gesteinsschichten orientiert gestreckt und abgetrennt wurden. Die Charakteristik der im plastischen Zustand entstandenen Störung unterscheidet sich von derjenigen, die sich auf die Störung im elastischen Zustand der Gesteine bezieht. Das beweist ein Vergleich der Bilder 66 und 67.

Die bisherigen Ergebnisse der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der experimentellen Tektonik, durch die es erstmalig gelungen ist, in Laborverhältnissen die Prinzipien der Entstehung einiger tektonischer Erscheinungen nachzuahmen, sind zur Zeit noch bescheiden und zahlenmäßig klein und erschöpfen noch lange nicht die Möglichkeiten, die zur Lösung von Problemen der natürlichen Gesteinszerstörung uns im Bereich der experimentellen Tektonik an die Hand gegeben sind. Sie beweisen jedoch eindeutig, daß die Ausnutzung der experimentellen Tektonik durchaus zu realisieren ist und daß die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wertvolle Ergebnisse zur Vertiefung des menschlichen Wissens in vielen wissenschaftlichen und technischen Gebieten bringen können.

Gesteinszerstörung durch Zersplittern vom Standpunkt der potentiellen Spannungsenergie

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern unterscheidet sich auch in ihren Folgen bedeutend von den vorher angeführten Formen der Gesteinszerstörung, d. h. von der Zerstörung durch Zerklüften und von der Zerstörung durch Plastizität.

Da die Form der Gesteinszerstörung von der Art der Beanspruchung, von der Geschwindigkeit der Beanspruchung und vom Einfluß der Strahlungsenergie, unter deren Wirkungen die Gesteine stehen, abhängig ist, kann die Form der Gesteinszerstörung durch Anordnung der Einflußfaktoren geändert werden. In Abhängigkeit von den beeinflussenden Faktoren können wir ein und dasselbe Gestein auf dreierlei Art und Weise zerstören: durch Zerklüften, durch Plastizität und durch Zersplittern. Der Unterschied zwischen den drei Formen der Gesteinszerstörung ist auf Bild 68 gut zu sehen. Auf Bild 68a ist ein durch Zerklüften zerstörter Steinsalzkörper, auf Bild 68b eine aus dem plastischen Zustand rekristallisierte, also eine durch Plastizität zerstörte Steinsalzprobe, und auf Bild 68c eine durch Zersplittern zerstörte Steinsalzprobe dargestellt.

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern ist verhältnismäßig sehr kompliziert, denn die beeinflussenden Komponenten, die die Zerstörungsform bedingen, schaffen spezielle Voraussetzungen nicht nur für die Akkumulation der potentiellen Energie, sondern auch für den ganzen Mechanismus der Zerstörung. Eine genaue Erläuterung ist ohne eine eingehende und präzise Analyse aller Komponenten nicht möglich. Dadurch wird jedoch die Problematik so umfangreich, daß sie über den Rahmen dieser Arbeit, die sich allgemein mit den Formen der natürlichen Gesteinszerstörung befaßt, weit hinausreichen würde. Wie schon vorn erwähnt wurde, wird die Problematik der Gesteinszerstörung durch Zersplittern in einer zweiten ausführlichen Arbeit des Autors über den „Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei Gebirgsschlägen“ behandelt, die als Teil 2 in diesem Heft abgedruckt ist,

Daher wird hier die natürliche Gesteinszerstörung durch Zersplittern nur in kurzer und vereinfachter Form beschrieben, wobei nur die wesentlichsten Gegebenheiten angeführt werden.

Man kann zwei Hauptgruppen unterscheiden:

1. Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge schneller dynamischer Beanspruchung
2. Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung des Charakters der Beanspruchung und der Verformung.

Im folgenden soll auf diese beiden Formen näher eingegangen werden.

Zersplitterung der Gesteine durch schnelle dynamische Beanspruchung

Wir gehen von einem Gesteinskörper aus, den wir langsam auf Druck beanspruchen, wodurch sich das Gestein zunehmend verformt. Bei einem bestimmten Punkt der Beanspruchung wird die Elastizitätsgrenze des Gesteins erreicht. Steigert man die Druckbeanspruchung noch weiter, wird die Festigkeitsgrenze erreicht, auf der das Gestein durch Zersplittern zerstört wird. Wird aber die Geschwindigkeit der Beanspruchung gesteigert, ist festzustellen, daß sich nicht nur die Elastizitätsgrenze, sondern auch die Festigkeitsgrenze erhöht. Dabei ist aber die gesamte Verformung kleiner, und was am wichtigsten ist: die Elastizitätsgrenze nähert sich der Festigkeitsgrenze des Gesteins. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit der Beanspruchung stimmt die Elastizitätsgrenze mit der Festigkeitsgrenze überein. Um diese Übereinstimmung zu erreichen, muß das Gestein mit einer verhältnismäßig großen Geschwindigkeit beansprucht werden, so daß es letztlich dynamisch beansprucht wird.

Die Überschneidung der Elastizitätsgrenze mit der Festigkeitsgrenze infolge dynamischer Beanspruchung führt zur Gesteinszerstörung durch Zersplittern.

Wir wissen, daß das Gestein die größte Menge an potentieller Energie bei gegebener Beanspruchungsart auf der Elastizitätsgrenze akkumulieren kann. Infolge dynamischer Beanspruchung ist jedoch die Elastizitätsgrenze gestiegen und stimmt mit der Festigkeitsgrenze überein. Infolge der schnellen dynamischen Beanspruchung akkumuliert sich deshalb die potentielle Energie des Gesteins bis zu dessen Festig-

keitsgrenze, da diese mit der Elastizitätsgrenze übereinstimmt. Das Quantum der im Gestein akkumulierten Energie ist bedeutend größer, als das Quantum, das das Gestein auf der Elastizitätsgrenze bei langsamer Beanspruchung zu akkumulieren vermochte. Da sich also bei schneller dynamischer Beanspruchung die potentielle Energie bis zur Festigkeitsgrenze akkumuliert, hat die Zerstörung des Gesteins, bedingt durch eine plötzliche Umwandlung eines sehr großen Quantums an potentieller Energie in Arbeit, eine schnelle und intensive Zerstörung des Gesteins zur Folge. Das Gestein wird durch Zersplittern zerstört.

Die Überschneidung der Elastizitätsgrenze mit der Festigkeitsgrenze infolge einer schnellen dynamischen Beanspruchung führt dazu, daß der beanspruchte Stoff in einen spröden Stoff überführt wird.

Die Sprödigkeit ist keine konstante, sondern eine veränderliche Eigenschaft. In unserem Falle ist diese von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängig, und zwar muß die Beanspruchungsgeschwindigkeit mindestens so groß sein, daß eine Überschneidung der Elastizitätsgrenze mit der Festigkeitsgrenze eintritt.

Die Intensität der Gesteinszerstörung durch Zersplittern — beurteilen wir diese nach der Größe der durch Zersplittern entstandenen Körner (Splitter), also nach dem Anteil der feinkörnigen Fraktionen und des Staubes — ist um so größer, je mehr die Beanspruchungsart den Charakter der Allseitigkeit annimmt und je größer die Beanspruchungsgeschwindigkeit und die Beanspruchung selbst ist. Dies ist jedoch in bestimmter Weise begrenzt, denn es wurde nicht vorausgesetzt, daß sich die dynamische Beanspruchung nach der Zerstörung des Gesteins durch Zersplittern in eine große statische Beanspruchung umwandeln würde, wenn auch nur auf eine sehr kurze Zeit. Sie erreicht einen solchen Wert, daß diese Beanspruchung zur Plastizität des zersplitterten Gesteins und so zu seiner Verschmelzung (des Gesteins) führte. Im vorhergehenden Kapitel über Gesteinsplastizität wurde dieser Fall als extremes Beispiel der Plastizität angeführt; die Verschmelzung (Sinterung) von Steinsalz kam dabei im Bohrloch durch Wirkung starker Beanspruchung, durch Explosion der Sprengstoffladung, zustande.

Abgesehen von diesem Extremfall wirkt sich der teilweise Einfluß einer allseitigen dynamischen Beanspruchung auf die Intensität der Gesteinszerstörung so aus, wie es die Ergebnisse des Laborversuches auf Bild 69 zeigen.

Dieser Laborversuch wurde wie folgt durchgeführt:

Auf eine Gesteinsprobe (in Form einer Scheibe) wurde ein metallischer Ring gepreßt, der auf das Gestein einen Manteldruck ausüben sollte. Auf beiden Seiten wurden auf die Gesteinsoberfläche stählerne Zylinder gelegt, wobei die Grundflächen der beiden Zylinder einander genau gegenüber lagen. Der untere Zylinder wurde in eine massive Unterlage eingespannt und der obere Zylinder durch einen kräftigen Schlag beansprucht. Der zwischen den Zylindern liegende Bereich der Gesteinsscheibe wurde durch diese Schlagbeanspruchung zersplittert. In der Gesteinsscheibe entstand im Wirkungsbereich der Schlagbeanspruchung eine kreisförmige Vertiefung, während das übrige Gestein der beanspruchten Scheibe beinahe unversehrt blieb. Im unteren

Teil des Bildes ist das zersplitterte Gestein zu erkennen; es wurde nach der Korngröße in drei Gruppen eingeteilt.

Am Schluß dieser kurzen Ausführungen über Gesteinszerstörung durch Zersplittern, die durch eine schnelle dynamische Beanspruchung verursacht wird, muß bemerkt werden, daß zur Zerstörung durch Zersplittern verschiedenartiger Gesteine selbstverständlich Beanspruchungen verschiedener Geschwindigkeit und Größe notwendig sind.

Zersplitterung der Gesteine durch Änderung des Beanspruchungs- und Verformungscharakters

Gehen wir wieder von einem durch einfachen Druck beanspruchten Gesteinskörper aus. Bei Beanspruchung mindestens auf der Elastizitätsgrenze speichert sich im Gestein ein bestimmtes Quantum potentieller Energie, das für die bestehende Beanspruchungsart und Verformung ein Maximum darstellt. Wie wir wissen, ist die Akkumulation an potentieller Energie von Art und Größe der Verformung abhängig (Erläuterung zu Bild 15 bis 20).

Lassen wir auf einen durch einfachen Druck beanspruchten Gesteinskörper noch eine weitere Kraft wirken, wird sich mit der Änderung der Beanspruchung auch der Charakter der Verformung ändern. Wir fügen z. B. der einfachen Druckbeanspruchung eine Schubbeanspruchung hinzu. Dies hat eine Änderung des Verformungscharakters zur Folge, und zwar zu Ungunsten der Akkumulation der potentiellen Energie. Bei der Schubbeanspruchung liegen die Elastizitäts- und die Festigkeitsgrenze des Gesteins niedriger als bei der Druckbeanspruchung. Bei einer Verformung, die charakteristisch für Schubbeanspruchung ist, kann das Gestein nicht so viel potentielle Energie akkumulieren wie bei einer durch Druckbeanspruchung hervorgerufenen Verformung. —

Da aber bei der angeführten Beanspruchungsart und dem angeführten Verformungscharakter das Gestein mehr potentielle Energie akkumuliert hat, als es bei einer erzwungenen Energie akkumulieren kann, so bildet sich im Gestein freie bzw. überschüssige potentielle Energie. Diese überschüssige potentielle Energie geht jedoch nicht verloren, sondern sie gibt — da sie sich sofort in Arbeit umwandelt — einen Impuls zur Zerstörung des Gesteins durch Zersplittern. (Die Umwandlung der überschüssigen Energie in Arbeit verläuft über der Festigkeitsgrenze.)

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern, die durch eine Änderung des Verformungscharakters verursacht wurde, können wir durch verschieden angeordnete Laborversuche nachprüfen. Das Prinzip eines der möglichen Fälle ist schematisch auf Bild 70 dargestellt. Darin bedeuten die mit Nummern bezeichneten Teile: 1. Gesteinskörper — 2. Stählerne Schiebeleplatte — 3. Walzlager (auf dem die Schiebeleplatte verschoben werden kann) — 4. Stählerne Unterlegplatten.

Der auf Bild 70a gezeigte Gesteinskörper wurde durch einfachen Druck, z. B. bis auf die Elastizitätsgrenze, beansprucht. Unter Wirkung dieser Beanspruchung

wurde der Körper durch eine zusätzliche waagerechte Kraft beansprucht, und zwar in Richtung des stark aufgezeichneten Pfeiles (Bild 70b). Durch diese zusätzliche Beanspruchung änderte sich der Verformungscharakter des Gesteins, und das Gestein wurde durch Zersplittern zerstört.

Um den Mechanismus der Zerstörung durch Zersplittern richtig zu erfassen, müssen wir uns über das Wesen der Änderungen der Verformungscharakteristiken klar werden.

Zusammenfassend können wir die Verformung, die die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Energie zu akkumulieren, beeinflußt, in zwei Gruppen einteilen:

1. Gruppe — positive Verformung
2. Gruppe — negative Verformung

Bei positiver Verformung vergrößert sich die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Energie zu akkumulieren. Dabei wird z. B. die Beanspruchungsart und also auch die Verformungscharakteristik vom Symbol V nacheinander auf Symbol IV, III, II und I geändert (s. Bilder 15 bis 19). Durch Änderung der Verformungsart in dieser Richtung steigt die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Energie zu akkumulieren (vgl. Bild 20).

Bei negativer Verformung verringert sich dagegen die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Energie zu akkumulieren. Eine negative Verformung wird ein Gestein aufweisen, dessen Beanspruchungsart wir z. B. in Richtung vom Symbol I (Bild 15) zur Verformungscharakteristik nach Symbol V (Bild 19) ändern würden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Gesteinszerstörung durch Zersplittern, die durch eine bestimmte Änderung des Verformungscharakters verursacht wird, dadurch gekennzeichnet ist, daß sich die positive Verformung des Gesteins nur bei einem bestimmten kritischen Spannungszustand des Gesteins in die negative Verformung umwandeln kann. Das bedeutet, daß der Unterschied der Akkumulationsfähigkeit des Gesteins, bedingt einerseits durch die positive und andererseits durch die negative Verformung, genügend groß ist, um das Gestein durch die in Arbeit umgewandelte überschüssige potentielle Energie durch Zersplittern zu zerstören. Dieser Prozeß verläuft oberhalb der Festigkeitsgrenze des Gesteins, die für dieses bei bestehender negativer Verformung angenommen werden darf.

Die Änderung der positiven Verformung in negative können wir auf verschiedene Weise durchführen. Als Beispiel sei auf eine völlig zerstörte Granitprobe (Bild 71)

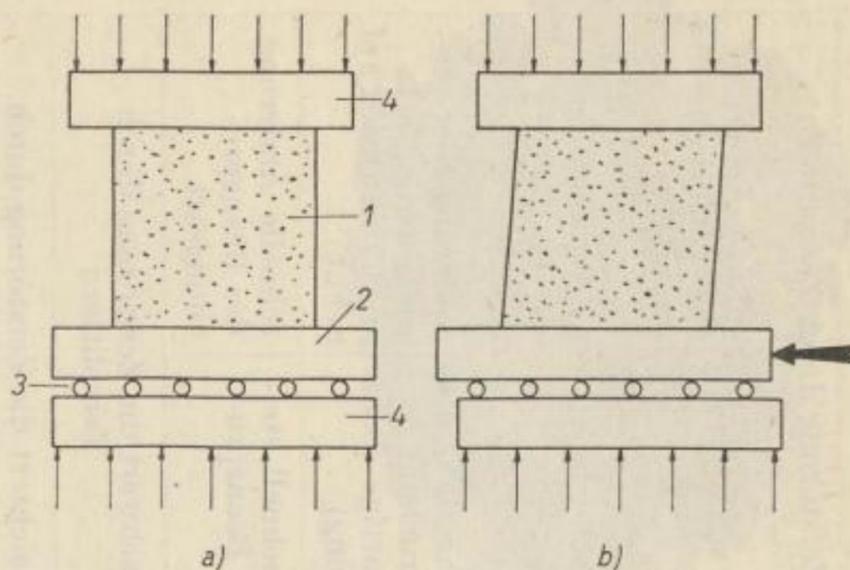


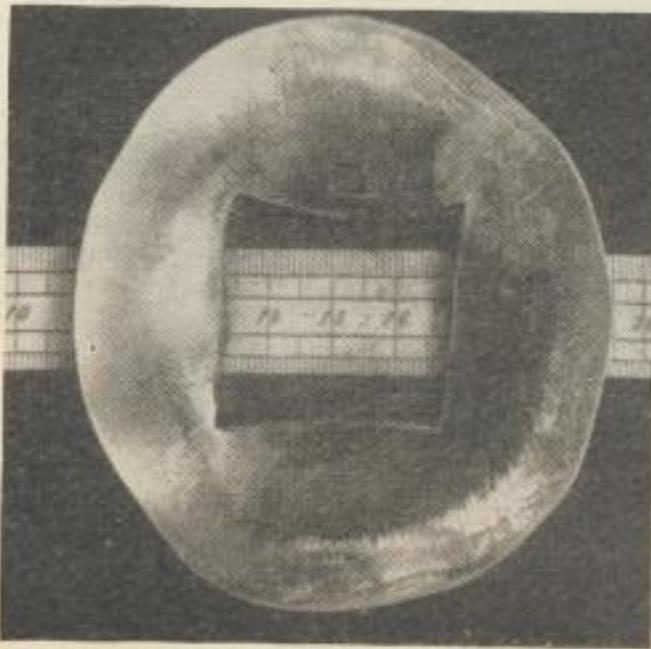
Bild 70

Die Charakteristik der Formen natürlicher Gesteinszerstörung

Zerstörungsform		Zerstörung durch Zerklüften		Zerstörung durch Plastizität		Zerstörung durch Zersplittern	
				Teilweise Plastizität	Absolute Plastizität	infolge schneller Beanspruchung	infolge Änderung des Verformungscharakters
Gesteinszusammenhang		wenig Reibung auf den Druckflächen	starke Reibung auf den Druckflächen	allseitiger Zusammenhang		verschiedenartiger Zusammenhang	
Beanspruchungsart		z. B. gegenseitiges Zusammendrücken		ungleichmäßiger allseitiger Druck	gleichmäßiger allseitiger Druck	sehr schnelle Druckbeanspruchung (schlagartige Beanspruchung)	Änderung der Beanspruchungsart (z. B. von Druck auf Schub)
Beanspruchungsgeschwindigkeit		langsam steigende Beanspruchung		langsam steigende Beanspruchung		sehr schnell steigende Beanspruchung	schnelle Änderung der Beanspruchungsart
Temperatur- einfluß	Erwärmung	erschwert die Zerstörung durch Zerklüften		erleichtert die Zerstörung durch Plastizität		erschwert die Zerstörung durch Zersplittern	
	Abkühlung	erleichtert die Zerstörung durch Zerklüften		erschwert die Zerstörung durch Plastizität		erleichtert die Zerstörung durch Zersplittern	
Strahlungseinfluß (Gamma-Strahlung u. Neutronenstrahlung)		erschwert die Zerstörung durch Zerklüften *		erleichtert die Zerstörung durch Plastizität *		erschwert die Zerstörung durch Zersplittern *	
Verformungscharakteristik		(beim Axialdruck) Querverformung ist die ganze Höhe des beanspruchten Körpers entlang gleich	(beim Axialdruck) Querverformung ist in der Hälfte der Höhe des beanspruchten Körpers am größten	allseitige ungleichmäßige Volumenverminderung	allseitige gleichmäßige Volumenverminderung	In Folge schneller Beanspruchung Verbindung der Elastizitätsgrenze mit der Festigkeitsgrenze; die Verformungen sind sehr klein, das Gestein wird ganz spröde	Die ursprüngliche positive Verformung ändert sich in negative Verformung, es tritt eine Änderung des Verformungscharakters auf; das Gestein wird ganz spröde

* Strahlungseinfluß kann auch umgekehrte Wirkung haben.

Die Charakteristik der Formen natürlicher Gesteinszerstörung (1. Fortsetzung)

Zerstörungsform	Zerstörung durch Zerklüften		Zerstörung durch Plastizität		Zerstörung durch Zersplittern	
			Teilweise Plastizität	Absolute Plastizität	infolge schneller Beanspruchung	infolge Änderung des Verformungscharakters
Zerstörungscharakteristik	Die entstandenen Risse (Klüfte) verlaufen senkrecht zu den beanspruchten Flächen und sind parallel	Die Risse und die Zerstörung verlaufen bogenförmig, und es entstehen kegelförmige Reste	Der feste Aggregatzustand ändert sich in den Zustand teilweiser Plastizität; allmählich schwindet das Kristallgitter, der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken steigt stark an	Der feste Aggregatzustand ändert sich in den Zustand absoluter Plastizität; es schwindet das Kristallgitter, der Gesteinswiderstand gegen Zusammendrücken konvergiert zum ∞	Das Gestein wird durch Zersplittern schlagartig in kleine Teilchen mit einem großen Anteil von Staub zerstört	
Charakteristische Zerstörungserscheinungen			<p>Formänderungen des Körpers (der Schichten) ohne Unterbrechung des Zusammenhanges</p> 			

Die Charakteristik der Formen natürlicher Gesteinszerstörung (2. Fortsetzung)

Zerstörungsform	Zerstörung durch Zerklüften	Zerstörung durch Plastizität		Zerstörung durch Zersplittern	
		Teilweise Plastizität	Absolute Plastizität	infolge schneller Beanspruchung	infolge Änderung des Verformungscharakters
Zerstörungserscheinungen in Natur	Laufende Erscheinungen der Gesteinszerstörung als Folge einer Gebirgsdruckwirkung, z. B. Pfeilerzerstörung, Zerstörung der Stöße und des Hangenden usw.	Tektonische Prozesse kontinuierlicher Verformung der Gesteinschichten, z. B. Faltungen im Salzstock, Foto: Th. Kormos		Eine besondere Erscheinung des Gebirgsdruckes — der Gebirgsschlag; das Gestein wird als Folge der Wirkung besonderer Gegebenheiten plötzlich in feine Teilchen und in Staub zersplittert. (Blei-Zink-Grube Příbram)	



hingewiesen, die nach dem auf Bild 70 angeführten Prinzip zerstört wurde. Die Granitprobe wurde infolge einer bestimmten Änderung der positiven Verformung in negative zersplittert.

Die so hervorgerufene Zersplitterung muß nicht unbedingt durch eine weitere zusätzliche Beanspruchung, die zu einer Änderung des Verformungscharakters führt, bedingt sein. Die Änderung der positiven Verformung in negative kann z. B. durch Beseitigung einer Beanspruchungsrichtung erreicht werden. Die Zerstörung einer



Bild 71

Würfelprobe, die beispielsweise auf der Elastizitätsgrenze allseitig beansprucht wird, kann dadurch hervorgerufen werden, daß wir die Beanspruchung auf einer Seite der Würfelprobe beseitigen. Auch in diesem Falle wird die Gesteinsprobe durch Änderung der ursprünglich positiven Verformung in negative zersplittert.

Die einzelnen Fälle, d. h. die verschiedenen Möglichkeiten der Gesteinszerstörung durch Zersplittern, werden in der Arbeit in diesem Heft über den Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern im Zusammenhang mit der Problematik des Mechanismus der Gebirgsschläge erläutert werden.

LITERATUR

- [1] AVEŠRIN: Gornye udary, Ugletechizdat, Moskva, 1955.
- [2] BECKER: Über Plastizität, Verfestigung und Rekristallisation. Phys. Zeitschrift (1926) S. 547.
- [3] BOKER: Die Mechanik der bleibenden Formänderungen in kristallinisch aufgebauten Körpern. Mitteilung über Forschungsarbeiten VDI, Heft 175/176 (1930).

- [4] BUSCH: Über die Expansionskraft des Steinsalzes. Zeitschrift für praktische Geologie (1907) S. 369.
- [5] CLOOS: Zur experimentellen Tektonik, Brüche und Falten. Naturwissenschaften 19 (1931) Heft 11, S. 242—247.
- [6] DREYER: Über das Festigkeitsverhalten sehr verschiedenartiger Gesteine. Bergbauwissensch. 2 (1955) S. 183—191.
- [7] FENNER: Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes. Glückauf 74 (1938) S. 681—695, 705—715.
- [8] FREUDENTHAL: Inelastisches Verhalten von Werkstoffen. VEB Verlag-Technik-Berlin, 1955.
- [9] GRIGGS: Deformation of rock under high confining pressures. Journ. Geol. 44, Heft 5 (1936).
- [10] GZOVSKIJ: Problemy tektonofiziki. Priroda (1957) S. 849—52.
- [11] GZOVSKIJ: O zadačach i sodržanii tektonofiziki. Izvest. AN SSSR, řada geofys. (1954) Heft 3.
- [12] GZOVSKIJ: Tektonofizičeskie polja naprjaženij, Izv. AN SSSR, řada geofys. (1954) Heft 5.
- [13] GZOVSKIJ: Sootnošenija meždú tektonofizičeskimi razryvami i naprjaženijami čv zemnoj kore. Razvėdka i ochrana nedr (1956) 11, S. 11—22.
- [14] GZOVSKIJ: Modelirovanie tektonofizičeskich polej i razryvov. Izvest. AN SSSR (1954) Heft 6.
- [15] HOUWINK: Elastizität, Plastizität und Struktur der Materie. Verlag Steinkopf, Dresden u. Leipzig, 1950.
- [16] HUBER: Die spezifische Formänderungsarbeit als Maß der Anstrengung eines Materials. Lemberg 1904.
- [17] JOFFÉ: Deformation und Festigkeit der Kristalle. Zeitschrift für Physik (1924) S. 286.
- [18] KÁRMÁN: Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. VDI (1912) S. 118.
- [19] KEIL: Ingenieurgeologie und Geotechnik. VEB Knapp, Halle, 1954.
- [20] KEGEL: Bergmännische Gebirgsmechanik. VEB Knapp, Halle, 1950.
- [21] KETTNER: Všeobecná geologie. Melantrich, Praha 1948.
- [22] KOCHENDÖRFER: Theorie der Kristallplastizität, Zeitschrift für Physik (1938) S. 244—264.
- [23] KUZNEČOV: Eksperimentalnye metody issledovanija voprosov gornogo davlenija, Trudy soveščanija po upravleniju gornym davleniem. Ugletechizdat, Moskva 1948.
- [24] KUZNEČOV: Mechičeskie svojstva gornych porod. Ugletechizdat, Moskva 1948.
- [25] KVAPIL: Nové názory v teorii horských tlaků a důlních otřesů. SNTL, Praha 1956.
- [26] KVAPIL: Rozrušování hornin z hlediska potenciální energie. Uhli Heft 9 (1957).
- [27] LEBEDĚVA: Modelirovanie processa obrazovanija diapirovych kupolov. Sovetskaja geologia, Sb. 54, 1956.
- [28] OROWAN: Zur Kristallplastizität I. Tieftemperaturplastizität und Bechersche Formel. Zeitschrift für Physik (1934) S. 605—613.
- [29] OROWAN: Zur Kristallplastizität II. Die dynamische Auffassung der Kristallplastizität. Zeitschrift für Physik (1934) S. 614—633.
- [30] OROWAN: Zur Kristallplastizität III. Über den Mechanismus des Gleitvorganges. Zeitschrift für Physik (1934) S. 634—659.
- [31] OROWAN: Zur Kristallplastizität IV. Weitere Begründungen des dynamischen Plastizitätsgesetzes. Zeitschrift für Physik (1935) S. 573—595.
- [32] OROWAN: Zur Kristallplastizität V. Vervollständigung der Gleitgeschwindigkeitsformel. Zeitschrift für Physik (1936) S. 382—387.

- [33] POLANYI: Über eine Art Gitterzerstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte. Zeitschrift für Physik (1934) S. 660.
- [34] ROŠ und EICHINGER: Versuche zur Klärung der Frage der Bruchgefahr, Diskussionsbericht Nr. 28, E. M. P. A. Zürich, Juni 1928.
- [35] ROŠ und EICHINGER: Bruchgefahr fester Körper bei wiederholter Beanspruchung — Ermüdung. E. M. P. A., Bericht Nr. 172, Zürich, 1950.
- [36] RUPPENEJT: Mečničeskije svojstva gornych porod. Ugletechizdat, Moskva 1956.
- [37] RUPPENEJT: Někotorye voprosy mekhaniky gornych porod. Ugletechizdat, 1954.
- [38] RÍMAN: Mechanika hornin a důlní tlaky. SNTL, Praha 1955.
- [39] SACHS: Die technologischen Eigenschaften von Aluminiumkristallen. VDI 71 (1927) S. 577.
- [40] SACHS und SHOJI: Zug-Druckversuche an Messingkristallen. Zeitschrift für Physik 45, Heft 11/12 (1927).
- [41] SCHLEIER: Der Spannungszustand an der Fließgrenze. Zeitschrift für Mathematik und Mechanik 6, Heft 3, Juni 1926.
- [42] SOKOLOVSKIJ: Teorija plastičnosti. Gostechizdat, Moskva 1950.
- [43] SPACKELER: Lehrbuch des Salz- und Kalibergbaues. Verlag Knapp, Halle 1950.
- [44] SPOTH: Fließen und Kriechen der Metalle. Metall-Verlag, Berlin-Grünwald, 1955.
- [45] TAYLOR: The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. Proceedings of the Royal Society, Serie A 145 (1934) S. 362—387.
- [46] THEILE: Temperaturabhängigkeit der Plastizität und Zugfestigkeit von Steinsalzkristallen. Zeitschrift für Physik (1932) S. 763.
- [47] TIMOŠENKO: Pružnost a pevnost. Praha 1951 (překlad).
- [48] TSCHBOTARIOFF: Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures.
- [49] WUERKER: Measuring the tensile streng of rocks. Min. Engn. 157, February 1955.
- [50] ŽEMOČKIN: Teorija uprugosti. Strojvojenmorizdat 1948.

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.

ÜBER DEN MECHANISMUS DER GESTEINSZERSTÖRUNG DURCH ZERSPLITTERN
BEI GEBIRGSSCHLÄGEN

INHALT

Einführung	83
Zur Problematik der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Gesteine . .	85
Die Arten der Gesteinseigenschaften	85
Hauptursachen für die Veränderung der Gesteinseigenschaften	86
Sprödigkeit des Gesteins	95
Zerstörung der Gesteine durch Zersplittern beim Gebirgsschlag	97
Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge schneller Belastung	97
Gebirgsschläge infolge schneller Belastung	102
Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung des Verformungscharakters	105
Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Veränderungen der Be-	
lastungsart und des Deformationscharakters	105
Gebirgsschläge infolge Änderung der Belastungsart und des Deformationscharakters	117
Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Änderung des Deformations-	
charakters bei gleicher Belastung	120
Gebirgsschläge infolge Veränderung des Deformationscharakters bei gleicher Be-	
lastung	121
Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge der schnellen Belastung und der Ände-	
rung des Deformationscharakters	122
Kombinierte Gebirgsschläge	122
Übersicht über einzelne Arten der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei Gebirgs-	
schlägen	123
Literatur	123

VORWORT

Die Arbeit über den Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei Gebirgsschlägen knüpft unmittelbar an die vorhergehende Arbeit an, die sich mit der natürlichen Gesteinszerstörung allgemein befaßt. Vorwiegend werden speziell die Gebirgsschläge behandelt, bei denen das Gestein durch Zersplittern zerstört wird.

Der Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei den Gebirgsschlägen wird in Umrissen dargelegt, also ohne Einzelheiten und mögliche Anwendungen, die in natürlichen Verhältnissen von Fall zu Fall verschieden sind.

Der Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei Gebirgsschlägen wird in der vorliegenden Arbeit von einem bestimmten Gesichtspunkt aus beurteilt, wonach die Sprödigkeit des Gesteines als spezifische Eigenschaft nicht als konstant, sondern als eine von bestimmten Bedingungen abhängige Funktion aufgefaßt wird.

Rudolf Kvapil

INHALT

VORWORT

Die Arbeit über den Mechanismus der Gesteinsbildung, sowie die Entstehung der Gesteine, ist ein sehr wichtiges Thema, das in der Geologie eine zentrale Rolle spielt. In diesem Buch wird versucht, die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Gesteinsbildung und der tektonischen Entwicklung der Erdkruste darzustellen. Die Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert: 1. Die Gesteinsbildung, 2. Die tektonische Entwicklung der Erdkruste und 3. Die Gesteinsbildung als Funktion der tektonischen Entwicklung. Die Gesteinsbildung wird als ein Prozess betrachtet, der durch die tektonische Entwicklung der Erdkruste bedingt ist. Die tektonische Entwicklung der Erdkruste wird als ein Prozess betrachtet, der durch die Gesteinsbildung bedingt ist. Die Gesteinsbildung ist also ein Ergebnis der tektonischen Entwicklung der Erdkruste, und die tektonische Entwicklung der Erdkruste ist ein Ergebnis der Gesteinsbildung. Die Gesteinsbildung ist also ein Prozess, der durch die tektonische Entwicklung der Erdkruste bedingt ist, und die tektonische Entwicklung der Erdkruste ist ein Prozess, der durch die Gesteinsbildung bedingt ist.

EINFÜHRUNG

Auf dem Gebiet der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der isotropen Stoffe gibt es noch eine Reihe ungelöster Probleme, noch bescheidener sind die Kenntnisse bezüglich mechanischer und physikalischer Eigenschaften anisotroper Stoffe.

Die vorliegende Arbeit steht in enger Beziehung zu den mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Gesteine. Aus diesem Grunde ist die Bestimmung der vereinfachenden Voraussetzungen und ihre Begrenzung wichtig.

Die Arbeit befaßt sich ausschließlich mit dem Mechanismus der Gesteinszersplitterung bei Gebirgsschlägen. Es wurden nur die Fälle der Gebirgsschläge behandelt, bei denen das Gestein zersplittert. In bezug auf die vereinfachenden Voraussetzungen wird die Gesteinszerstörung durch Zersplittern vom Gesichtspunkt der potentiellen Spannungsenergie aus betrachtet. Bei einem bestimmten Festigkeitszustand des Gesteins wird die akkumulierte Spannungsenergie plötzlich in Arbeit für die Zerstörung des Gesteins durch Zersplittern umgewandelt.

Um sich eine Vorstellung von dem Prozeß machen zu können und um die Richtigkeit dieser Formulierung zu begründen, betrachten wir die einzelnen Phasen dieses Prozesses an einem einfachen Beispiel, das im Prinzip den Vorgang vom energetischen Standpunkt aus richtig erfaßt.

Denken wir uns einen Gesteinswürfel, den wir im elastischen Bereich zuerst belasten und dann entlasten. Die Belastung, die wir auch als äußere Kraft betrachten können, ruft eine Bewegung hervor, die als Verformung in Erscheinung tritt, also die Massenpunkte im Kräftebündel in Bewegung setzt. In dem Kräftebündel wird dadurch potentielle Spannungsenergie akkumuliert. Die äußeren Kräfte rufen also eine bestimmte Bewegung hervor, wodurch sie eine bestimmte Arbeit leisten. Als Folge davon häuft sich im Gestein die potentielle Spannungsenergie an.

Entlasten wir dann den Gesteinswürfel, so daß die äußeren Kräfte verschwinden, ruft die akkumulierte potentielle Spannungsenergie, die in dem Kräftebündel der Massenpunkte verborgen ist, ebenfalls eine bestimmte Bewegung der Massenpunkte hervor, wodurch die vorangegangene Deformation wieder aufgehoben wird.

Die Formulierung, die in der folgenden Erläuterung benutzt wird und die diesen Prozeß als Umwandlung potentieller Energie in Arbeit definiert, ist nicht fehlerhaft, sondern nur eine gekürzte Formulierung der Erscheinung. Wenn dieser Vorgang bei bestimmtem kritischem Festigkeitszustand des Gesteins stattfindet, wird die Arbeit, die bei der Veränderung der akkumulierten potentiellen Energie entsteht, zum Zerstören des Gesteins und zur Entstehung der damit verbundenen Begleiterscheinungen verbraucht.

Bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern wird die ganze potentielle Spannungsenergie nicht nur zum Zerstören des Gesteins durch Zersplittern verbraucht, da der ganze Körper nicht nur durch Zersplittern zerstört, sondern infolge bestimmter Ursachen auch teilweise zerklüftet wird. In anderen Teilen des Körpers kommt es zum Rutschen an Kristallebenen oder zum Annulieren vorangegangener Deformationen. Ein Teil der potentiellen Spannungsenergie, die nicht bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern verbraucht wurde, sondern bei anderen Prozessen, kann in andere Energieformen überführt werden; zum Beispiel in Strahlungsenergie.

Bei dem Prozeß der Gesteinszerstörung durch Zersplittern kann vorläufig nicht festgestellt werden, wieviel von der Arbeit, die durch die potentielle Spannungsenergie entstanden ist, zum eigentlichen Zerstören durch Zersplittern und wieviel zur Entstehung der Begleiterscheinungen verbraucht wird: (Zerstörung durch Zerklüften, Annulieren der Deformation, Rutschen an Kristallebenen bleibender Deformation usw.)

Es kann auch nicht gesagt werden, welcher Teil der Arbeit in andere Energieformen, z. B. Wärmeenergie und Strahlungsenergie, überführt wird. Der Prozeß der Gesteinszerstörung durch Zersplittern ist selbstverständlich nicht ohne diese Begleiterscheinungen denkbar. Wenn auch ihre Werte vorläufig nicht festgestellt werden können, dürfen sie jedoch in der umfassenden Betrachtung des Arbeitsverbrauches für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern sowie für die Erscheinungen, die den Prozeß des Zersplitterns begleiten, nicht außer acht lassen. In diesem Sinne werden auch die symbolischen Gleichungen und Ausdrücke aufgebaut, die in dieser Arbeit enthalten sind. Im folgenden bemüht sich der Verfasser um eine gewisse Vereinfachung der Gedankengänge bzw. der Darlegungen.

ZUR PROBLEMATIK DER MECHANISCHEN UND PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DER GESTEINE

Die Grundfragen der Elastizität, der Festigkeit und der Mechanik der Gesteine und selbstverständlich auch Probleme der Gesteinszerstörung, des Gebirgsdruckes und des Gebirgsschlages kann man ohne genaue Bestimmung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Gesteines nicht erfolgreich lösen.

Obwohl auf diesem Forschungsgebiet viel getan wurde und man schon zu vielen Ergebnissen gelangen konnte, kann uns der heutige Stand der Kenntnisse nicht befriedigen. Oft müssen wir mit sehr grob angenäherten Werten der Gesteinseigenschaften zufrieden sein. Manchmal müssen wir uns mit mehr oder weniger charakterisierenden Koeffizienten oder sogar mit geschätzten Werten behelfen.

Wir kommen somit zu der Erkenntnis, daß sich in dem einfachen Begriff „mechanische und physikalische Eigenschaften der Gesteine“ eine so komplizierte Problematik verbirgt, wie sie in der Natur selbst vorhanden ist. Wir wissen heute, daß gerade die Ermittlung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Gesteine die kompliziertesten Probleme auf dem Gebiet der Mechanik der Gesteine beinhaltet. Der Erfolg der Lösung eines jeden Problems hängt davon ab, wie man an die Lösung herantritt. Ohne Zweifel ist jede Eigenschaft im Grunde genommen eine Beziehung. Diese Tatsache weist uns auf den richtigen Weg beim Erforschen der Gesteinseigenschaften, da auch die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Gesteine Beziehungen darstellen.

Die Arten der Gesteinseigenschaften

Unter dem Gesichtspunkt, daß jede Eigenschaft im wesentlichen eine Beziehung ist, können wir drei Kategorien der Gesteinseigenschaften unterscheiden.

1. Die erste Kategorie ist durch die Bestimmung vereinbarter Festigkeitseigenschaften gekennzeichnet. Es handelt sich hier um Ergebnisse verschiedener Prüfungen, die durch eine bestimmte Norm gegeben sind. Da die Eigenschaften unter bestimmten vereinbarten Bedingungen festgestellt werden, haben sie auch einen vereinbarten Wert.
2. Die zweite Kategorie zeigt die Gesteinseigenschaften in natürlicher Lagerung. Die Eigenschaften ein und desselben Gesteins sind hier eine Beziehung, die von den beeinflussenden Bedingungen abhängig ist. Für bestimmte natürliche Bedingungen sind bestimmte Gesteinseigenschaften gesetzmäßig. Die Eigenschaften ein und desselben Gesteins in natürlicher Lagerung sind nicht konstant, sondern ändern sich in Abhängigkeit von der Änderung der natürlichen Bedingungen.

3. Die dritte Kategorie ist durch die Erforschung der Festigkeitseigenschaften vom Standpunkt der Physik gekennzeichnet; ihrem Charakter nach gehört diese Kategorie in das Gebiet der Grundforschung der Physik der festen Stoffe.

Die angeführte Aufteilung der mechanischen und physikalischen Gesteinseigenschaften in drei Arten sollen keinen Gradmesser für deren Wichtigkeit darstellen. Der Zweck dieser Aufteilung liegt darin, daß sie uns eine Vorstellung über die qualitätsmäßige Begrenzung der Beziehungen liefert, von denen die mechanischen und physikalischen Eigenschaften desselben Gesteins abhängig sind. Dadurch ist es uns möglich, eine richtige Arbeitsaufteilung durchzuführen, was für die Lösung eines derartig komplizierten Problems sehr nützlich ist.

Hauptursachen für die Veränderung der Gesteinseigenschaften

Jede Theorie beruht auf Kausalitätsbeziehungen und erläutert sie auch. Um in die Problematik der Gesteinszerstörung beim Gebirgsschlag eindringen zu können, muß man die Forschung auf die Ermittlung der kausalen natürlichen Beziehungen, von denen die Eigenschaften des Gesteins abhängen, konzentrieren. Das bedeutet, zumindest die Hauptfaktoren zu bestimmen, die für die Bildung der verschiedenen zum Teil recht komplizierten Funktionen maßgebend sind, von denen die Eigenschaften der Gesteine in natürlicher Lagerung und auch die Arten ihrer Zerstörung abhängen.

Die Hauptfaktoren, von denen die mechanischen und physikalischen Gesteinseigenschaften abhängen, sind folgende:

- a) die Art der Belastung einschließlich der Größe
- b) die Geschwindigkeit der Belastung einschließlich des Zeitfaktors
- c) Einfluß der Strahlungsenergie, die auf das Gestein einwirkt

Bei der Materialprüfung ist die Wirkung der zwei ersten Faktoren sehr gut bekannt. Wir wissen, daß das Gestein verschiedene Eigenschaften in Abhängigkeit von der Art der Belastung und der Geschwindigkeit der Belastung aufweist. Dasselbe Gestein kann dabei verschiedene Festigkeiten, Festigkeitsmodule, Zerstörungsarten, elektrische Leitzahlen usw. besitzen.

Obwohl der dritte Faktor, die Strahlungsenergie, sehr großen Einfluß auf die Eigenschaften des Gesteins hat und in vielen Fällen genauso wichtig ist wie die Art und Geschwindigkeit der Belastung, wird er bei der Forschung weitgehend vernachlässigt [2] [3] [4]. Unter dem Einfluß der Strahlungsenergie ist nicht nur der Einfluß von Wärmeenergie, sondern auch von anderen Strahlungsarten — vor allem Gamma-Strahlen — gemeint.

Bei einer ganzen Reihe von technischen Stoffen, z. B. Metall und verschiedenen Kunststoffen, sind viele Messungen unternommen worden mit dem Ziel, den Einfluß der Strahlungsenergie zu ermitteln. Man erzielte viele günstige Ergebnisse, so daß man sie praktisch zur Verbesserung der technischen Eigenschaften vieler Stoffe anwenden konnte [5].

Obwohl die Strahlungsenergie gemeinsam mit den anderen Faktoren die Eigenschaften bei der Bildung der Erdkruste wie auch danach sehr beeinflußt hat, wurde in der

Forschung der Einfluß der Strahlungsenergie auf die Eigenschaften der Gesteine bisher verhältnismäßig kaum berücksichtigt. Die natürliche Quelle der Strahlungsenergie bildet auch heute noch der Zerfall der radioaktiven Elemente von den Uran-Radium-, Thorium- und Actinium-Zerfallsreihen. Die Vertiefung der Kenntnisse über den Einfluß der natürlichen Strahlungsenergie würde zur Lösung verschiedener Probleme auf vielen wissenschaftlichen Gebieten, z. B. Geologie, geologische Forschung, Geomechanik u. ä., beitragen.

In einigen Laboratorien sind schon Untersuchungen mit künstlicher Strahlung auf die Gesteine durchgeführt worden. Schon die ersten Proben haben gezeigt, daß sich die Eigenschaften der Gesteine durch Bestrahlung wesentlich verändern können und dieses praktisch ausgenutzt werden sollte. So könnte diese Erkenntnis z. B. die Aufbereitung mancher Erze erleichtern, zumal allgemein gilt, daß bei gleicher Strahlungsart und bei gleichem Energiequantum die Änderung verschiedener Mineralien verschieden groß ist. Selbstverständlich kann man die Änderung der Eigenschaften

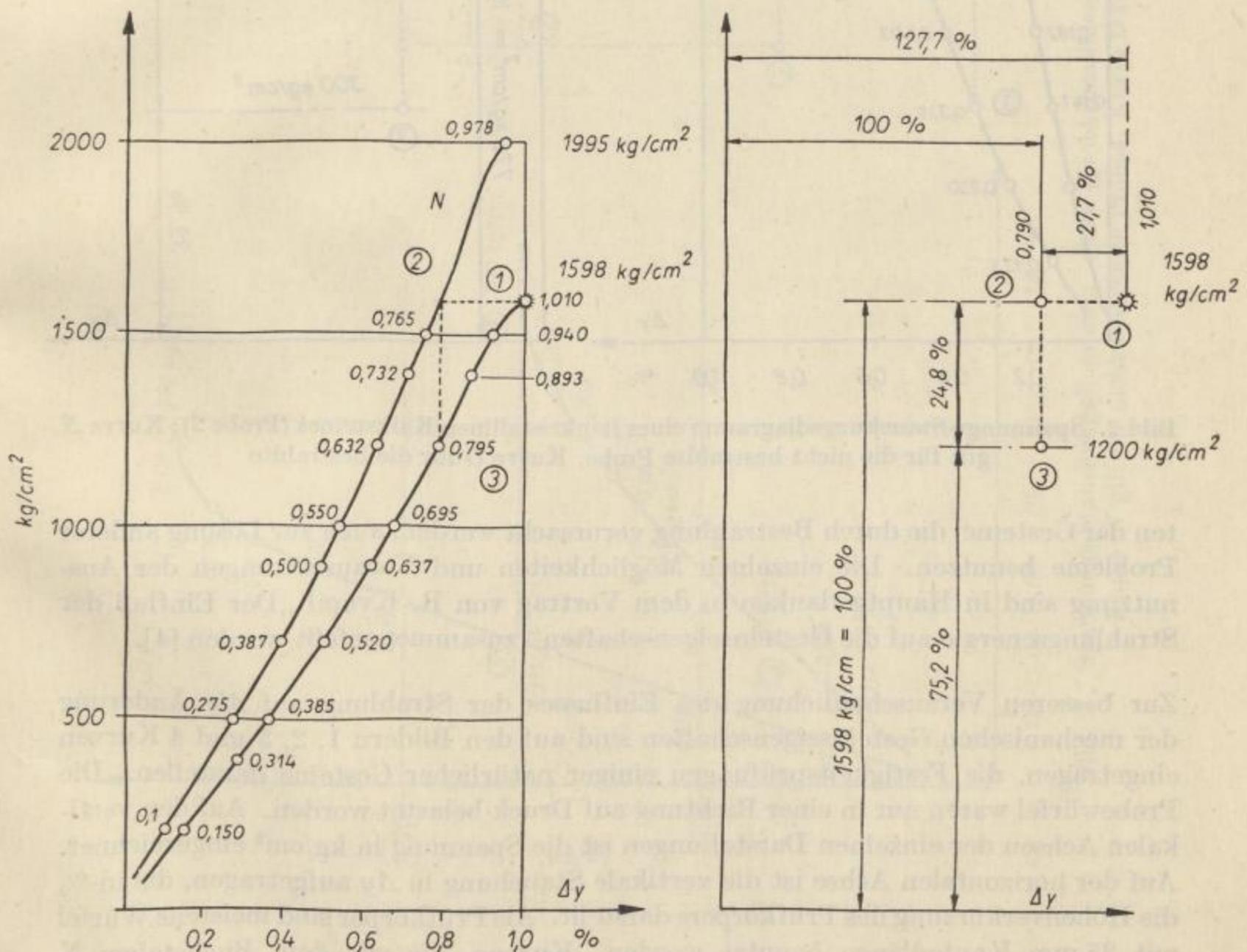


Bild 1. Spannungs-Stauchungsdiagramm eines sehr feinkristallinen Kalksteines (Probe 1); Kurve N gilt für die nicht bestrahlte Probe, Kurve O für die bestrahlte Kurve (mit γ -Strahlen)

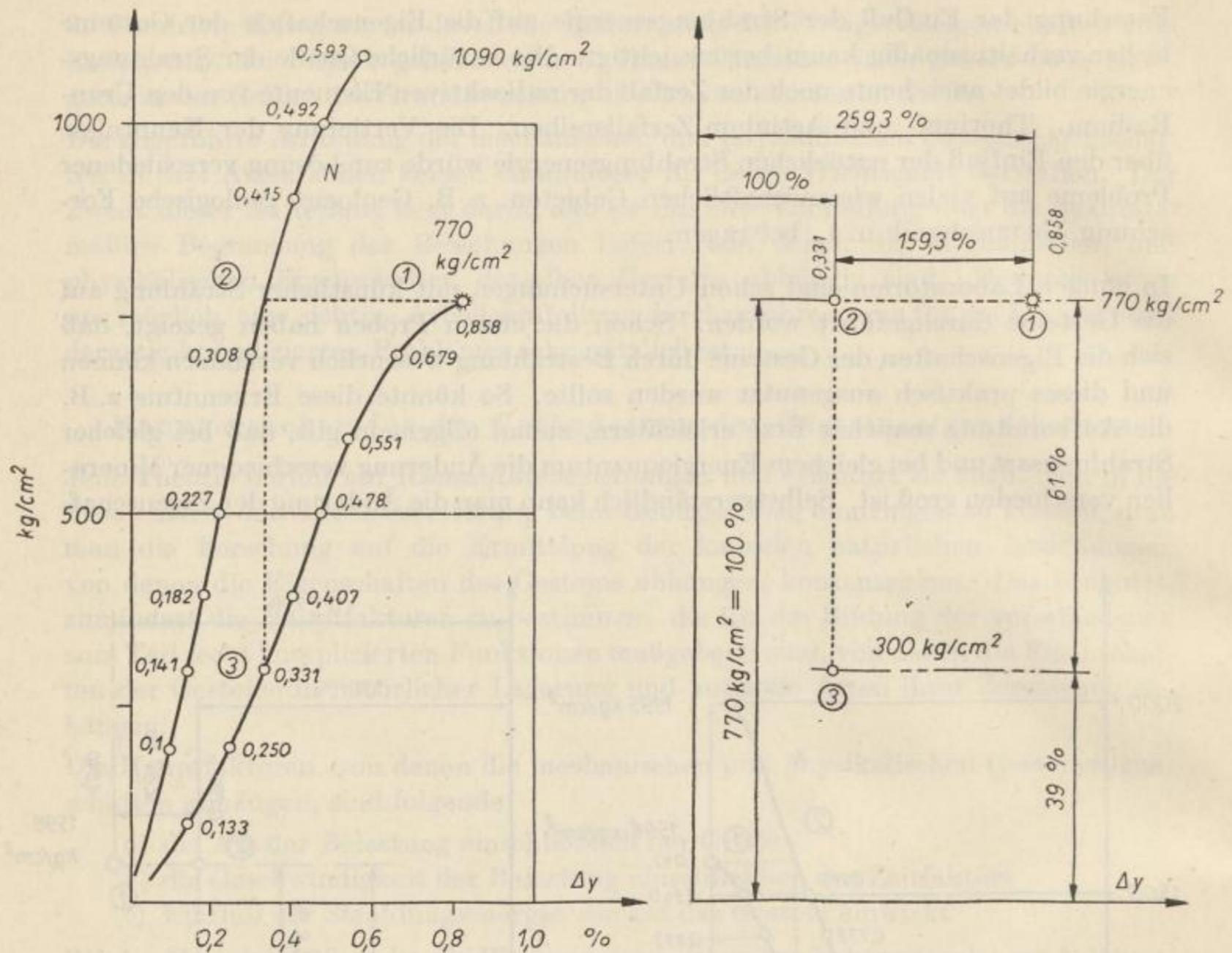


Bild 2. Spannungs-Stauchungsdiagramm eines feinkristallinen Kalksteines (Probe 2); Kurve N gilt für die nicht bestrahlte Probe, Kurve O für die bestrahlte

ten der Gesteine, die durch Bestrahlung verursacht werden, auch zur Lösung anderer Probleme benutzen. Die einzelnen Möglichkeiten und Voraussetzungen der Ausnutzung sind in Hauptgedanken in dem Vortrag von R. Kvapil „Der Einfluß der Strahlungsenergie auf die Gesteinseigenschaften“ zusammengefaßt worden [4].

Zur besseren Veranschaulichung des Einflusses der Strahlung auf die Änderung der mechanischen Gesteinseigenschaften sind auf den Bildern 1, 2, 3 und 4 Kurven eingetragen, die Festigkeitsprüfungen einiger natürlicher Gesteine darstellen. Die Probewürfel waren nur in einer Richtung auf Druck belastet worden. Auf den vertikalen Achsen der einzelnen Darstellungen ist die Spannung in kg/cm^2 eingezeichnet. Auf der horizontalen Achse ist die vertikale Stauchung in Δy aufgetragen, die in % die Höhenverkürzung des Prüfkörpers darstellt. Als Prüfkörper sind meistens Würfel mit 35 mm Kantenlänge benutzt worden. Kurven, die mit dem Buchstaben N bezeichnet sind, gelten für nicht bestrahlte Proben, und Kurven mit dem Buchstaben O für bestrahlte Proben. Die Gesteine wurden im Reaktor bestrahlt.

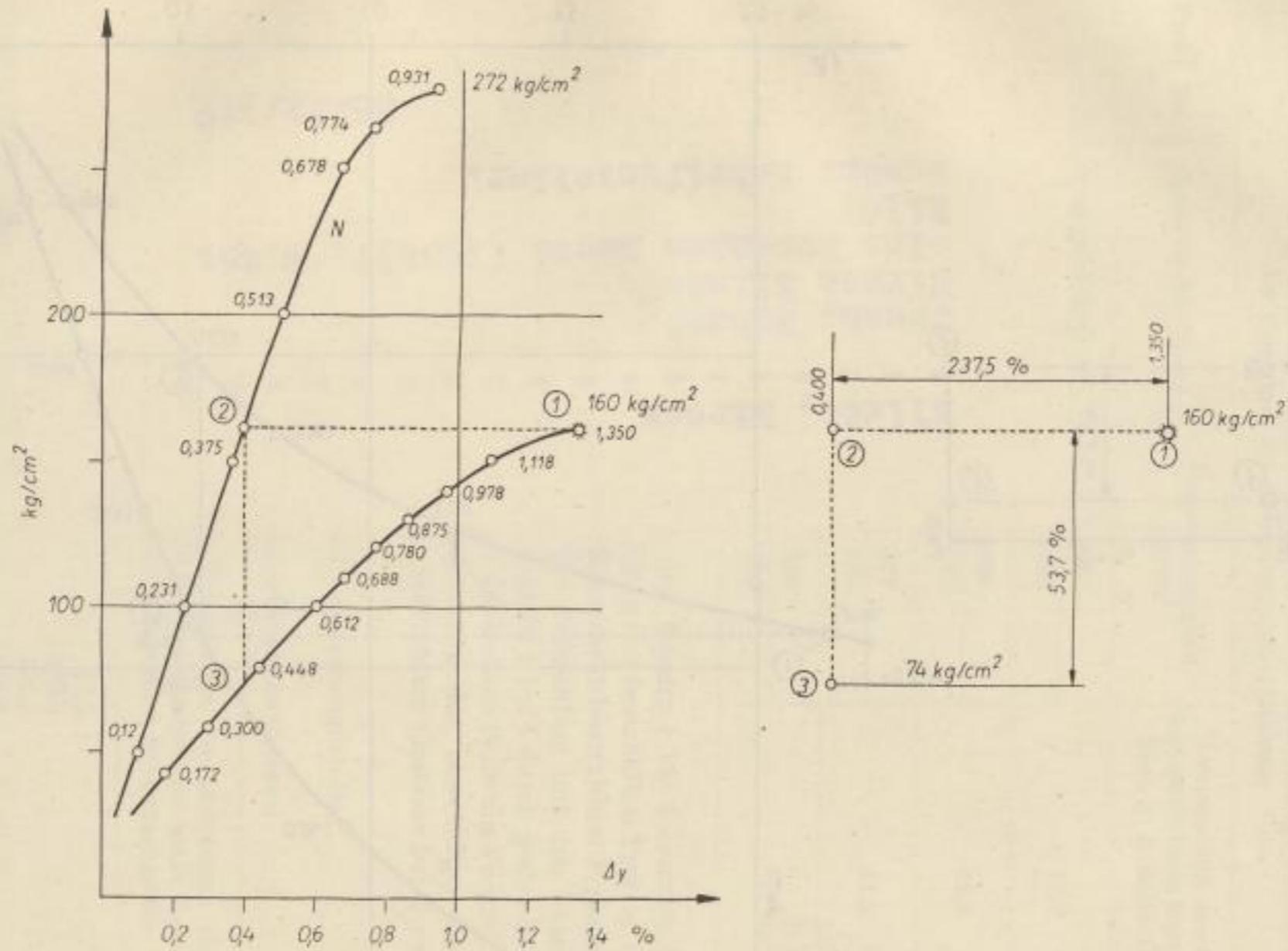


Bild 3. Spannungs-Stauchungsdiagramm eines grobkristallinen Kalksteines (Probe 3);
 Kurve N gilt für nicht bestrahlte Proben, Kurve O für bestrahlte

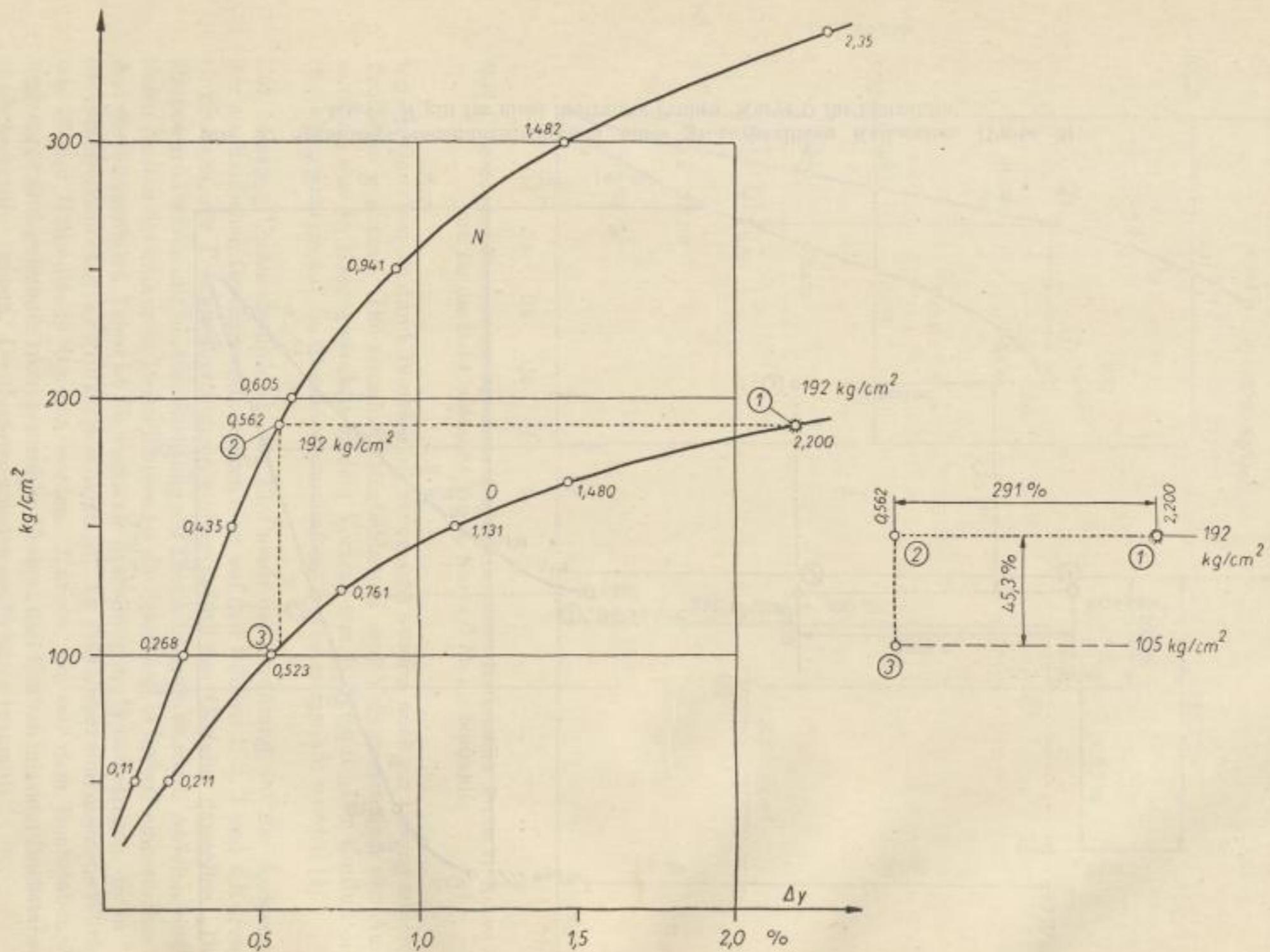


Bild 4. Spannungs-Stauchungsdiagramm einer Steinsalzprobe (Probe 4); Kurve N gilt für die nicht bestrahlte Probe, Kurve O für bestrahlte. (Die Bestahlungsmenge der Proben Nr. 1, 2, 3 und 4 ist ungefähr 7500 kW-Stunden äquivalent.)

Die Festigkeit ist bei den Prüfsteinen durch die Bestrahlung verringert worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1. Die Verringerung der Gesteinsfestigkeit durch Bestrahlung, ausgedrückt in % der Festigkeit des nicht bestrahlten Gesteins

Probe Nr.	Zustand der Probe	Gesteinsfestigkeit kp/cm ²	Verringerung der Gesteinsfestigkeit durch Bestr. in % der Fest. d. n. bestr. Gesteines
1	nicht bestrahlt (N)	1995	19,9
	bestrahlt (O)	1598	
2	N	1090	29,4
	O	770	
3	N	277	41,2
	O	160	
4	N	370	44,6
	O	205	

Wie aus den graphischen Darstellungen in den Bildern 1 bis 4 ersichtlich ist, hat sich auch der Verlauf der gemessenen Stauchung der bestrahlten Proben verändert. Sie ist bei derselben Belastung größer als bei den nicht bestrahlten Proben. Die Belastungswerte, bei denen die Deformation der bestrahlten mit den unbestrahlten Proben verglichen worden sind, sind in den Bildern 1 bis 4 durch gestrichelte Linien angedeutet. Außerdem ist auf jedem Bild auf der rechten Seite ein Vergleichsschema aufgezeichnet. Die Vergrößerung der Verformung des bestrahlten Gesteins ist ausgedrückt in % der Verformung des nicht bestrahlten Gesteins bei derselben Belastungsgröße.

Die Ergebnisse sind übersichtlich in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2. Vergrößerung des bestrahlten Gesteins

Nummer der Probe	Belastung kp/cm ²	Vergrößerung der Deformation des bestrahlten Gesteins, ausgedrückt in % der Deformation des nicht bestrahlten Gesteins bei derselben Belastungsgröße
1	1598	27,7
2	770	159,3
3	160	237,5
4	192	291,0

Analog können wir auch die Unterschiede in den Werten der Belastung des bestrahlten und des nicht bestrahlten Gesteins bei gleicher vertikaler Deformation Δy

ment bestrahlte 1100e, Kurve O im bestrahlte. (Die Bestrahlungsdosis des 1100e ist 1,1 Mrd. Röntgen und 4 ist ungefähr 7500 kW-Stunden äquivalent.)

beurteilen. In den Bildern 1 bis 4 werden die durch die gestrichelte Linie ausgezeichneten Stellen verglichen. Genauso werden die Stellen auf den Schemas rechts von der Kurve verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3. Unterschied der Belastung des bestrahlten und des nicht bestrahlten Gesteins bei gleicher vertikaler Deformation Δy

Nummer	Vertikale Deformation Δy %	Verringerung des bestrahlten Gesteins, ausgedrückt in % der Belastung des nicht bestrahlten %
1	0,790	24,8
2	0,331	61,0
3	0,400	53,7
4	0,562	45,3

Aus den durchgeführten Versuchen geht hervor, daß manche Gesteine infolge der Bestrahlung eine größere Deformation aufweisen als die nicht bestrahlten. Wenn wir aber die Einwirkungen aller Strahlungsenergien betrachten, einschließlich der Wärmeenergie, dann gilt, daß infolge der Bestrahlung alle Gesteine weich werden. Man kann dabei die Vermutung nicht außer acht lassen, daß in der Natur dieses Weichwerden der Gesteine ihre Plastizität und dadurch auch den Verlauf mancher tektonischer Erscheinungen beeinflussen konnte.

Bei den Gesteinen und auch bei anderen Stoffen werden durch die Bestrahlung mit Gamma-Strahlen die physikalischen Eigenschaften geändert. So ändert sich zum Beispiel auch der spezifische elektrische Widerstand. Manche Gesteine ändern infolge der Bestrahlung mit Gamma-Strahlen ihre Farbe; z. B. besonders Steinsalz (NaCl). Selbst ein klarer Kristall verfärbt sich je nach der Intensität der Bestrahlung hellblau, dunkelblau bzw. ganz schwarz. Auch Flußspäte (Fluorite) verändern sehr deutlich nach der Bestrahlung ihre Farbe. Auch bei anderen Gesteinen ist dies der Fall, wenn es auch nicht ganz so deutlich sichtbar wird wie etwa bei Steinsalz oder den Fluoriten.

Die Gesteinseigenschaften hängen, wie aus den durchgeführten Versuchen hervorgeht, von dem Einfluß der Strahlungsenergie ab. Wenn wir deshalb die Abhängigkeit der Gesteinseigenschaften von den beeinflussenden Faktoren definieren sollen, dann müssen wir sagen, daß die mechanischen und physikalischen Eigenschaften ein und desselben Gesteins nicht konstant sind, sondern von der Belastungsart, der Belastungsgeschwindigkeit und von der Stärke der einwirkenden Strahlungsenergie abhängen.

Die Vielseitigkeit und Kompliziertheit der Natur kommt auch in Zusammenhang mit den Faktoren, die die Gesteinseigenschaften bedingen, zum Ausdruck. So gibt es außer der Mehrzahl der Fälle, bei denen die verschiedenen Kombinationen der Hauptfaktoren verschiedene Eigenschaften desselben Gesteins bedingen und man daher verschiedene Zerstörungsmethoden anwenden muß, auch die Möglichkeit,

daß verschiedene Kombinationen dieser Komponenten gleiche Wirkung haben und dadurch dieselbe Zerstörungsart erfordern.

Betrachten wir zum Beispiel ein Gestein mit einem Plastizitätsgrad S_p . Zum Erreichen dieses Plastizitätsgrades werden alle drei Hauptfaktoren in bestimmter Kombination beteiligt, so wie es schematisch in Bild 5 dargestellt wird. Die Größe der Wirkung, also der Wert der Hauptfaktoren, wird dort folgendermaßen abgestuft: sehr groß, groß, mittel groß, klein und sehr klein. Die Belastungsart, die nach Erreichen der Plastizität durch allseitige Belastung gekennzeichnet ist, ist in Bild 5 durch den Buchstaben A bezeichnet worden. Die Belastungsgeschwindigkeit und damit der Zeitfaktor wird mit B bezeichnet, der Einfluß der Strahlungsenergie einschließlich der Wärmeenergie mit C. Die Werte der einzelnen Faktoren A, B und C sind symbolisch als Säulen dargestellt worden, so daß wir links von der Skala ablesen können, daß A einen großen, B einen mittleren und C einen kleinen Wert besitzt. Die symbolische Darstellung in Bild 5 zeigt vereinfacht, daß für den gedachten Plastizitätsgrad S_p eine verhältnismäßig große, allseitige und dauernde Belastung nötig ist, weil die Strahlungsenergie (in unserem Falle die Wärmeenergie) verhältnismäßig klein ist.

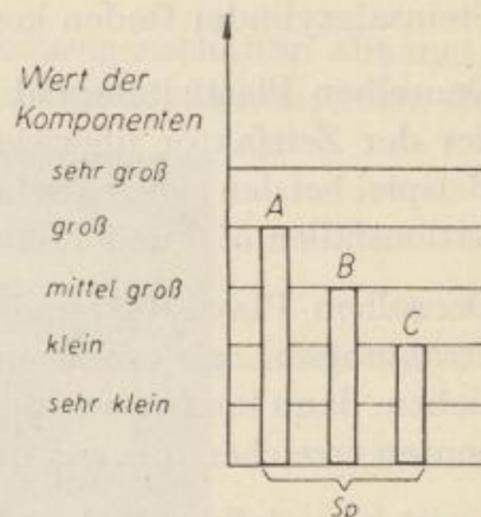


Bild 5. Symbolische Kombination der Faktoren A, B und C, die einen bestimmten Plastizitätsgrad S_p bedingen

Denselben Plastizitätsgrad S_p kann man auch erreichen, wenn sich das Verhältnis der Faktoren A, B, C verändert. Einige mögliche Kombinationen, bei denen man denselben Plastizitätsgrad erreicht, sind schematisch in Bild 6 gezeigt. Einzelne Kombinationen sind mit Zahlen in Kreisen bezeichnet worden.

Bild 6 soll deutlich machen, daß verschiedene geeignete Kombinationen der Komponenten A, B und C den gleichen Plastizitätsgrad S_p verursachen können. Die Haupt-

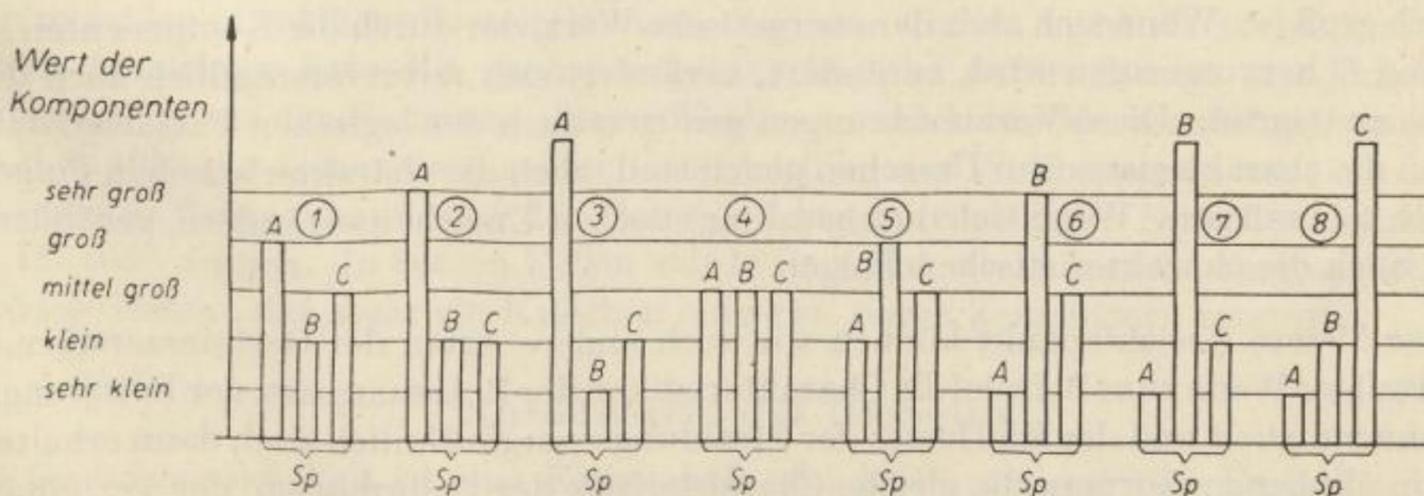


Bild 6. Symbole für verschiedene Kombinationen der Faktoren A, B und C, die den gleichen Plastizitätsgrad S_p bedingen. Die Bezeichnungen sind die gleichen wie auf der Bild 5

faktoren A , B , C sind voneinander abhängig. So kann man zum Beispiel den Plastizitätsgrad S_p auch erreichen, wenn mit einem kleinen Zeitfaktor ein geringer Einfluß der Strahlungsenergie einhergeht. Dann muß aber die allseitige Belastung sehr groß sein. Wir kennen aus der Praxis Beispiele, bei denen Steinsalz, das man als Dichtung der Ladung im Bohrloch benutzt hat, durch die Explosion der Ladung, d. h. durch sehr schnelle aber auch extrem große Belastung, plastisch wurde. Die einzelnen Steinsalzstücke wurden so zusammengepreßt, daß man in dem Bohrloch kontinuierliche Steinsalzzylinder finden konnte (Bild 6, Fall 3).

Denselben Plastizitätsgrad kann man auch durch eine Kombination erreichen, bei der der Zeitfaktor überwiegt, also der Prozeß sehr lange andauert. Das ist zum Beispiel bei den rheologischen Prozessen der Fall. Auf Bild 6 wird das in den Kombinationsfällen 5, 6 und 7 dargestellt.

Denselben Plastizitätsgrad kann man aber auch bei überwiegendem Einfluß der Strahlungsenergie erreichen. Wenn wir dabei auch die Wärmeenergie in Betracht ziehen, dann können wir den Plastizitätsgrad S_p durch die Kombination der Komponenten erreichen, die auf Bild 6 durch den Fall 8 veranschaulicht wird.

Es ist klar, daß bei kleiner Wirkung eines Faktors durch Erhöhung der Wirkung der beiden anderen Faktoren oder nur eines der beiden Faktoren die gleiche Plastizität erreicht werden kann.

Der Einfluß der einzelnen Komponenten A , B und C , durch den man bei demselben Gestein denselben Plastizitätsgrad erreichen kann, wirkt sich aber auf den Energiebereich aus. Das sind komplizierte Prozesse der energetischen Transformation des Einflusses einzelner Komponenten, durch deren geeignete Kombination man gleichen Plastizitätsgrad S_p erreichen kann.

Vorläufig kennen wir die Geheimnisse des Transformationsmechanismus der Energien, der durch den Einfluß der Kombinationen der Faktoren A , B und C entsteht, nicht. Es scheint aber richtig zu sein, wenn wir voraussetzen, daß derselbe Plastizitätsgrad S_p bei verschiedenen Kombinationen A , B und C dadurch bedingt ist, daß die Gesamtenergie, die durch die Wirkung dieser Komponenten hervorgerufen wird, gleich groß ist. Wenn sich aber der energetische Wert, der durch die Komponenten A , B und C hervorgerufen wird, verändert, verändert sich selbstverständlich auch der Plastizitätsgrad. Diese Voraussetzungen genügen auch der logischen Tatsache, daß, wenn die charakteristischen Ursachen gleich sind, auch die charakteristischen Folgen gleich sein müssen. Wenn sich die charakteristischen Ursachen verändern, verändern sich auch die charakteristischen Folgen.

Unter diesem Gesichtspunkt können wir auch andere Arten der Gesteinszerstörung beurteilen. Wenn zum Beispiel die Charakteristiken der Belastungsart, der Belastungsgeschwindigkeit und des Einflusses der Strahlungsenergie ähnlich sind, dann erhalten wir in ähnlichen Körpern die gleiche Charakteristik der Deformation, der Verteilung der Spannung und auch der Zerstörung. Anschaulich zeigt das Bild 7, auf dem ein kegelförmiger Rest eines zerstörten Probezylinders aus Bronze (links) und aus Kalkstein (rechts) wiedergegeben ist. Die gleiche Zerstörungsart wurde dadurch erreicht

daß die Charakteristiken der Belastung bei beiden Körpern bezüglich der Belastungsart, der Belastungsgeschwindigkeit und des Einflusses der Strahlungsenergie ähnlich waren.

Hinsichtlich der Gesteinszerstörung hat sich die Ansicht eingebürgert, daß die Methode der Gesteinszerstörung unmittelbar von den Eigenschaften des Gesteins abhängt, wobei man gleichzeitig annimmt, daß die Gesteinseigenschaften unveränderlich sind.

Die Ansicht, daß die Zerstörungsmethode von den Gesteinseigenschaften abhängt, ist richtig. Dem gleichen Gestein unveränderliche Eigenschaften zuzuschreiben, ist

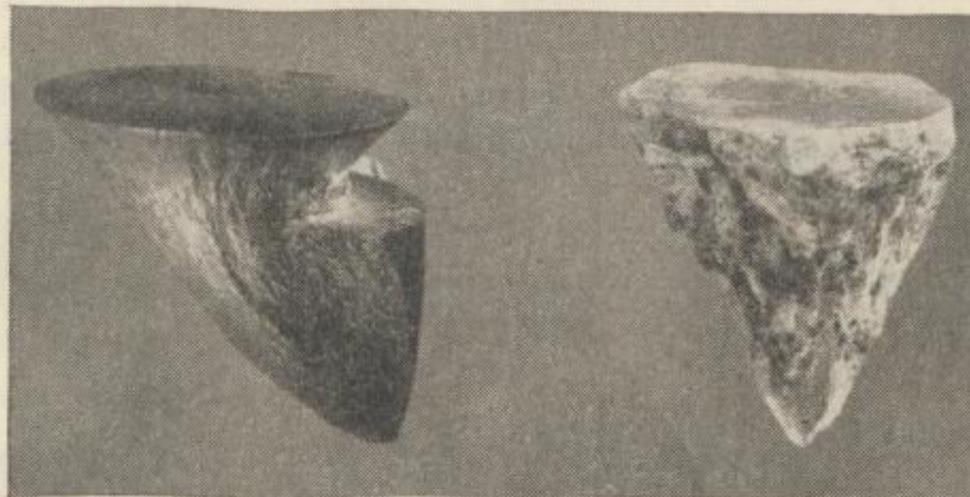


Bild 7. Kegelartiger Rest eines zerstörten Zylinders aus Bronze (links) und aus Kalkstein (rechts)

dagegen falsch, weil in der Tat die Gesteinseigenschaften von bestimmten Faktoren abhängig sind. Diese Faktoren verursachen durch verschiedene Kombinationen verschiedene Gesteinseigenschaften. Nur unter den genannten Bedingungen können wir die Zerstörungseigenschaften an den Gesteinen richtig beurteilen.

In der Gebirgsschlagforschung geht man meistens von der Voraussetzung aus, daß die Gebirgsschläge nur in bestimmten spröden Gesteinen entstehen können. Man geht oft von der falschen Voraussetzung aus, daß die Gebirgseigenschaften, in diesem Falle die Sprödigkeit, konstant sind. Man ist dann überrascht, wenn es zu einem Gebirgsschlag in solchem Gestein kommt, das man vordem nicht als ausgesprochen spröde bezeichnet hat. Ein ganz markantes Beispiel dafür stammt aus jüngster Zeit, nämlich aus der Kaligrube „Ernst Thälmann“ II/III in Merkers/Rhön, wo sich am 6. 7. 1958 der bisher wohl größte Gebirgsschlag der Welt ereignet hat [14]. Als ein anderes Beispiel kann man den Gebirgsschlag des Staßfurter Schachtes VI vom 30. 12. 1959 nennen. In beiden Fällen wurde Carnallit, also ein nicht ausgesprochen sprödes Gestein, das sogar ein Kriechen aufweist, durch Zersplittern zerstört.

Sprödigkeit des Gesteins

Die Gesteinssprödigkeit ist eine Eigenschaft, das heißt genauer eine Funktion, die von den Hauptfaktoren, Belastungsart und Belastungsgeschwindigkeit, sowie von dem Einfluß der Strahlungsenergie bestimmt wird, wobei es auf die Kombination dieser Hauptfaktoren ankommt.

Geological
Library
Freiberg

Wenn sich die Bedingungen verändern, verändert sich auch die Eigenschaft, und das Gestein hört auf, spröde zu sein. Das gilt selbstverständlich für alle festen Stoffe. Man kann leicht nachweisen, daß ein gläserner Probewürfel, der sich unter normalen Laborbedingungen als ausgesprochen spröde verhält und durch Zersplittern zerstört wird, seine Eigenschaften verändert, wenn wir einen von den beeinflussenden Faktoren ändern. Es genügt, daß wir den Glaskörper erwärmen. Wenn die Erwärmung genügend groß ist, dann wird das Glas nicht mehr spröde sein, sondern sich im Gegenteil ganz plastisch deformieren. Umgekehrt kann man durch geeignete Kombination der Hauptfaktoren auch erreichen, daß ein nicht spröder Stoff spröde wird. Bei Gesteinen wird das oft durch die Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit erreicht.

Im Grunde genommen geht es nicht darum, die Eigenschaft als solche, in unserem Falle die Sprödigkeit, sondern die Bedingungen festzustellen, die diese bestimmten Eigenschaften hervorrufen.

ZERSTÖRUNG DER GESTEINE DURCH ZERSPLITTERN BEIM GEBIRGSSCHLAG

Das Zersplittern bildet eine große Anzahl verschiedener Gesteinszerstörungen. Wir wenden unsere Aufmerksamkeit nur der natürlichen Gesteinszerstörung durch Zersplittern zu, wie wir sie bei Gebirgsschlägen antreffen.

Vom Gesichtspunkt der Ursache und des Mechanismus aus können wir die Zerstörung durch Zersplittern in einige Gruppen aufteilen, obwohl das Ergebnis der Zerstörung dasselbe ist [6] [7]:

- a) Zerstörung durch Zersplittern infolge schneller Belastung,
- b) Zerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Änderung des Deformationscharakters,
- c) Gesteinszerstörung durch Zersplittern, verursacht durch schnelle Beanspruchung bei gleichzeitiger Veränderung des Deformationscharakters, d. h. Zerstörung durch Kombination der Gruppen a und b.

Diese Aufteilung gestattet nicht nur ein ausführliches Kennenlernen der Gesteinszerstörung durch Zersplittern, die durch verschiedene Ursachen hervorgerufen wird, sondern auch die Erforschung des Mechanismus der Gebirgsschläge, bei denen das Gestein durch Zersplittern zerstört wird.

Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge schneller Belastung

Wie schon in dem Kapitel über mechanische und physikalische Eigenschaften angeführt wurde, sind die Gesteinseigenschaften nicht konstant, sondern in Abhängigkeit von den beeinflussenden Faktoren zu betrachten. Bei der Gesteinszerstörung durch schnelle Belastung tritt der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit in den Vordergrund.

Beim allmählichen Anwachsen der Belastung sammelt sich die potentielle Spannenergie am meisten an der Elastizitätsgrenze. Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze vergrößert sich die Deformation. Es kann auch zu bleibender Deformation kommen, ehe an der Festigkeitsgrenze das Gestein zerstört wird. Oberhalb der Elastizitätsgrenze wird bei der Deformation, die durch Rutschen an den Kristallebenen charakterisiert ist, im Gestein keine weitere Spannenergie angehäuft, weil der Zuwachs an Energie zum Abgleiten an den Kristallebenen, d. h. zu einer dauernden Deformation, verbraucht wird. Die bleibende Verformung, die durch Belastung oberhalb der Elastizitätsgrenze verursacht wird, ist um so weniger ausgeprägt, je geringer der Unterschied zwischen der Festigkeits- und der Elastizitätsgrenze

ist. Dieser Fall tritt besonders bei Gesteinen auf. Durch genaue Messungen kann man aber auch bei Gesteinen eine bleibende Deformation nachweisen, zu der es bei Belastung oberhalb der Elastizitätsgrenze kommt. Normalerweise kann man den Verlauf der Gesteinsdeformation so darstellen, wie es schematisch in Bild 8 gezeigt

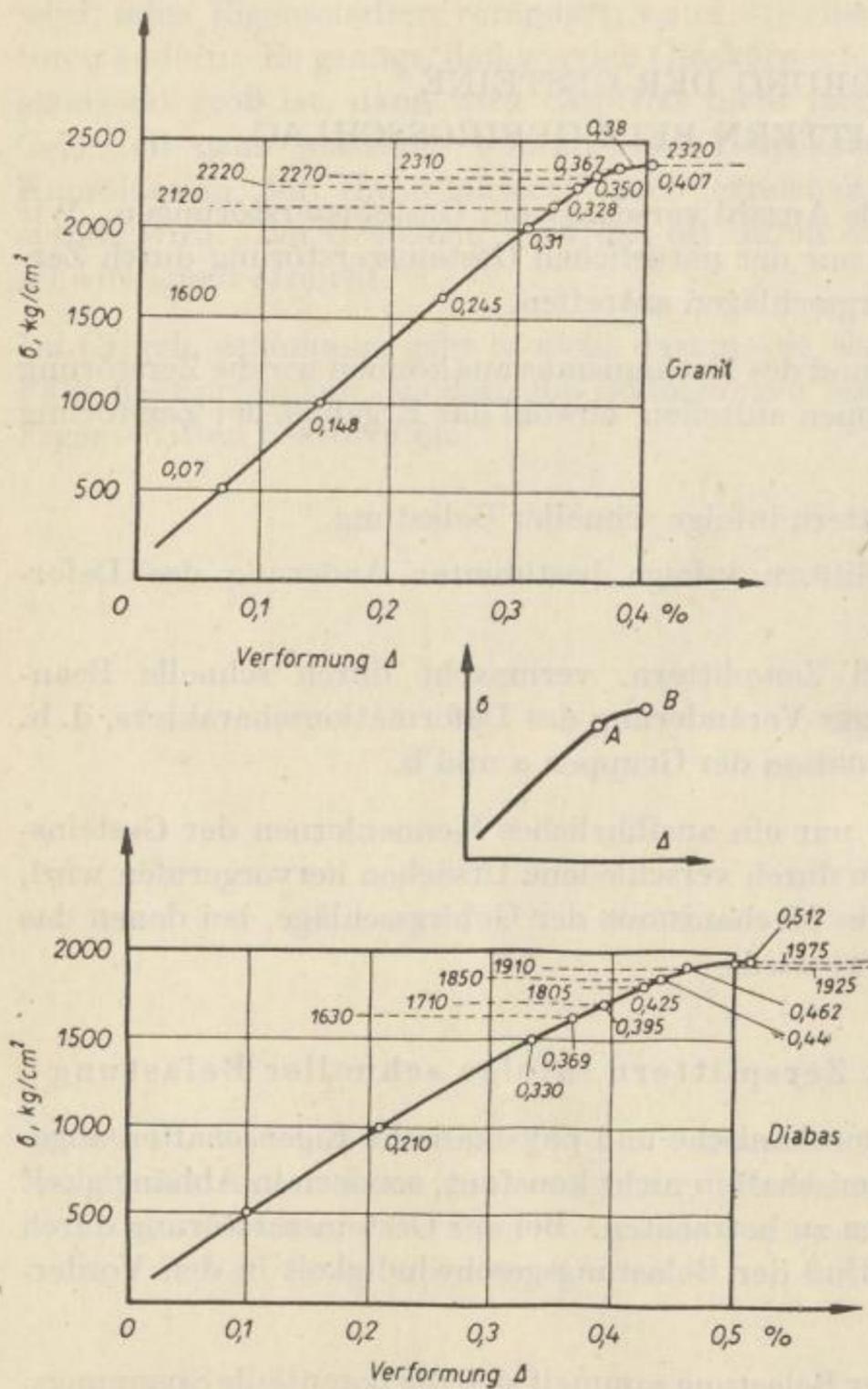


Bild 8. Deformationsverlauf von Granit (oben) und Diabas (unten)

die bei verschiedenen Gesteinen verschieden ist, sich die Festigkeitsgrenze mit der Elastizitätsgrenze deckt.

Schematisch sind der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf den Deformationsprozeß und die Lage der Elastizitäts- und der Bruchgrenze auf Bild 9 dargestellt. (Bild 9 ist für eine bestimmte charakteristische Deformation gezeichnet; für andere Deformationen gilt aber analog dasselbe.)

wird. Die obere graphische Darstellung gilt für Granit, die untere für Diabas. In der Mitte ist die Deformationskurve aufgezeichnet worden. In Bild 8 bedeuten σ = einseitige Druckbelastung, Δ = vertikale Deformation des belasteten Prüfkörpers, A = Elastizitätsgrenze, B = Festigkeitsgrenze.

X Aus der Forschungspraxis der Materialprüfung wissen wir, je niedriger die Belastungsgeschwindigkeit ist, desto größer ist die Deformation. Allerdings ist dabei die Festigkeit des Gesteins entsprechend kleiner. Durch die Vergrößerung der Belastungsgeschwindigkeit wird die Deformation verringert. Es verringert sich auch der Unterschied zwischen der Elastizitäts- und der Bruchgrenze, aber die Festigkeit vergrößert sich.

Durch Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit rückt die Elastizitätsgrenze immer näher an die Bruchgrenze heran, bis bei einer gewissen Belastungsgeschwindigkeit,

In Bild 9 bedeutet v die Belastungsgeschwindigkeit, wobei v_1 die kleinste und v_5 die größte darstellt. Die anderen Bezeichnungen entsprechen denen des Bildes 8.

Infolge einer bestimmten Belastungsgeschwindigkeit deckt sich die Elastizitätsgrenze mit der Bruchgrenze. Die potentielle Spannungsenergie wird dann im Gestein bis zur Bruchgrenze akkumuliert. Das Gestein wird ausgesprochen spröde. Das Ineinanderfließen der Elastizitätsgrenze und der Bruchgrenze als Folge bestimmter Belastungsgeschwindigkeiten ist auf Bild 9 durch $A = B$ bezeichnet worden.

Die Tatsache, daß bei einer gewissen Belastungsgeschwindigkeit die potentielle Spannungsenergie im Gestein bis zur Bruchgrenze akkumuliert wird, widerspricht nicht der Gesetzmäßigkeit über die Akkumulation der potentiellen Energie, daß diese ihr Maximum bei langsamer Belastung und bei Anhäufung oberhalb der Elastizitätsgrenze erreicht, weil infolge der schnellen Beanspruchung die Elastizitäts- und die Bruchgrenze ineinander übergehen, so daß das Gestein im ganzen Bereich elastisch wird.

Sehr schnelle Belastung kann das Gestein nur zeitweilig übertragen, wobei die Zeit um so kleiner wird, je schneller und größer die Belastung wird. Überschreiten der Bruchgrenze bei schneller Belastung hat eine sofortige Umwandlung der akkumulierten potentiellen Spannungsenergie in Arbeit zur Folge, wodurch die Gesteinszerstörung durch Zersplittern verursacht wird. Es ist zu bemerken, daß dabei nicht die ganze potentielle Energie in die Arbeit zur Gesteinszerstörung durch Zersplittern umgewandelt wird, sondern ein Teil zu den Begleiterscheinungen verbraucht wird. Die Probleme der Begleiterscheinungen sind auf physikalischem Wege zu lösen. In dieser Arbeit soll nicht näher darauf eingegangen werden, um nicht die an sich schon sehr komplizierte Problematik des Zersplitterns noch mehr zu komplizieren. Außerdem stellen sie nicht den Hauptfaktor dar, der den Charakter des Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bestimmt. Deshalb werden wir zur Vereinfachung im folgenden nur den Umstand berücksichtigen, daß sich die potentielle Energie in Arbeit zur Gesteinszerstörung durch Zersplittern verwandelt. Auch wenn wir voraussetzen, daß ein Teil dieser Energie anders verbraucht wird, zum Beispiel zum Annulieren der Deformation. Weil nicht das ganze Gestein zerstört wird (durch Zersplittern), kann es auch zur Transformation der potentiellen Energie

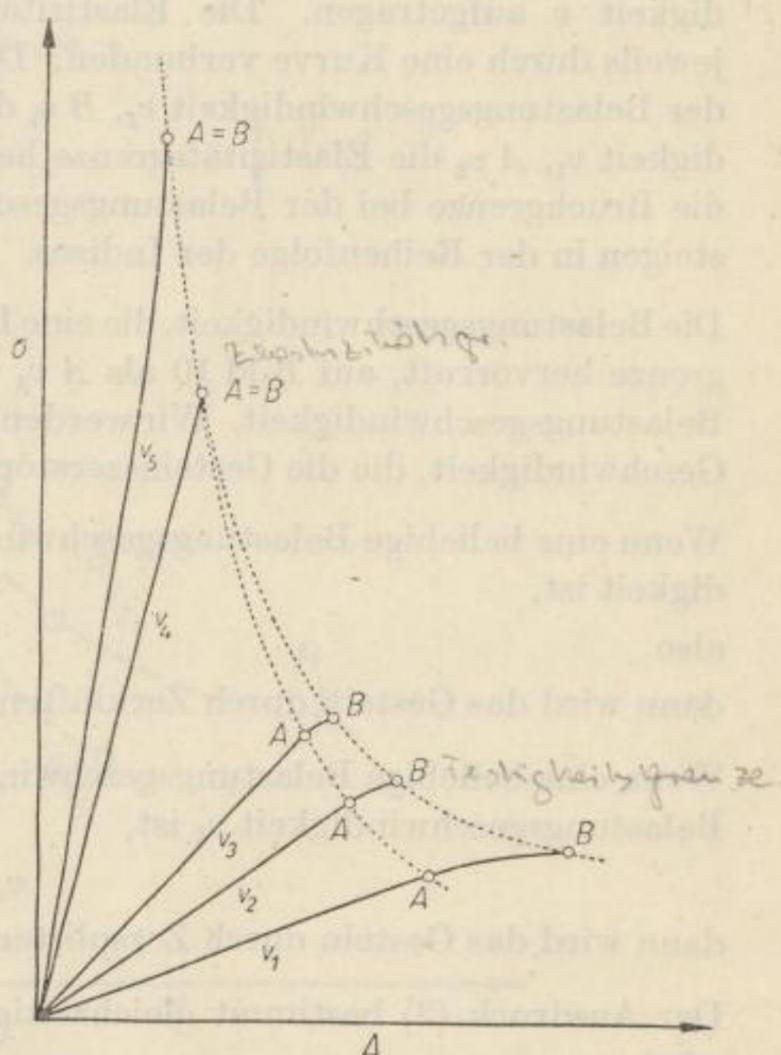


Bild 9. Veränderung der Gesteinseigenschaften in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit

in andere Energiearten kommen, zum Beispiel, wenn ein Teil der Energie abgestrahlt wird.

Die graphische Darstellung auf Bild 9 können wir zur Bestimmung prinzipieller Beziehungen, die die Sprödigkeit des Gesteins und seine Zerstörung durch Zersplittern infolge einer schnellen Beanspruchung bedingen, benutzen.

Bild 9 beweist, daß die Festigkeit des Gesteins von der Belastungsgeschwindigkeit v abhängt. Daher ist auf der senkrechten Achse des Bildes 10 die Belastungsgeschwindigkeit v aufgetragen. Die Elastizitätsgrenzen A und die Bruchgrenzen B sind jeweils durch eine Kurve verbunden. Dabei bedeutet $A v_1$ die Elastizitätsgrenze bei der Belastungsgeschwindigkeit v_1 , $B v_1$ die Bruchgrenze bei der Belastungsgeschwindigkeit v_1 , $A v_2$ die Elastizitätsgrenze bei der Belastungsgeschwindigkeit v_2 und $B v_2$ die Bruchgrenze bei der Belastungsgeschwindigkeit v_2 usw. Die Geschwindigkeiten steigen in der Reihenfolge der Indizes.

Die Belastungsgeschwindigkeit, die eine Deckung der Bruchgrenze mit der Elastizitätsgrenze hervorruft, auf Bild 10 als $A v_4 = B v_4$ bezeichnet, nennen wir die kritische Belastungsgeschwindigkeit. Wir werden sie als v_k bezeichnen. Sie ist also die kritische Geschwindigkeit, die die Gesteinszerstörung durch Zersplittern bedingt.

Wenn eine beliebige Belastungsgeschwindigkeit v_x kleiner als die kritische Geschwindigkeit ist,

$$\text{also} \quad v_x < v_k, \quad (1)$$

dann wird das Gestein durch Zerklüften zerstört.

Wenn eine beliebige Belastungsgeschwindigkeit v_x gleich oder größer als die kritische Belastungsgeschwindigkeit v_k ist,

$$v_x \geq v_k, \quad (2)$$

dann wird das Gestein durch Zersplittern zerstört.

Der Ausdruck (2) bestimmt gleichzeitig den Zustand, bei dem das Gestein spröde wird.

In vielen Forschungsinstituten und Laboratorien sind nachweisbare Prüfungen über den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Veränderungen der Eigenschaften der Gesteine durchgeführt worden. Sie sagen aus, daß durch die Geschwindigkeitserhöhung das Gestein spröde und daher durch Zersplittern zerstört wird. Diese Tatsache ist auch auf Grund der Versuche an Kohleproben, die im Institut für Gebirgsmechanik der Berg- und Hüttenakademie in Krakau durchgeführt wurden, bewiesen worden, obwohl die Belastungsgeschwindigkeit verhältnismäßig begrenzt war (8).

Wir wollen uns jetzt dem Mechanismus der Gesteinszerstörung durch Zersplittern unter natürlichen Bedingungen infolge schneller Beanspruchung zuwenden.

Unter natürlichen Bedingungen, das heißt unter Grubenbedingungen, kommt es nicht vor, daß ein Gestein durch schnelle Belastung im ganzen Bereich, d. h. von der Nullbelastung an, beansprucht wird.

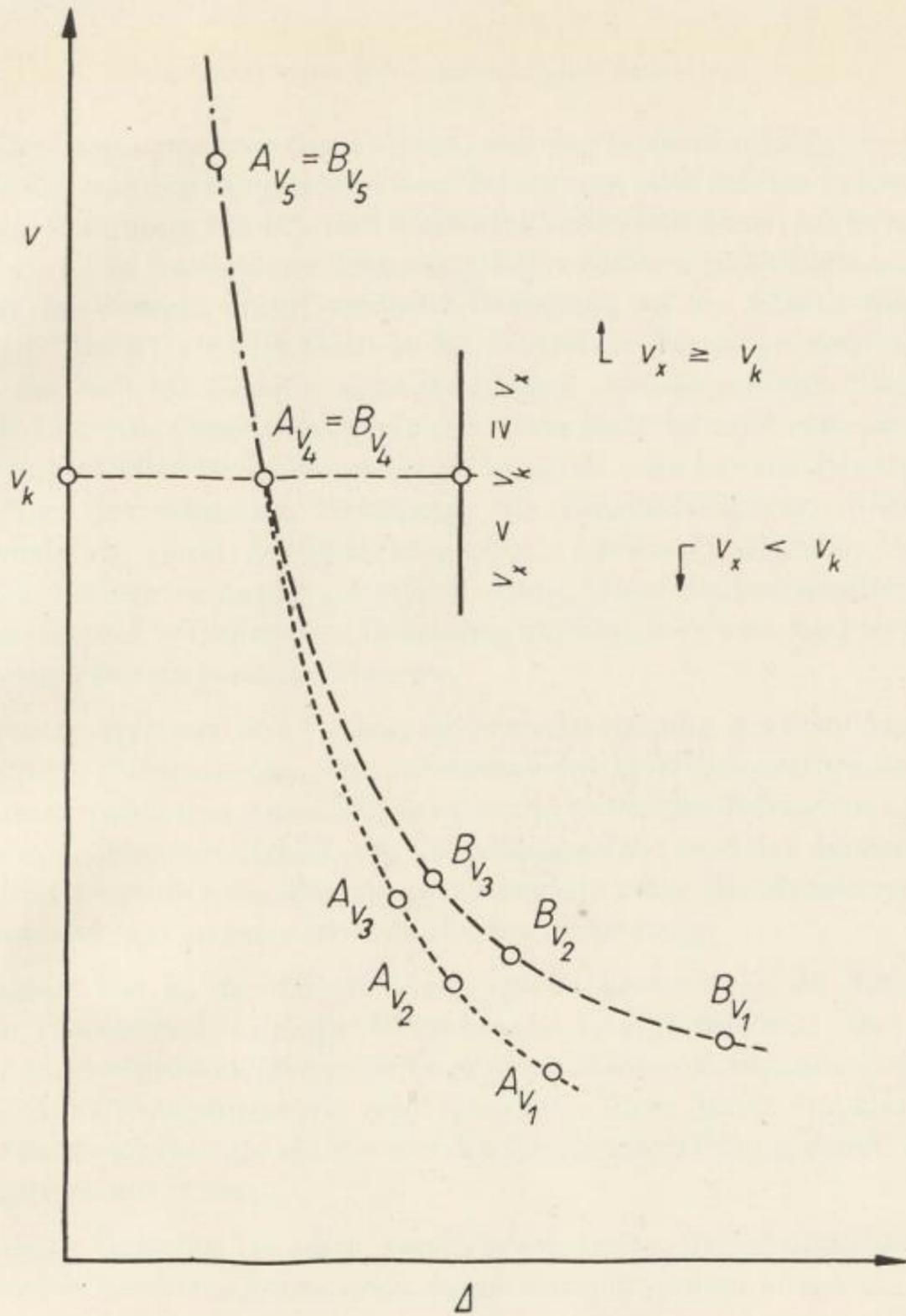


Bild 10. Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Art der Gesteinszerstörung



Bild 10a



Bild 10b

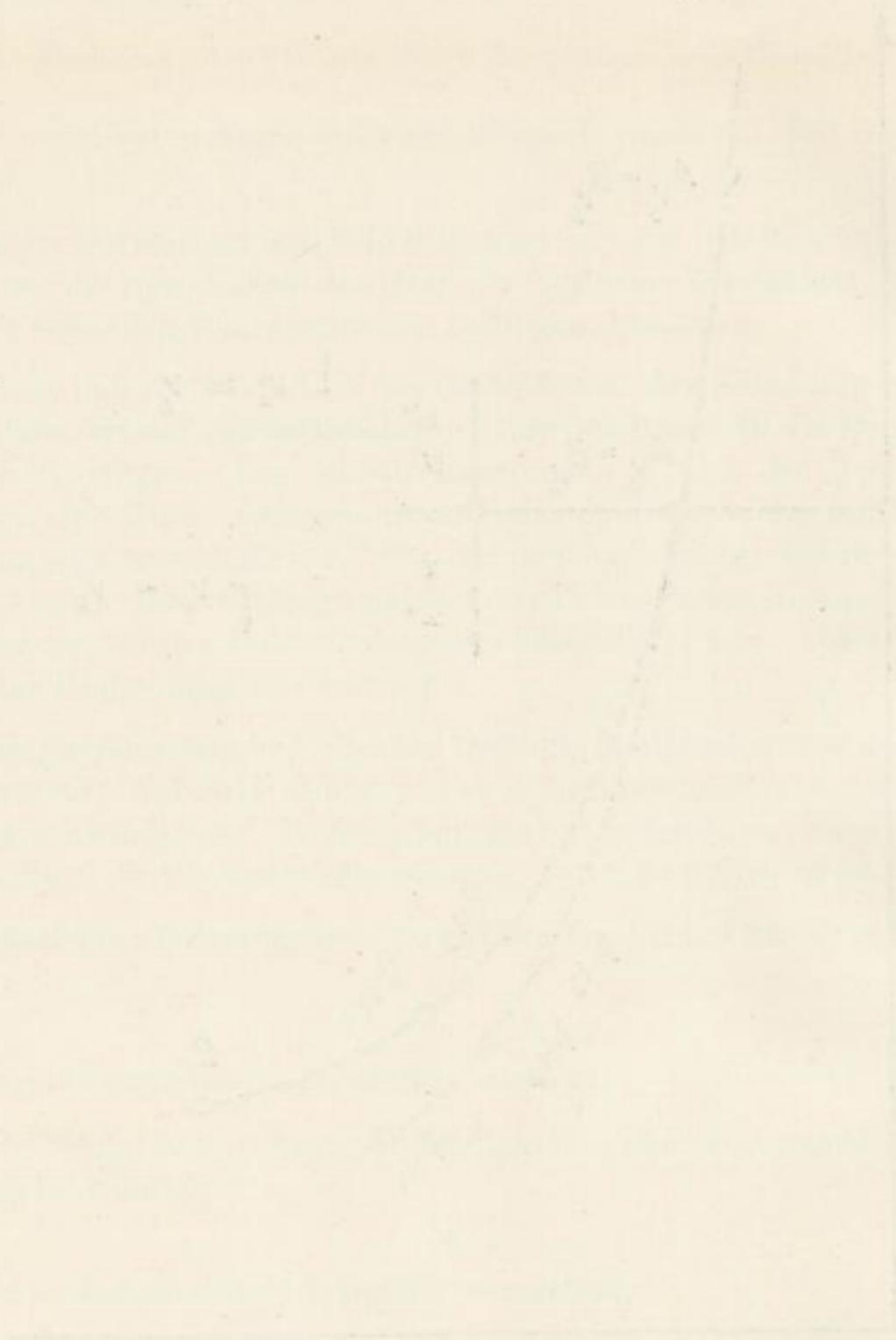


Fig. 100

Fig. 101

Unter Grubenbedingungen tritt der Fall ein, daß das Gestein infolge der natürlichen Lagerung, der Entstehung bergmännischer Hohlräume oder infolge beider Umstände schon eine hohe Spannung besitzt, und dann erst zusätzlich durch schnelle Belastung beansprucht wird. In natürlicher Lagerung kann selbstverständlich auch der Fall eintreten, daß das Gestein durch statische Belastung an der Elastizitätsgrenze beansprucht wird. Dabei wird im Gestein die maximale Menge an Spannungsenergie akkumuliert, die sich im Gestein anhäufen kann. Durch schnelle Belastung, die mindestens die kritische Geschwindigkeit erreichen muß, ist noch eine weitere Akkumulation der potentiellen Spannungsenergie möglich, also bis zur Bruchgrenze, mit der jetzt, infolge der schnellen Belastung, die Elastizitätsgrenze übereinstimmt. Das Gestein wird dabei durch Zersplittern zerstört, was durch plötzliche Umwandlung der potentiellen Energie in Arbeit geschieht. Dabei wirkt die potentielle Spannungsenergie, die im Gestein bei statischer Belastung akkumuliert war, und auch die durch schnelle Belastung hervorgerufene Energie.

Beim Zerstören zersplittert das Gestein in verhältnismäßig großem Anteil in feine und pulverförmige Bestandteile. Die Intensität der Gesteinszerstörung durch Zersplittern, die man durch den Anteil der feinen und pulvrigen Körner beurteilt, hängt von der Belastungsgeschwindigkeit, der Belastungsgröße und der Belastungsart ab. Je schneller und je größer die Belastung ist und je mehr die Belastung allseitigen Charakter annimmt, um so intensiver ist die Zersplitterung.

Die Belastungsart hat in der Hinsicht eine große Bedeutung, da durch allseitige Belastung die Elastizitäts- und die Bruchgrenze erhöht werden. Das Gestein ist dann in der Lage, eine größere Menge an Energie zu akkumulieren, so daß bei schneller Belastung die Zerstörungsintensität sehr hoch ist. Diese hängt von der Menge der potentiellen Spannungsenergie ab, die bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern in Arbeit umgewandelt wurde.

Für verschiedene Gesteine ist aber verschieden große Belastungsgeschwindigkeit nötig, um dieselbe Zerstörungsintensität durch Zersplittern zu erzielen.

Bei der Forschung im Labor war die Aufmerksamkeit auf die Fälle konzentriert, bei denen die Prüfkörper zuerst langsam bis zur Elastizitätsgrenze belastet waren und dann durch dynamische Belastung zusätzlich beansprucht wurden. Geprüft wurde der Zerstörungseffekt. Es ist festgestellt worden, daß je kleiner der durch die statische Belastung hervorgerufene Spannungszustand war, eine um so schnellere Belastung notwendig war, um das Zersplittern des Gesteins zu erreichen. Und umgekehrt, wenn das Gestein statisch hoch beansprucht wurde, dann konnte man durch verhältnismäßig langsame zusätzliche Belastung den gleichen Zerstörungseffekt erzielen. Es ist ersichtlich, daß sich die Auswirkungen, die durch statische und dynamische Belastung hervorgerufen werden, gegenseitig ergänzen. Hier besteht eine gewisse Analogie zu den Erläuterungen auf den Seiten 86 bis 95 (Bild 5 und 6).

Die Versuchsanordnung, bei der zu der statischen Belastung eine weitere schnelle Belastung zugefügt und dadurch eine Gesteinszerstörung durch Zersplittern erreicht wurde, charakterisiert im Prinzip die Faktoren, die unter natürlichen Bedingungen die Art der Gebirgsschläge verursachen, die durch schnelle Belastung entstehen.

Gebirgsschläge infolge schneller Belastung

Für Gebirgsschläge, die durch schnelle Belastung verursacht werden, ist es charakteristisch, daß sie dann entstehen, wenn sich das Gestein bereits infolge der hohen statischen Belastung in einem hohen Spannungszustand befindet. Der hohe Spannungszustand kann direkt durch geologische und tektonische Verhältnisse sowie durch Änderung der statischen Bedingungen verursacht werden. Dabei kommt es zu einer Konzentration der Spannung um die Hohlräume [14].

Infolge der schnellen Belastung wird das Gestein durch Zersplittern um so leichter zerstört, je größer der Spannungszustand bei statischer Belastung ist.

Die Auswirkungen der schnellen Belastung können unter natürlichen Bedingungen sehr intensiv sein, so daß sich auch in sehr festem Gestein Gebirgsschläge ereignen können, wenn schnelle Belastung vorliegt.

Die Gebirgsschläge infolge schneller Belastung sind dann häufiger, wenn der kritische Zustand bei kleiner statischer Belastung erreicht ist und eine verhältnismäßig kleine Intensität dieser Belastung dazu ausreicht, das Gestein durch Zersplittern zu zerstören. Unter bestimmten Voraussetzungen werden diese Bedingungen beispielsweise von der Kohle erfüllt. Der hohe Belastungszustand des Kohleflözes folgt aus den Naturbedingungen (Einfluß der Lagerung durch Gewicht des Deckgebirges usw.). Eine hohe Spannungskonzentration wird auch durch die Tätigkeit des Bergmannes verursacht.

Die schnelle dynamische Beanspruchung, die zu der statischen Belastung hinzukommt, kann auf zwei Arten entstehen.

Eine natürliche schnelle Belastung wird durch die Wirkung der Druckwelle hervorgerufen, die das Gebirge vom Erschütterungszentrum aus durchläuft. Gebirgsschläge, die durch schnelle dynamische Belastung entstehen, kommen z. B. im oberschlesischen Revier vor. Mit ihrer Problematik hat sich z. B. BUDRYK beschäftigt [9].

Künstliche schnelle Belastung entsteht durch die Auswirkungen der Druckwelle, die durch konzentrierte Schießarbeiten oder durch schnellen Abbau bzw. Vortrieb hervorgerufen wird.

Zur besseren Übersicht wird in Tabelle 4 die schematische Aufteilung der Gebirgsschläge, die durch schnelle Belastung entstehen, angegeben.

Tabelle 4. Gebirgsschläge, die durch schnelle Belastung verursacht werden

Art des Gebirgsschlages	Ursachen der schnellen Belastung
Gebirgsschläge, verursacht durch natürliche schnelle Belastung	Schnelle Belastung wird durch eine Druckwelle verursacht, die durch ein Erdbeben hervorgerufen wurde.
Gebirgsschläge, verursacht durch künstliche schnelle Belastung	Schnelle Belastung wird durch eine Druckwelle hervorgerufen, die ihren Ursprung in konzentrierten Schießarbeiten oder im Bruch des Deckgebirges hat.

Für die Gebirgsschläge, die durch künstliche schnelle Belastung hervorgerufen wurden und das vor allem in den Fällen, da die schnelle Belastung durch den Bruch der mächtigen Dachschichten entstand, sind verschiedene Bedingungen charakteristisch. Zunächst ist das ein hoher Spannungszustand, der schon durch die statische Belastung hervorgerufen wurde. Weiterhin ist es die Tatsache, daß man verhältnismäßig leicht durch schnelle Belastung die kritische Belastungsgeschwindigkeit erreicht, so daß das Gestein ausgesprochen spröde und dadurch durch Zersplittern zerstört wird. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Stratigraphie der Dachschichten.

Damit die durch zerstörtes Deckgebirge sowie durch Veränderung der Firste verursachten Folgen sich mit voller Intensität auf das Flöz auswirken können, muß eine Schicht von verhältnismäßig großer Festigkeit auf dem Kohlenflöz aufliegen. Nur unter diesen Voraussetzungen werden die Auswirkungen mit voller Intensität auf das Kohlenflöz übertragen.

Falls sich zwischen diesem Kohlenflöz und der mächtigen festen Hangendschicht andersartige Zwischenschichten befinden, können diese Gesteine als Puffer wirken. Die Intensität der Auswirkungen, die im Bruch der mächtigen Hangendschicht ihre Ursache haben, wird um so kleiner, je mächtiger das weniger feste Zwischenmittel ist und je weniger fest diese Gesteine sind, bzw. je leichter sich diese deformieren und zerstören lassen. Mit anderen Worten: Die durch das Zubruchgehen einer mächtigen Hangendschicht hervorgerufenen Folgen werden sich auf das Kohlenflöz um so weniger auswirken, je größer die Dämpfungseigenschaften des Zwischenmittels sind.

Einige mögliche Fälle sind schematisch auf Bild 11 dargestellt.

In Bild 11 a liegt das feste Hangende (Sandstein) direkt auf dem Flöz auf, wodurch die Gebirgsschlaggefahr besonders groß ist. In Bild 11 b ist ein dämpfendes Zwischenmittel (Tonschiefer) vorhanden. Selbstverständlich wird die dämpfende Wirkung durch Erhöhung der Zwischenmittelmächtigkeit verstärkt (Bild 11 b).

Unter geeigneten Bedingungen kann die Dämpfung so groß sein, daß der Bruch des Hangenden keinen Gebirgsschlag im Kohlenflöz hervorruft.

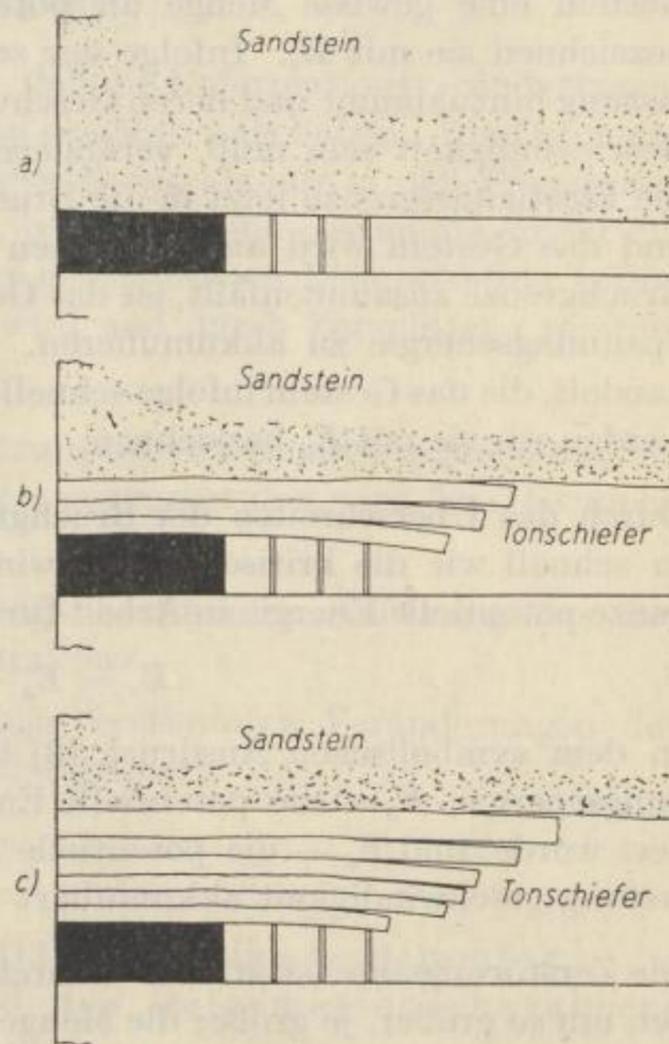


Bild 11. Beispiele von verschiedenen Anordnungen des Hangenden über dem Kohlenflöz

Die Gebirgsschläge, die durch natürliche und künstliche schnelle Belastung verursacht werden, können also unter verschiedenen Bedingungen entstehen, von denen die wichtigsten untersucht werden sollen:

Hoher Spannungszustand des Gesteins

Für derartige Gebirgsschläge ist es charakteristisch, daß das Gestein infolge der statischen Belastung sich in einem hohen Spannungszustand befindet. Die hohe Spannung erleichtert die Auswirkungen der schnellen natürlichen oder künstlichen Belastung für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern.

Geeignete Übertragung der Auswirkungen der schnellen Belastung

Derartige Gebirgsschläge entstehen in Flözen, die durch ihren Spannungszustand, ihre mechanischen Eigenschaften, ihre Lagerung u. ä. keine Dämpfung der Druckwelle hervorrufen, sondern sogar deren Fortpflanzung fördern.

Der Vollständigkeit halber wollen wir noch den Mechanismus der Gebirgsschläge vom energetischen Gesichtspunkt aus betrachten.

Unter den natürlichen Bedingungen bei steigender statischer Belastung wird im Gestein eine gewisse Menge an potentieller Spannungsenergie akkumuliert. Wir bezeichnen sie mit E_s . Infolge der schnellen Belastung, die zu der statischen Belastung hinzukommt und deren Geschwindigkeit mindestens so groß wie die kritische Geschwindigkeit sein muß, verändern sich die Gesteinseigenschaften. Daher geht die Elastizitätsgrenze jetzt in die Bruchgrenze über; die Festigkeit wird vergrößert, und das Gestein wird ausgesprochen spröde. Weil die Elastizitätsgrenze mit der Bruchgrenze zusammenfällt, ist das Gestein in der Lage, für kurze Zeit noch weitere Spannungsenergie zu akkumulieren. Weil es sich hierbei um potentielle Energie handelt, die das Gestein infolge schneller dynamischer Belastung akkumulieren kann, werden wir sie mit E_d bezeichnen.

Durch das Überschreiten der Bruchgrenze bei schneller Belastung, die mindestens so schnell wie die kritische Geschwindigkeit sein muß, wandelt sich plötzlich die ganze potentielle Energie in Arbeit für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern um.

$$E_c = E_s + E_d \quad (3)$$

In dem symbolischen Ausdruck (3) bedeuten E_c — die gesamte potentielle Spannungsenergie, E_s — die potentielle Energie, die durch statische Belastung akkumuliert wurde, und E_d — die potentielle Spannungsenergie, die durch die kritische Belastungsgeschwindigkeit akkumuliert wurde.

Die Zerstörungsintensität und dadurch auch die Intensität des Gebirgsschlages werden um so größer, je größer die Menge der potentiellen Energie ist, die in Arbeit für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern umgewandelt wurde. Aus dem Ausdruck (3) ist ersichtlich, daß diese von der Menge der potentiellen Energie abhängt, die durch die statische Belastung akkumuliert wurde, wobei die Belastungsart sehr

wichtig ist, und auch von der Menge der potentiellen Energie im Gestein, die infolge der Belastung mit kritischer Geschwindigkeit entstand. Eine wichtige Problematik der künftigen Forschung wird die Bestimmung des optimalen Verhältnisses und der minimal nötigen Mengen von E_s und E_d sein, die in einem Gestein dazu ausreichen, daß es durch Zersplittern zerstört wird. Darin ist auch die Bestimmung der notwendigen und hinreichenden Werte von statischen und dynamischen Faktoren, die einen Gebirgsschlag durch schnelle Belastung bedingen, enthalten. In dem Falle, daß ein Kohlenflöz Gase enthält, die an Kohle gebunden sind, kommt bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern eine Gasexpansion zur Wirkung, die die gänzliche Pulverisierung der Kohle zur Folge hat. Die Gasteilchen, die vorher an die Mineralien gebunden waren, zersplittern schnell bei der Mineralzerstörung in einzelne Teilchen und verursachen die Pulverisierung. Die Anwesenheit des Gases erhöht die Intensität der Zerstörung durch Zersplittern und damit auch die Intensität des Gebirgsschlages.

Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung des Verformungscharakters

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern muß nicht ausschließlich durch schnelles Belasten verursacht werden. Das Gestein kann durch Zersplittern auch unter anderen Bedingungen, die zum Beispiel durch eine bestimmte Änderung des Deformationscharakters gekennzeichnet sind, zerstört werden [6] [7].

Schon vor vielen Jahren ist festgestellt worden, daß die Deformationsveränderungen einen großen Einfluß auf den Spannungszustand des Materials haben. Die Deformationsänderung hat aber eine weitgehendere Auswirkung als nur in den Fragen der Spannung. Denken wir dabei an die Gesteine, bei denen eine bestimmte Änderung des Deformationscharakters eine Änderung der mechanischen Eigenschaften verursacht in dem Sinne, daß das Gestein spröde wird und durch Zersplittern zerstört werden kann [10].

Als Ursachen können wir bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern, die durch bestimmte Änderungen des Deformationscharakters hervorgerufen wird, zwei Gruppen unterscheiden.

1. Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Änderung der Belastungsart und damit des Deformationscharakters.
2. Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Veränderungen des Deformationscharakters bei der gleichen Belastungsart.

Zunächst zur ersten Gruppe:

Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Veränderungen der Belastungsart und des Deformationscharakters

Infolge der Belastung wird das Gestein deformiert. Die mechanische Belastung verursacht nicht die Deformation der Massenteilchen, sondern ausschließlich ihrer Bündel, durch die diese Teilchen verbunden sind.

Wenn ein fester Stoff aus Molekülen besteht, die sich aus Atomen zusammensetzen, dann verlaufen die Deformationsprozesse in den sogenannten Valenzbindungen zwischen den einzelnen Atomen. In dem Falle, daß durch Verlust oder Anschluß einer elektrischen Ladung bei einem Atom dieses in ein elektrisch geladenes Teilchen (Ion) übergeht, verlaufen die Deformationsprozesse in den elektrostatischen Anziehungskräften, die die Bindung zwischen den positiven und negativen Ionen hervorrufen.

Der Vereinfachung wegen werden wir die Deformationsprozesse im Kristall betrachten, obwohl wir wissen, daß die Gesteinszusammensetzung viel komplizierter ist und daß zwischenkristalline Bindungen und natürliche Störungen zur Geltung kommen. Aus demselben Grunde werden wir ein Ionenkristall betrachten, weil analoge Beziehungen auch für Valenzkristalle gelten.

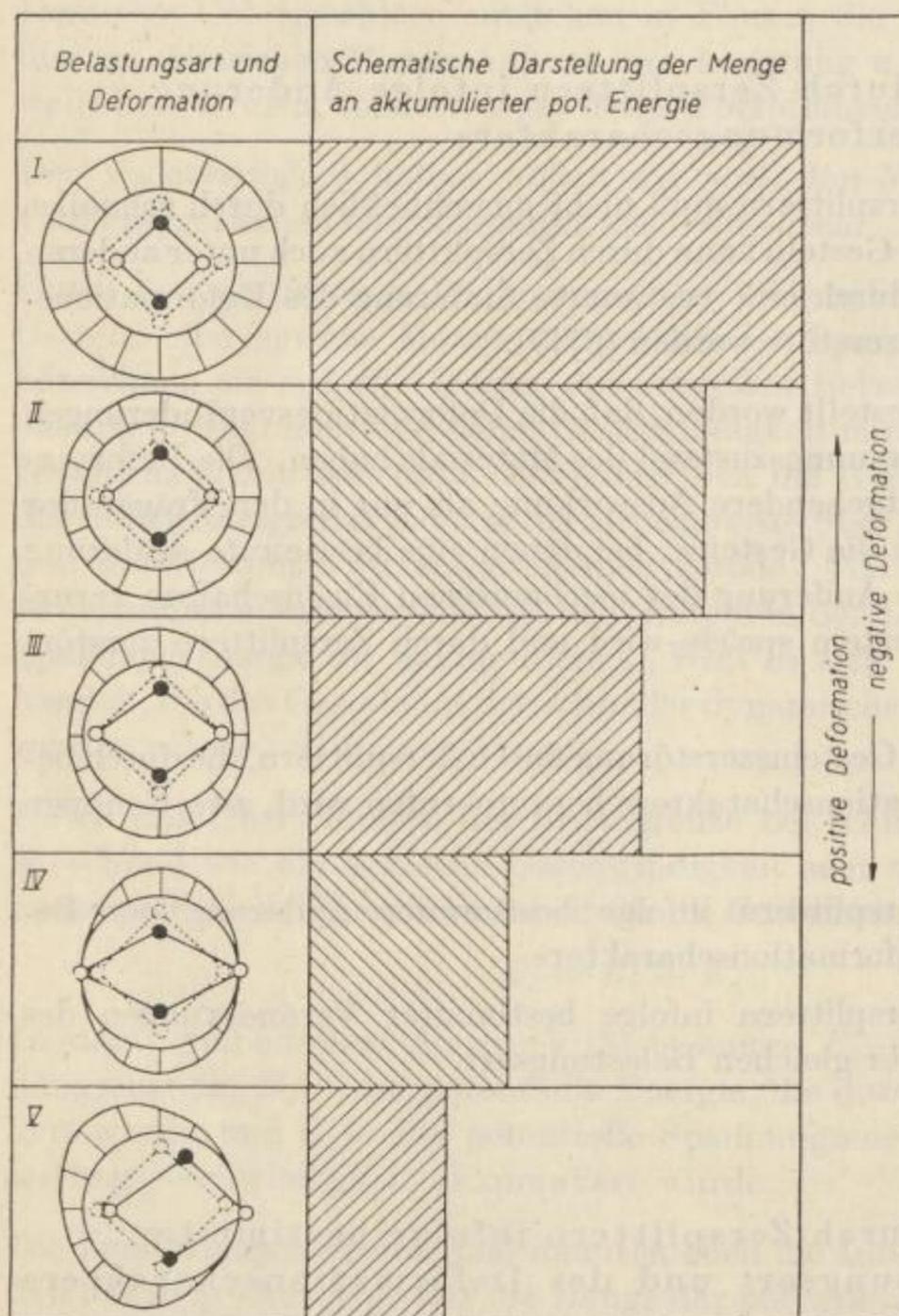


Bild 12. Schema der Belastungsart, des Deformationscharakters und des Akkumulationsvermögens von potentieller Spannungsenergie

Wir wissen, daß das Gestein die maximale Menge an potentieller Spannungsenergie bei der Belastung an der Elastizitätsgrenze akkumulieren kann. Der Wert der Elastizitätsgrenze hängt aber nicht nur von der Belastungsgeschwindigkeit, sondern auch von der Belastungsart ab. In Abhängigkeit von der Belastungsart zeigt das Gestein einen bestimmten Deformationscharakter.

Bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung der Belastungsart und des Deformationscharakters interessiert uns am meisten der Einfluß der Belastungsart und die von ihm abhängende Änderung des Deformationscharakters [11].

Beurteilen wir den Einfluß der Belastungsart auf den Verformungscharakter und auf die Akkumulationsfähigkeit der potentiellen Spannungsenergie an einem schematischen Ionenkristall, der durch zwei positive und zwei negative Ionen gebildet wird. Die einzelnen

Fälle der Belastungsart, des Deformationscharakters und die Menge der akkumulierten Spannungsenergie sind aus Bild 12 ersichtlich. Die Menge der potentiellen Energie ist durch schraffierte Flächen dargestellt.

Die Modelldarstellung des Ionenkristalls und seine Deformation, wie das in Bild 12 gezeigt wird, stimmt mit den Gegebenheiten überein. Neuere Untersuchungen an Ionen- und Valenzkristallen haben eindeutig nachgewiesen, daß die Modellvorstellung über die Verteilung der Massenteilchen im Kristallgitter völlig mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Mit Hilfe von speziellen projizierenden Elektronenmikroskopen kann man eine so starke Vergrößerung erreichen, daß man den Aufbau der Kristalle betrachten kann. In Bild 13 ist eine Aufnahme eines Monokristalls, die durch ein Projektionsmikroskop gemacht wurde, dargestellt. Die Aufnahme ist aus der Arbeit von A. P. KOMAR und JU. N. TALANIN übernommen worden [12].

Auf Bild 12 sind die einzelnen Belastungsfälle und ihre entsprechenden Verformungsgrade mit den römischen Zahlen I bis V bezeichnet.

Zu jeder bestimmten Belastungsart gehört auch ein bestimmter Verformungsgrad. Einer bestimmten Deformation entspricht nur eine bestimmte Menge an potentieller Spannungsenergie, die das Gestein akkumulieren kann. Auf Bild 12 wird bei den einzelnen Symbolen, die die Belastungsarten und die Deformation darstellen, durch schraffierte Flächen die Menge der potentiellen Spannungsenergie, die das Gestein bei bestimmtem Deformationsgrad und bestimmter Belastungsart an der Elastizitätsgrenze akkumulieren kann, deutlich gemacht.

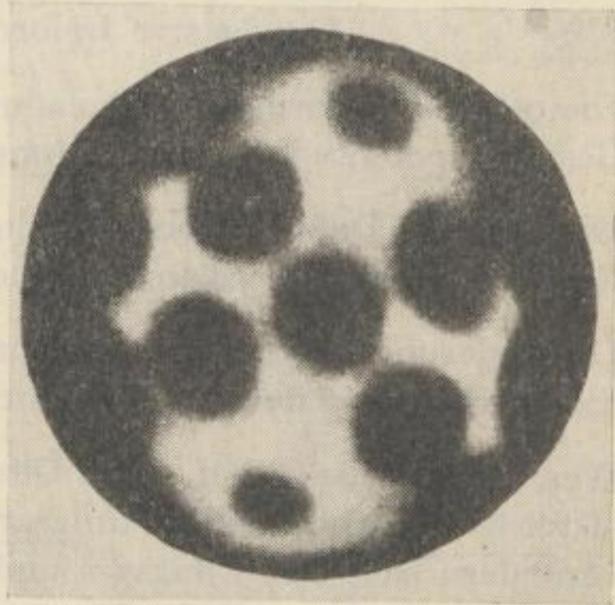


Bild 13. Aufnahme eines Monokristalls mit einem Projektionsmikroskop nach KOMAR und TALANIN [12]

Bei der Belastung können die einzelnen Belastungscharakteristiken unterschieden werden. Das bedeutet, daß zum Beispiel die Belastung vergrößert oder verkleinert werden kann, ohne daß dabei die Belastungsart, d. h. der Charakter der Belastung, verändert werden muß. Wir können zum Beispiel auch ein Gestein durch einen größeren oder kleineren allseitig gleichmäßigen Druck belasten; die Art oder der Charakter der Belastung bleibt dabei unverändert, weil das Gestein durch allseitig gleichmäßigen Druck belastet wurde.

Genauso können wir die Deformationscharakteristik definieren. So wird zum Beispiel das Gestein bei größerem oder kleinerem allseitig gleichmäßigen Druck größere oder kleinere allseitig gleichmäßige Deformation aufweisen. Dabei bleibt die Deformationscharakteristik gleich, weil die Deformation allseitig und gleichmäßig bleibt, wie das auf Bild 12 durch das Symbol I dargestellt wird.

Die Belastungsart und der Deformationscharakter hängen eng voneinander ab. Bei gleicher Belastungsart ist der Deformationscharakter unveränderlich, und umgekehrt, ändert sich die Belastungsart, verändert sich auch der Deformationscharakter.

Mit der Veränderung des Deformationscharakters ändert sich also auch die Eigenschaft, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren. Dabei werden auch solche Grundeigenschaften des Gesteins verändert, wie zum Beispiel die Bruchfestigkeit.

Nach der Fähigkeit des Gesteins, potentielle Spannungsenergie in Abhängigkeit vom Deformationscharakter zu akkumulieren, können wir alle möglichen Deformationsfälle in zwei Gruppen aufteilen.

- a) positive Deformation
- b) negative Deformation

Die positive Deformation ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die Eigenschaft des Gesteins, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren, vergrößert.

Die negative Deformation ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die Eigenschaft des Gesteins, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren, verkleinert.

Die Änderung der positiven Deformation in negative oder umgekehrt wird aber durch die Veränderung der Belastungsart hervorgerufen.

Wenn zum Beispiel bei einem Gestein, das in der Art nach Symbol V (Bild 12) belastet wurde, sich die Belastungsart nach den Symbolen IV, III, II oder I verändert, verändern sich Belastungsart und Deformationscharakter in dem Sinne, daß sich die Menge an potentieller Spannungsenergie vergrößert. Die Deformationen verlaufen infolge dieser Vergrößerung positiv.

Es wird vorausgesetzt, daß das Gestein nach dem Symbol I belastet wird. Wenn wir nun die Belastungsart nach den Symbolen II, III, IV oder V verändern, ändert sich selbstverständlich auch die Deformationscharakteristik. Die Menge an potentieller Spannungsenergie wird geringer, die Deformation ist also negativ. Durch die Belastungsänderung in diesem Sinne verändern sich die Gesteinseigenschaften. Bei Betrachtung der Festigkeit wird deutlich, daß bei negativer Deformation die Bruchgrenze kleiner wird.

Wenn wir die ursprüngliche Deformation nach dem Symbol II durch die Veränderung der Belastung nach dem Symbol IV umwandeln, dann verkleinert sich das Speichervermögen für die potentielle Spannungsenergie, d. h., die ursprünglich positive Deformation erfährt die Umwandlung in eine negative.

Wenn wir umgekehrt die ursprüngliche Deformation nach Symbol V in die Deformation nach Symbol II verändern, wird das Speichervermögen für potentielle Spannungsenergie größer, also hat sich die ursprünglich negative Deformation in eine positive umgewandelt.

Bei bestimmter Änderung der positiven Deformation in negative kann es zu einer so großen Veränderung der Gesteinseigenschaften und dadurch auch des Speicherungs-

vermögens für potentielle Spannungsenergie kommen, daß das Gestein durch Zersplittern zerstört werden kann.

Wir wollen jetzt den Mechanismus dieser Zerstörungsart betrachten.

Wir denken uns einen Gesteinswürfel, den wir durch einseitigen Druck belasten. Bei dieser Belastungsart erreichen wir die Elastizitätsgrenze. Die verlaufenden Deformationen haben unveränderlichen Charakter und sind infolge der wachsenden Belastung ein und derselben Art positiv. Die Menge der akkumulierten potentiellen Spannungsenergie vergrößert sich, und das Maximum wird bei Belastung an der Elastizitätsgrenze erreicht. Diese Menge der potentiellen Spannungsenergie, die im Gestein bei der positiven Deformation akkumuliert wird, bezeichnen wir mit E_p . Ihre Menge ist auf Bild 14a symbolisch durch die schraffierte Fläche dargestellt.

Mit Hilfe einer einfachen Vorrichtung, die auf Bild 14 dargestellt wird, können wir die Belastungsart und dadurch auch den Deformationsgrad des belasteten Gesteinswürfels verändern. Auf Bild 14 bedeutet: 1 — Gesteinsprüfkörper, 2 — Stahlplatten, 3 — Walzenlager, 4 — Stahlplatte, die auf dem Lager verschiebbar ist.

Wenn wir außer der unveränderten einseitigen Belastung noch die Kraft S wirken lassen, wie das aus Bild 14b hervorgeht, verschiebt sich die Platte 4. Weil die Stahlplatten 2 und 4 so eingerichtet sind, daß der Gesteinskörper nicht rutschen kann, kommt es unter der Wirkung der Kraft S zu einer Veränderung der Belastung des Gesteinskörpers und dadurch zu einer Veränderung des Deformationscharakters. Vereinfacht können wir sagen, daß der Körper auf Schub beansprucht wird.

Zur besseren Anschauung ist auf Bild 15a eine Photographie der isochromatischen Linien eines photoelastischen Modells, das einen durch einseitigen Druck belasteten

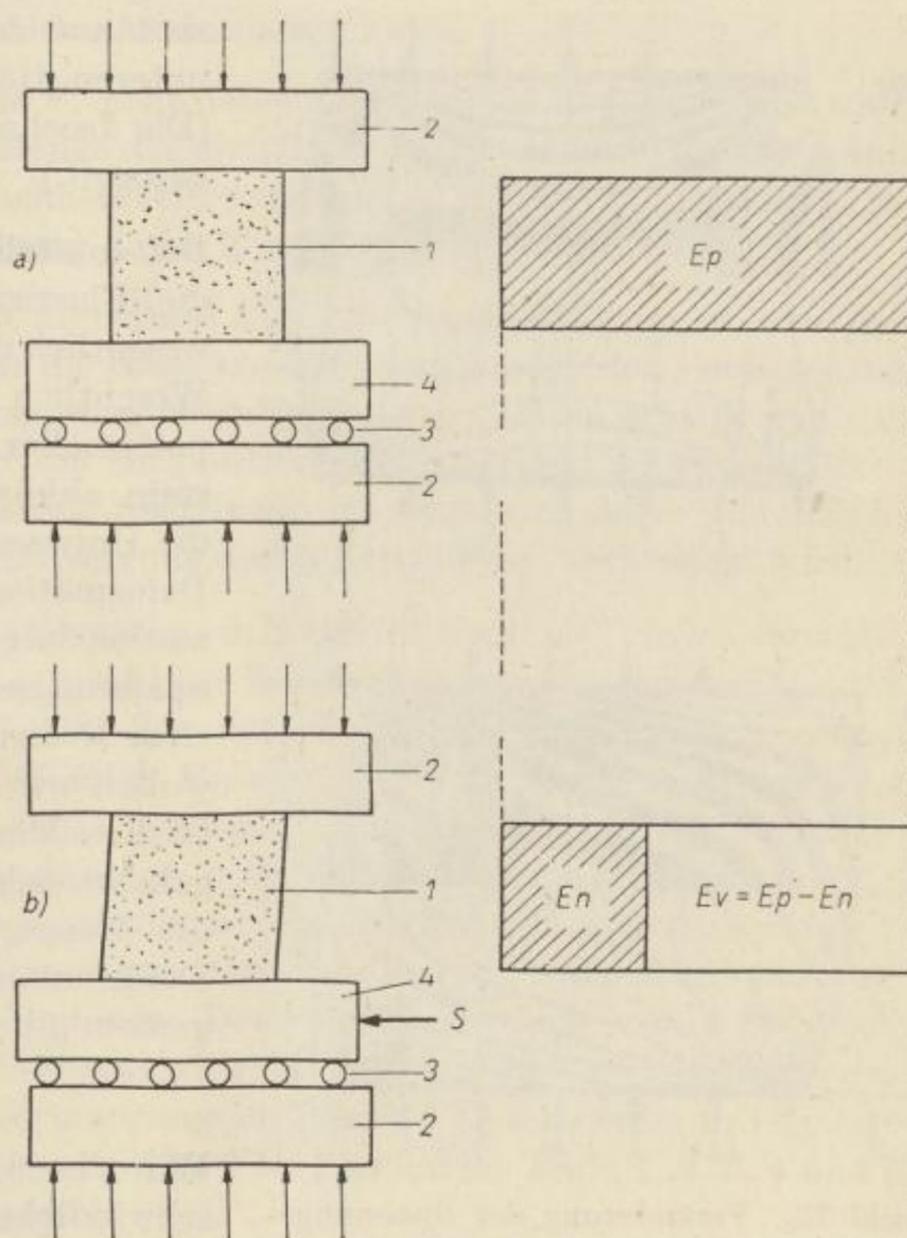


Bild 14. Schema einer Belastungsvorrichtung für die Zerstörung durch Zersplittern infolge Änderung von Belastung und Deformation

Körper darstellt, abgebildet. Es handelt sich also wieder um den Fall, der auf Bild 14a dargestellt wurde. Bild 15b zeigt dasselbe photoelastische Modell, das außer der einseitigen Belastung, die unverändert blieb, noch zusätzlich die Belastung durch die Kraft S erfuhr. Die Kraft S bewirkte die Änderung der Belastung und des Deformationscharakters. Der Körper wird dabei auf Abscheren beansprucht.

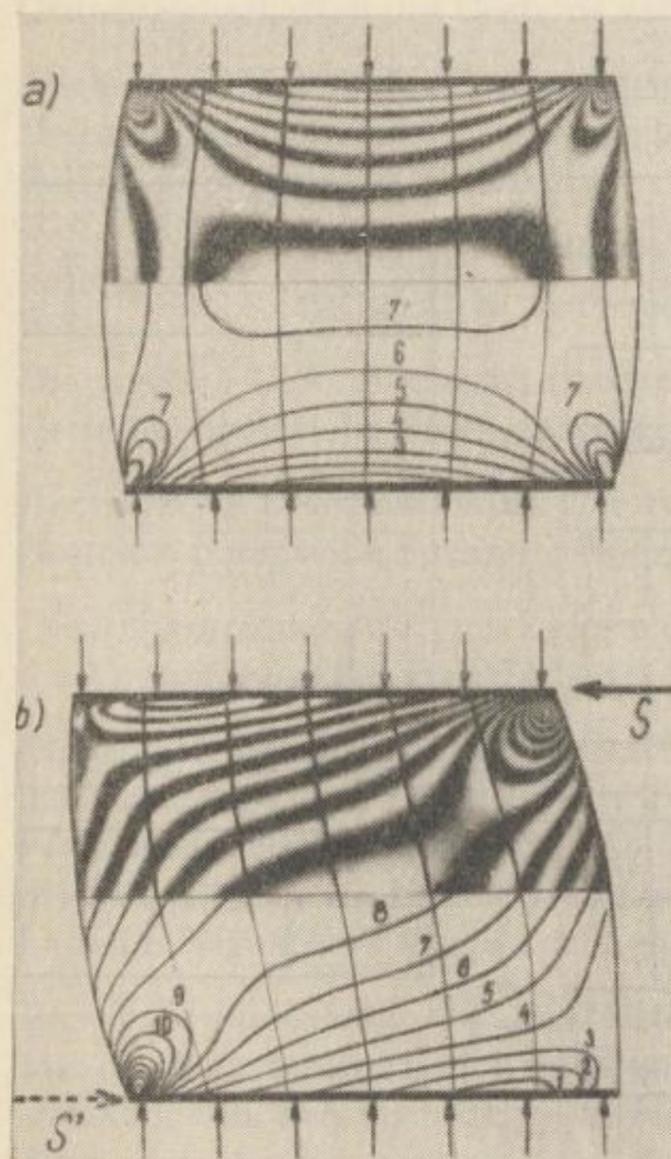


Bild 15. Veränderung der Spannungsverteilung — durch isochromatische Linien bestimmt —, die durch die Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters hervorgerufen wird

die ein Gestein bei negativer Deformation binden kann, ist wesentlich kleiner als bei vorangegangener positiver Deformation.

Infolge der Belastungsart und der Umwandlung der positiven Deformation in negative befindet sich in einem bestimmten Moment in dem belasteten Gesteinskörper eine gewisse Menge an potentieller Spannungsenergie, die das Gestein bei der neuen negativen Deformation nicht mehr binden kann. Diese Menge an potentieller Energie können wir als überflüssig bezeichnen. Wir bezeichnen sie mit E_v . Der Wert der

Die Ordnungen der isochromatischen Linien sind auf den Bildern 15a und 15b in der unteren Hälfte jeder Abbildung angegeben. (Die Isochromaten wurden mit Tusche ausgezogen.)

Bei zusätzlicher Schubbeanspruchung liegen die Elastizitäts- und die Festigkeitsgrenze wesentlich tiefer als bei Druckbeanspruchung. Wesentlich kleiner ist auch die Menge an potentieller Spannungsenergie, die das Gestein akkumulieren kann. Auf Bild 14b ist die Umwandlung der ursprünglich positiven Deformation (Bild 14a) in negative Deformation dargestellt. Die Menge der potentiellen Spannungsenergie, die das Gestein bei negativer Deformation zu akkumulieren vermag, wollen wir mit E_n bezeichnen. Auf Bild 14b ist diese Menge durch eine schraffierte Fläche gekennzeichnet. Sie ist wesentlich kleiner als die Menge, die das Gestein bei positiver Deformation zu akkumulieren vermag. Allgemein gilt:

$$E_n < E_p \quad (4)$$

Wir wissen, daß bei einer bestimmten Geschwindigkeit eine bestimmte Menge potentieller Spannungsenergie proportional ist. Infolge der negativen Deformation verringert sich das Vermögen des Gesteins, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren. Der Wert der potentiellen Spannungsenergie,

überflüssigen Spannungsenergie geht aus dem Ausdruck

$$E_v = E_p - E_n \quad (5)$$

hervor.

Der Wert der überflüssigen Menge an potentieller Spannungsenergie ergibt sich aus der Differenz der Menge an potentieller Energie, die im Gestein bei positiver Deformation akkumuliert wird, und der Menge der potentiellen Spannungsenergie, die das Gestein bei negativer Deformation akkumulieren kann.

Die überflüssige potentielle Energie E_v geht dabei selbstverständlich nicht verloren, sondern sie wandelt sich um. Die Menge der überflüssigen potentiellen Energie kann so große Werte erreichen, daß die schnelle Umwandlung in Arbeit (bei negativer Deformation des Gesteins) die Zerstörung durch Zersplittern hervorruft.

Unter der Voraussetzung, daß der Unterschied $E_p - E_n$ genügend groß ist, wird das Gestein ausgesprochen spröde. Für die Gesteinszerstörung infolge der Veränderung der Belastung und der Deformation ist es charakteristisch, daß ein erheblicher Teil der potentiellen Spannungsenergie, die bei positiver Deformation im Gestein akkumuliert, bei der negativen Deformation überflüssig wird und sich dabei plötzlich in Arbeit umwandelt, für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern verbraucht wird.

Die Umwandlung der positiven Deformation in negative kann sich unter verschiedenen Bedingungen vollziehen. Die Anzahl der Kombinationen ist sehr groß, so daß man nicht alle Fälle behandeln kann. Zur besseren Veranschaulichung sind auf Bild 16 schematisch einige unvollständige Reihen der Veränderung von positiver Deformation in negative aufgezeichnet worden. Die Schemas sind für einen belasteten Würfel gedacht. Seine ursprünglich positive Deformation wird durch Wegfall oder Hinzufügen einer Belastungsrichtung in negative Deformation umgewandelt. In der ersten Reihe sehen wir den Ausgangszustand bei allseitig gleichmäßigem Druck. Dieser Fall wird mit I bezeichnet, und seine Deformation wird als positiv gewertet. Durch stufenweisen Wegfall der Belastungsrichtungen verändert sich die Deformationsart in dem Sinne, daß sich die ursprünglich positive Deformation in negative umwandelt. Zum besseren Vergleich mit dem Fall I haben die Fälle 1, 2, 3, 4 und 5 in der ersten Zeile negative Deformation.

Der Ausgangszustand, den wir als positive Deformation werten, braucht nicht durch einen allseitig gleichmäßigen Druck repräsentiert zu werden, sondern kann zum Beispiel auch durch eine allseitig ungleichmäßige Belastung entstehen. Ein Beispiel dafür ist unter A auf Bild 16 in der zweiten Reihe aufgezeichnet. Dieser Fall stellt eine positive Deformation in bezug auf die Fälle derselben Reihe dar, die durch 1, 1a, 2, 2a, 3, 3a usw. bezeichnet werden. Bei den Fällen 1, 1a, 2, 2a usw. wird infolge der Änderung der Belastung, d. h. durch schrittweises Beseitigen der einzelnen Belastungen, die ursprünglich positive Deformation in negative umgewandelt. Dabei wird die Fähigkeit des Gesteins, potentielle Spannungsenergie zu akkumulieren, immer kleiner.

Die negative Deformation wird nicht nur durch Beseitigen der einzelnen Belastungsrichtungen bei allseitig gleichmäßiger oder ungleichmäßiger Belastung hervorgerufen,

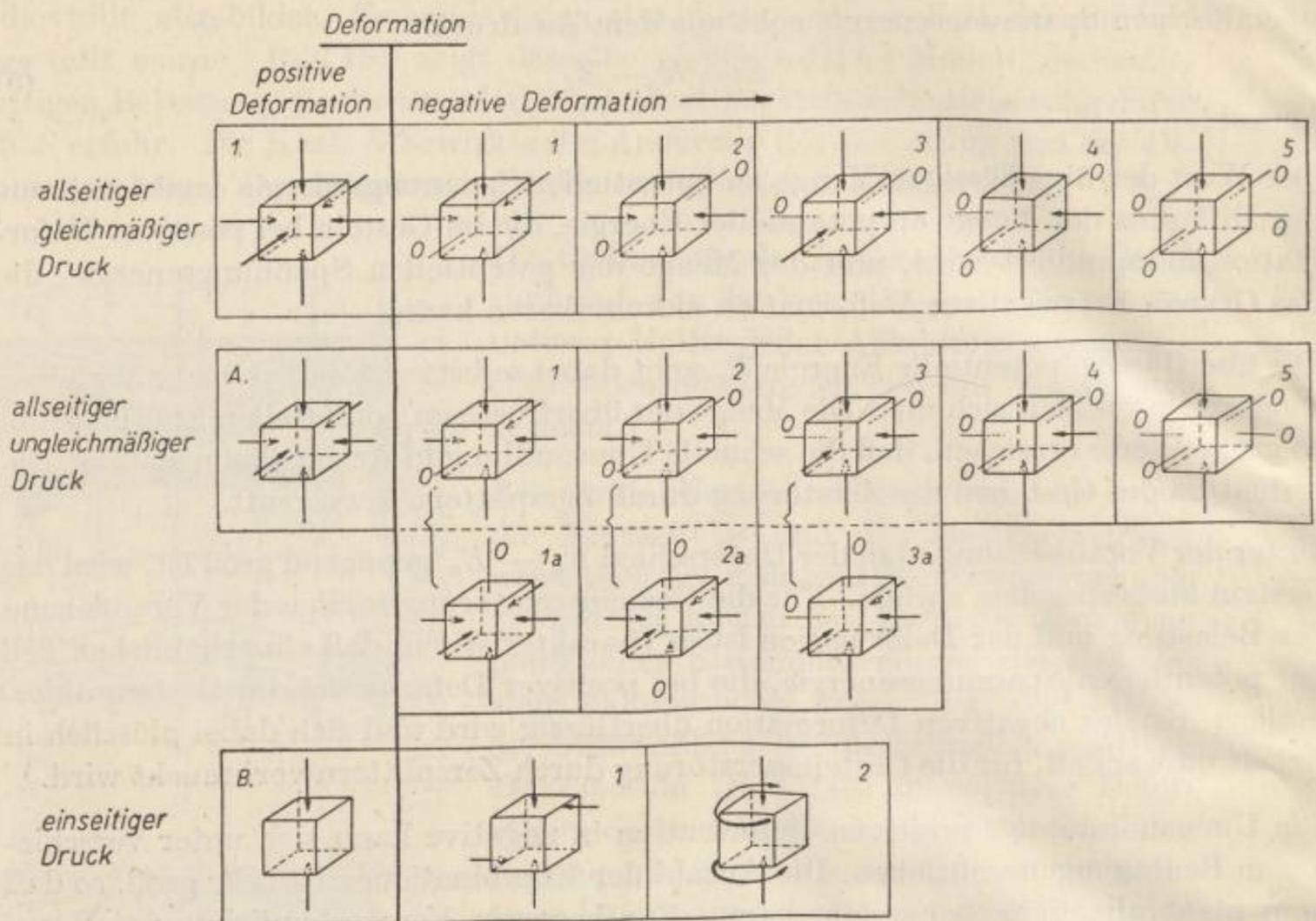


Bild 16. Belastungsschemas und symbolische Darstellung der Umwandlung von positiver in negative Deformation

wie das schematisch auf Bild 16 in der ersten und zweiten Reihe dargestellt wird. Der Ausgangszustand der positiven Deformation kann zum Beispiel auch durch einseitigen Druck entstehen. Das ist auf Bild 16 als Ausgangszustand in der dritten Reihe dargestellt worden, der mit dem Buchstaben B bezeichnet wird. Die Umwandlung der positiven Energie in negative erfolgt dann durch weiteres Hinzufügen von Belastungen. Schematisch wird das in der dritten Reihe durch Fall 1 und 2 dargestellt. (Der Fall 1 ist dem entsprechenden Fall auf Bild 14b analog.)

Es könnten noch beliebig viele Reihen ausgearbeitet werden, bei denen sich die positive Deformation in negative umwandelt. Wir werden uns aber mit den drei Reihen begnügen, die auf Bild 16 gezeigt werden, weil sie in den Grundzügen die natürlichen Bedingungen charakterisieren. Sie geben sowohl Aufschluß über die natürliche positive als auch über die negative Deformation, die durch Bergbauarbeiten hervorgerufen wurden.

Wir wollen jetzt die Fälle der Veränderung der Belastungsart bzw. der Umwandlung der positiven Deformation in negative betrachten, bei denen $E_p - E_v$ so groß ist, daß die schnelle Umwandlung in Arbeit die Gesteinszerstörung durch Zersplittern bedingt.

Nehmen wir den Fall an, der Prüfkörper aus Gestein wird unter der Presse in der Vorrichtung, die auf Bild 14 dargestellt ist, belastet. Die ursprünglich positive De-

formation, die durch einseitige Belastung verursacht wird, verwandeln wir in negative Deformation, wenn wir an der Druckfläche des Körpers eine Kraft S wirken lassen (Bild 14). Im Grunde genommen handelt es sich um Veränderung der positiven Deformation nach dem Muster B (in der dritten Reihe im Bild 16) in negative Deformation, die in derselben Reihe durch den Fall 1 dargestellt wird.

Auf Bild 17 ist dieser Umwandlungsfall im oberen Teil aufgezeichnet, und zwar wird der Zustand dargestellt, bei dem der Körper positive Deformation besitzt, wie dies im Grundfall in der dritten Reihe auf Bild 16 gezeigt wird.

Die Änderung der Belastungsart deckt sich mit dem Fall 1 in der dritten Reihe auf Bild 16.

Im unteren Teil des Bildes 17 wird Gestein (Granit) gezeigt, das durch Zersplittern infolge Änderung der Belastungsart und folglich auch durch Umwandlung der positiven Deformation in negative zerstört wurde. Das Prinzip der Umwandlung der positiven Deformation in negative wird hier durch die schematische Darstellung der Belastungsart und ihrer Änderung klargestellt. Der Fall B hat sich in den Fall 1 umgewandelt (oberer Teil von Bild 17).

Verläuft die Umwandlung der positiven in die negative Deformation unter kritischen Bedingungen, d. h. genügend schnell, so daß die potentielle Spannungsenergie groß genug ist, um die Gesteinszerstörung durch Zersplittern auszulösen, dann können durch die Änderung der Belastungsart und der Deformation nach dem Prinzip, das im oberen Teil des Bildes 17 dargestellt ist, verschiedene Gesteine durch Zersplittern zerstört werden.

Beispiele sind in den Bildern 18 (Basalt), 19 (Kalkstein) und 20 (Steinkohle) wiedergegeben.

Von der einseitigen Belastung (nach Beispiel 1 dritte Reihe des Bildes 16) ausgehend, kann eine sehr starke Umwandlung von positiver in negative Deformation dadurch erreicht werden, daß der Körper, der nach B belastet wird, auf Torsion beansprucht

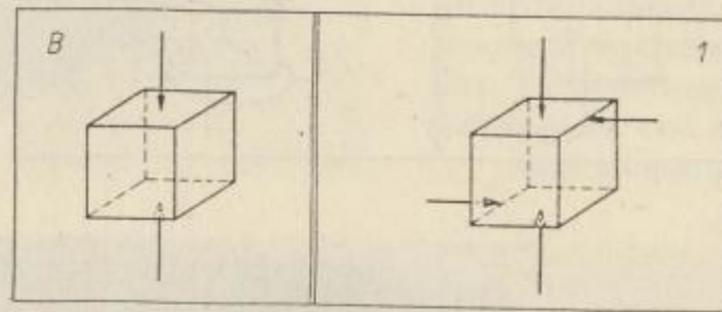


Bild 17. Zerstörung von Granit durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters. Die Symbole der belastenden Komponenten sind im oberen Teil der Abbildung dargestellt

wird (Bild 16, Fall 2). Dabei kann man derart große Unterschiede von $E_p - E_n$ erreichen, daß auch solche Stoffe, die als plastische Stoffe bekannt sind, zum Beispiel natürlicher Asphalt, durch Zersplittern zerstört werden können.

Auf dem oberen Teil von Bild 21 ist das Prinzip der Änderung der Belastungsart, die die starke Umwandlung der positiven Deformation in negative verursacht, dargestellt.

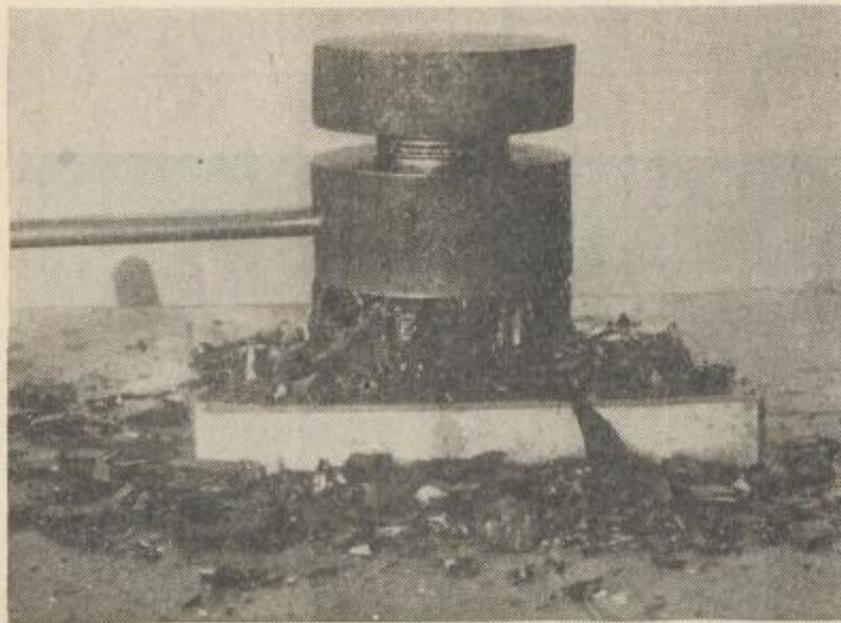
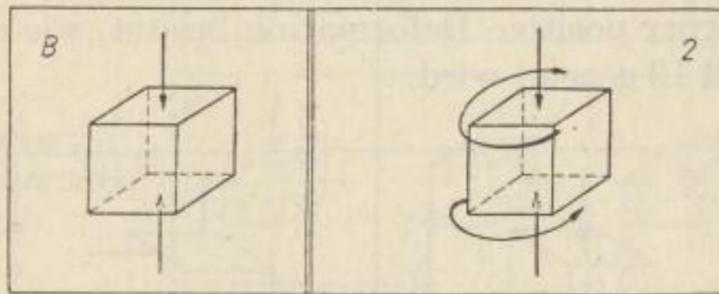


Bild 21. Zerstörung von natürlichem Asphalt durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters. Die Symbole der Belastung befinden sich im oberen Teil des Bildes

tieller Energie, die aus dem Unterschied $E_p - E_n$ entsteht, genügend groß ist, wird das Gestein durch Zersplittern zerstört.

Einen derartigen Fall können wir sehr anschaulich demonstrieren, wenn wir einen allseitig ungleichmäßig belasteten Körper (zum Beispiel Steinkohle) nach Fall A in der zweiten Reihe des Bildes 16 in einer Richtung plötzlich entlasten.

Durch die Belastungsveränderung wandelt sich die ursprünglich positive Deformation in negative um.

Das Prinzip der Belastungsänderung und die dadurch hervorgerufene Deformationsumwandlung ist im oberen Teil (vgl. Bild 16) des Bildes 22 angegeben. Der untere Teil des Bildes zeigt Kohle, die durch Zersplittern zerstört wurde. Außerdem ist auch die Vorrichtung zu erkennen, mit der die Belastungs- und damit die Defor-

Das Prinzip ist mit dem Fall in der dritten Reihe (Fall B und 2) auf Bild 16 identisch. Auf dem unteren Teil von Bild 21 befindet sich eine Aufnahme des Asphalts, der durch Zersplittern infolge der Änderung der Belastungsart und Umwandlung der positiven Deformation in negative nach dem Prinzip des oberen Bildteiles zerstört wurde.

Die Belastungsänderung und dadurch auch die Umwandlung von positiver in negative Deformation wurde bei dem Asphaltkörper mit einer Vorrichtung erreicht, die auf Bild 21 gezeigt wird. Bei allseitiger Belastung kann die Gesteinszerstörung durch Zersplittern dadurch erreicht werden, daß man eine Belastungsrichtung wegfällen läßt. Dadurch ändert sich auch die Belastungsart und die Deformation. Wenn dabei die Bedingung erfüllt ist, daß die überflüssige Menge an potentieller

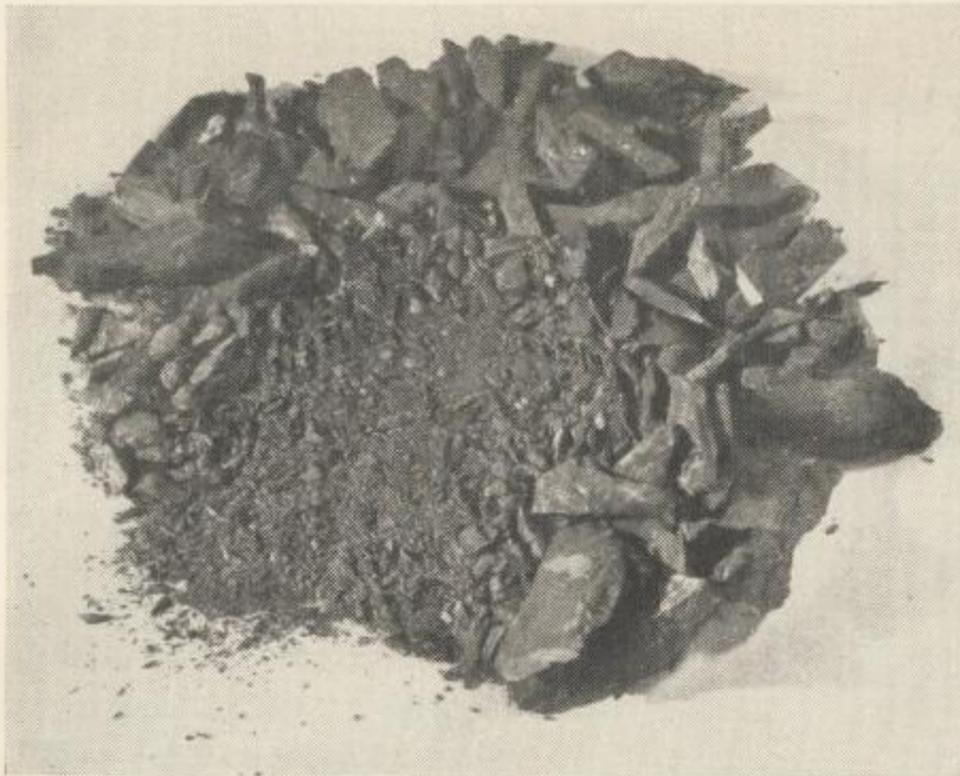


Bild 18. Basalt, zerstört durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters



Bild 19. Kalkstein, zerstört durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters



Bild 20. Steinkohle, zerstört durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters

mationsänderung hervorgerufen wird (in diesem Fall durch plötzliche Beseitigung einer Stahlwand).

Es ist aber klar, daß Zerstören durch Zersplittern infolge Änderung der Belastungsart und Deformation auch durch andere Kombinationen des schnellen Beseitigens von Belastungsvorrichtungen, die zuvor die allseitige ungleichmäßige Belastung bedingt hatten, erreicht werden kann. Es genügt zum Beispiel, wenn wir die ursprüngliche Belastung nach dem Fall A (in der zweiten Reihe auf Bild 16) in die Belastungsart 5 in der gleichen Reihe abwandeln.

Wenn die Änderung der Belastungsart und der Deformation nicht unter kritischen Bedingungen verläuft, so daß es nicht zu einer Gesteinszerstörung durch Zersplittern kommt, dann wird die überflüssige potentielle Spannungsenergie für die Deformationsprozesse und höchstens zu einer Zerstörung durch Zerklüften verbraucht.

Solange das Gebirge in natürlicher Lagerung nicht durch abgebaute Räume zerstört wird, hat das Gestein positive Deformation. Durch das Abbauen wird die Belastungsart des Gesteins um die Grubenbaue und natürlich auch der Charakter der Deformation des Gesteins in dem Sinne verändert, daß die positive Deformation in negative übergeht. Wenn dabei der Unterschied $E_p - E_n$ verhältnismäßig klein und das Gestein verhältnismäßig leicht plastisch deformierbar ist, dann wird die überflüssige potentielle Spannungsenergie zur Bildung einer bleibenden Deformation des Gesteins, das sich unmittelbar in der Umgebung des abgebauten Raumes befindet, verbraucht. Das Gestein wird dabei in der Richtung des kleinsten Widerstandes, d. h. in Richtung abgebauter Raum, deformiert.

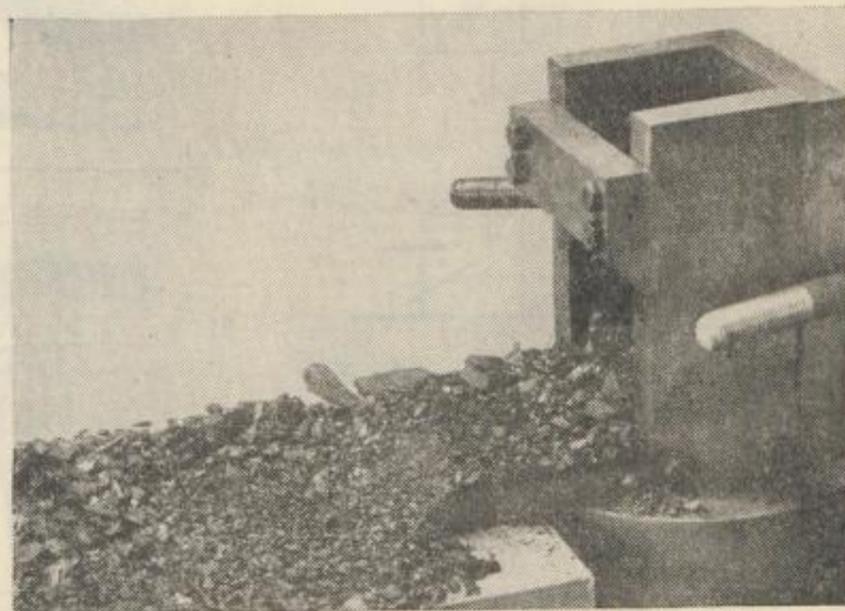
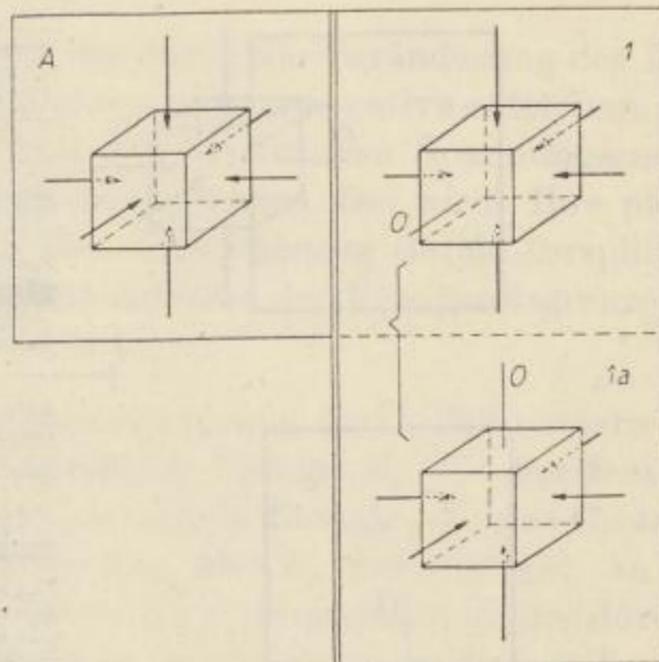


Bild 22. Kohlezerstörung durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastungsart (eine Belastungsrichtung wird plötzlich beseitigt) und des Deformationscharakters. Die Symbole der Belastung befinden sich im oberen Teil des Bildes

Einige Beispiele für bleibende Verformung, die durch Änderung der Belastung und der Deformation hervorgerufen wird, sind schematisch auf Bild 23 dargestellt. Es handelt sich dabei um die bleibende Deformation von Gesteinsschichten in der Um-

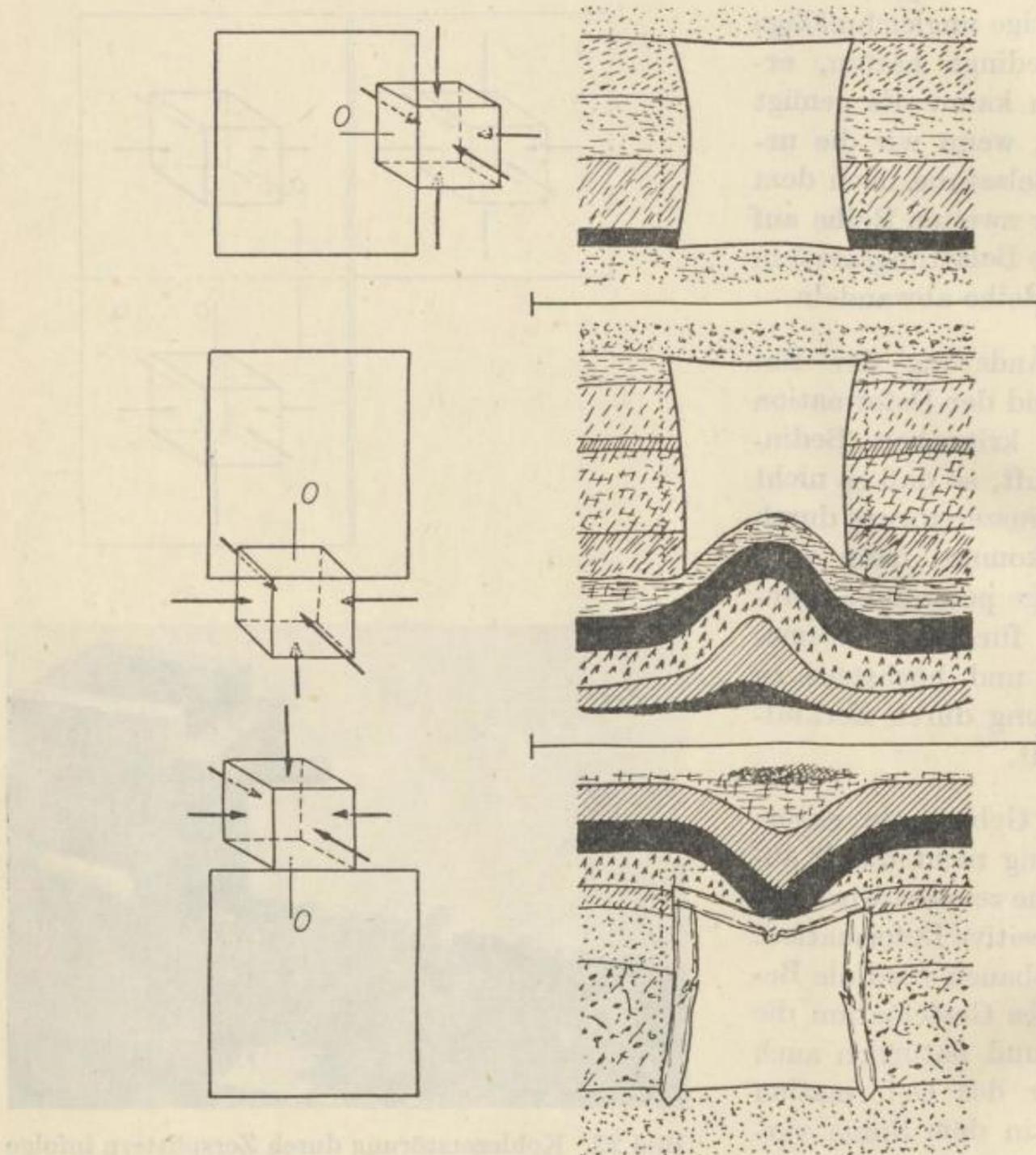


Bild 23. Einige Fälle der Deformation des Gesteins in unmittelbarer Nähe vom abgebauten Raum

gebung der Strecke. Der erste Fall auf Bild 23 zeigt die Deformation der seitlichen Stöße, der zweite die des Liegenden und der dritte die des Hangenden. Das Prinzip der Änderung der Belastungsart und der Umwandlung von positiver Deformation in negative wird links von jedem Fall auf Bild 23 erläutert.

Gebirgsschläge infolge Änderung der Belastungsart und des Deformationscharakters

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Änderungen der Belastungsart und des Deformationscharakters kennzeichnet im Prinzip die Gebirgsschläge dieser Art.

Der Mechanismus der Gebirgsschläge, die durch die Veränderung der Belastungsart und der Umwandlung von positiver Deformation in negative entstehen, zeichnet sich dadurch aus, daß ein erheblicher Teil der potentiellen Spannungsenergie, die im Gestein bei positiver Deformation akkumuliert wird, frei wird. Ihre plötzliche Umwandlung in Arbeit verursacht die Gesteinszerstörung durch Zersplittern. Dieser Prozeß verläuft verhältnismäßig viel höher über der Festigkeitsgrenze, als dies bei negativer Deformation der Fall sein würde.

Bemerkenswert ist, daß bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei Gebirgsschlägen nicht nur die überflüssige potentielle Energie E_v , die aus dem Unterschied $E_p - E_n$ resultiert, sondern auch die potentielle Energie, die das Gestein bei negativer Deformation zu akkumulieren vermag, also E_n , beteiligt ist. An dem Prozeß der Gesteinszerstörung durch Zersplittern bei Gebirgsschlägen, die durch Umwandlung der positiven Deformation in negative verursacht werden, beteiligt sich also die ganze potentielle Spannungsenergie E_c . Ihren Wert erhalten wir durch den Ausdruck

$$E_c = E_v + E_n \quad (6)$$

Weil aber

$$\begin{aligned} E_v &= E_p - E_n \text{ und dadurch} \\ E_v + E_n &= E_p \text{ ist, folgt daraus} \\ E_c &= E_p \end{aligned} \quad (7)$$

Das bedeutet, daß die ganze potentielle Spannungsenergie E_c , die an dem Prozeß der Gesteinszerstörung durch Zersplittern beim Gebirgsschlag beteiligt ist, höchstens so groß wie die potentielle Energie ist, die das Gestein bei der positiven Deformation zu akkumulieren vermag.

Die Gesteinsfestigkeit bei dem Prozeß der Bildung der Gebirgsschläge können wir eindeutig durch die Beziehung

$$\kappa_p > \kappa_n \quad (8)$$

ausdrücken. Hier bedeuten κ_p die Bruchfestigkeit des Gesteins bei positiver Deformation und κ_n die Bruchfestigkeit bei negativer Deformation.

Der Zahlenwert der Bruchfestigkeit, den das Gestein bei positiver und negativer Deformation aufweist, in der Hinsicht, wievielmals kleiner die Festigkeit bei negativer im Vergleich zu positiver Deformation sein muß, damit es zur Zerstörung durch Zersplittern kommt, ist noch nicht bestimmt worden. Seine Bestimmung wird sehr schwierig sein, weil für verschiedene Gesteine die Werte verschieden sind. Er wird auch von der Geschwindigkeit der Umwandlung von positiver Deformation in negative abhängen.

Mit dem Prinzip der Veränderung der Belastungsart und der Umwandlung von positiver in negative Deformation können wir den Mechanismus vieler Gebirgsschläge erklären [13] [14].

So können mit diesem Prinzip die Fälle begründet werden, bei denen ein Teil eines Kohlenflözes oder stehengelassene Pfeiler, die jahrelang keine Veränderungen erfahren haben, plötzlich durch Gebirgsschlag zerstört werden. Während der ganzen Zeit der scheinbaren Ruhe besitzt das Gestein positive Deformation, wobei im Gestein potentielle Spannungsenergie akkumuliert wird. Dann aber kommt es zum Beispiel durch Firstverschiebungen zu Belastungsänderungen. Daraus kann unter der Voraussetzung, daß dabei die Bedingungen der Gesteinszerstörung durch Zersplittern erfüllt waren, auch ein Gebirgsschlag entstehen. Wenn ein Gebirgsschlag durch die Veränderung der Belastungsart und die Umwandlung von positiver Deformation in negative entsteht, wobei der Prozeß nach dem Prinzip auf Bild 14b verläuft, dann müssen wir betonen, daß verhältnismäßig kleine Verschiebungen dazu ausreichen, eine Gesteinszerstörung durch Zersplittern zu verursachen. Es gilt dabei, daß, je höher der Spannungszustand des Gesteins bei der positiven Deformation ist, eine um so kleinere Verschiebung, die durch die Kraft S (Bild 14b) hervorgerufen wird und die die Umwandlung der positiven Deformation in negative verursacht, nötig ist, um einen genügend großen Unterschied von $E_p - E_n$ zu bilden, der die Gesteinszerstörung durch Zersplittern verursacht. Die Gebirgsschläge [14] mit Zerstörung der Pfeiler, die durch die Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters entstehen, werden nicht ausschließlich durch die Verschiebung des Hangenden und des Liegenden hervorgerufen. Die Anzahl der Ursachen für die Veränderung der Belastung und des Deformationscharakters ist bestimmt sehr groß. Wir wollen nur eine dieser Ursachen, von der wir voraussetzen können, daß sie unter

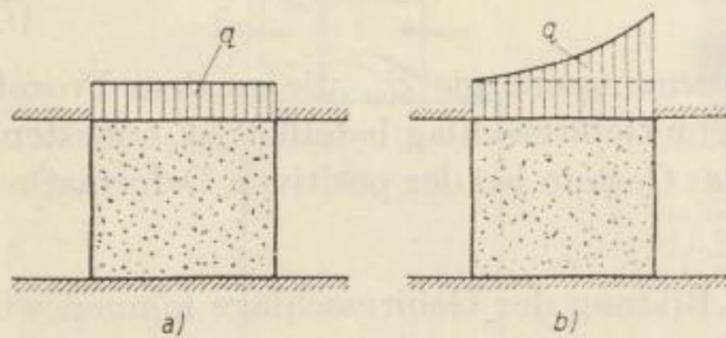


Bild 24. Schema der Veränderung der Belastungsart

Grubenbedingungen verhältnismäßig leicht entstehen kann, behandeln. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß die ursprünglich gleichmäßige Belastung des Sicherheitspfeilers in eine ungleichmäßige verwandelt wird. Schematisch ist das auf Bild 24 dargestellt worden. Auf Bild 24a ist ein gleichmäßig belasteter Pfeiler schematisch dargestellt; seine Deformation ist positiv. Auf Bild 24b wird gezeigt, wie sich die Belastung in eine ausgesprochen ungleichmäßige verändert hat. Dadurch verwandelt sich die einachsige Druckbelastung in eine Schubbelastung. Einen Beweis dafür liefert das Bild des Diabaswürfels, der durch ungleichmäßige Belastung der Druckfläche zerstört wurde (Bild 25).

Das Prinzip des Bildes 24 ist mit dem Prinzip der Zerstörungsart auf Bild 14 identisch. Verschieden sind nur die Ausgangsbedingungen, durch die man die Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters erreicht. Das Prinzip der Fälle nach Bild 14 oder nach Bild 17 beruht darauf, daß die Veränderung der Belastungsart und

Grubenbedingungen verhältnismäßig leicht entstehen kann, behandeln. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß die ursprünglich gleichmäßige Belastung des Sicherheitspfeilers in eine ungleichmäßige verwandelt wird. Schematisch ist das auf Bild 24 dargestellt worden. Auf Bild 24a ist ein gleichmäßig belasteter Pfeiler schematisch dargestellt; seine Deformation ist positiv. Auf Bild 24b wird gezeigt, wie sich die Belastung in eine ausgesprochen ungleichmäßige verändert hat. Dadurch verwandelt sich die einachsige Druckbelastung in eine Schubbelastung. Einen Beweis dafür liefert das Bild des Diabaswürfels, der durch ungleichmäßige Belastung der Druckfläche zerstört wurde (Bild 25).

des Deformationscharakters durch Verschiebung der Schichten entsteht, zwischen denen der Pfeiler gepreßt wird. Die Entstehung dieses Falles wird begünstigt, wenn die Pfeiler senkrecht zum Einfallen eines schräg oder steil gelagerten Flözes stehen. Zu einer Verschiebung der Gebirgsmassen, durch die der Gebirgsschlag nach diesem Mechanismus entsteht, kann es auch bei flacher Lagerung kommen.

Das Prinzip nach Bild 24 zeichnet sich dadurch aus, daß die Veränderung der Belastungsart und des Deformationscharakters durch Durchbiegung des Hangenden auf einer Seite des Pfeilers oder durch Zerstören des Pfeilers entsteht. Das wirkt sich in einer Veränderung der statischen Verhältnisse des Hangenden aus, und selbstverständlich bewirkt dies die ungleichmäßige Belastung der Pfeiler.

Man kann natürlich auch Fälle finden, bei denen man bei der positiven Deformation nicht die einfache Belastung zugrunde zu legen braucht. Sie können von Belastungen verschiedener Art ausgehen, bei denen es durch geeignete Veränderung der Belastungsart und auch der positiven Deformation in negative zu einer Gesteinszerstörung durch Zersplittern und dadurch auch zu einem Gebirgsschlag kommen kann.

Das Grundprinzip ist bei allen diesen Fällen gleich, insofern, als der Mechanismus der Gesteinszersplitterung bei diesen Gebirgsschlägen durch Veränderung der Belastungsart und der Umwandlung von positiver in negative Deformation verursacht wird.

Mit Hilfe des Prinzips der Änderung der Belastungsart und der Energie kann man auch die Entstehung von Gebirgsschlägen in Strecken erklären, wie sie in einigen Kohlengruben vorgekommen sind. Die Grundbedingung für die Entstehung eines Gebirgsschlages in der Strecke ist, daß sich das Kohlenflöz schon bei natürlicher Lagerung in einem hohen Spannungszustand befindet. Wir bezeichnen dann das Gestein als überspannt. Von dem Standpunkt der Deformation hat das Kohlenflöz eine positive Deformation. Seine Belastung ist unter natürlichen Bedingungen allseitig gleichmäßig. Durch das Streckenauffahren in dem unter Spannung stehenden Kohlenflöz wird im Prinzip eine Belastungsrichtung der ursprünglich allseitigen Belastung beseitigt. Dadurch wird die Belastungsart der Kohle in der Umgebung der Strecke verändert und die ursprünglich positive Deformation wird in eine negative verwandelt. Im folgenden handelt es sich um eine Strecke, die unter dem Hangenden in einem mächtigen Kohlenflöz aufgefahren wird. Bei dieser Streckenlage wird meistens Kohle im Liegenden zerstört [15].

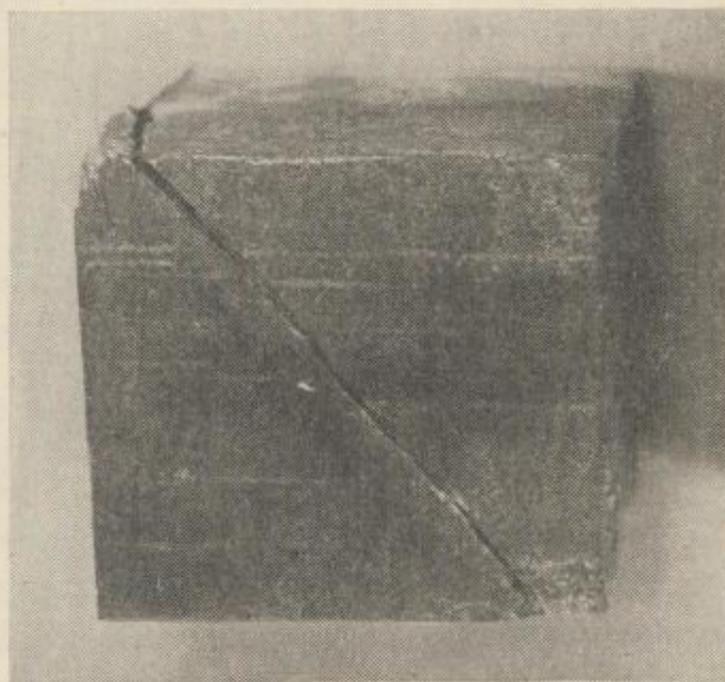


Bild 25. Zerstörung eines Gesteinskörpers infolge ungleichmäßiger Belastung der Druckflächen

Wir wissen, daß die Zerstörung durch Zersplittern, die infolge der Veränderung der Belastung und der Umwandlung von positiver Deformation in negative entsteht, dadurch gekennzeichnet ist, daß die Differenz $E_p - E_n$ genügend groß sein muß, um überhaupt die Zerstörung durch Zersplittern zu ermöglichen. Die Gebirgsfestigkeit in der Umgebung der aufgefahrenen Strecke wird aber durch die Ausmaße der Strecke beeinflußt, weil diese einen Einfluß auf die Belastungsart besitzen, wobei wiederum die Eigenschaften der Kohle von der Belastungsart abhängen. Aus diesem Grunde ist dann die Entstehung der Kohlenzerstörung durch einen Gebirgsschlag im Liegenden von der Breite der Strecke abhängig. In Abhängigkeit von der Streckenbreite ist dann eine mehr oder minder große Sohlendeformation erforderlich, wobei nur bestimmte Breiten dazu geeignet sind, daß bei der Umwandlung von positiver in negative Deformation ein optimaler Effekt erzielt wird bezüglich der Bildung des Energieunterschiedes $E_p - E_n$, der zur Zerstörung der Kohle und dadurch zur Entstehung der Gebirgsschläge führt. Diese Streckenbreite können wir als kritische Streckenbreite bezeichnen, weil nur bei dieser die Gebirgsschläge entstehen. Wenn die Streckenbreite kleiner als die kritische ist, dann kommt es fast überhaupt nicht zu Gebirgsschlägen, mit anderen Worten: Die Anzahl von Gebirgsschlägen wird um so kleiner, je kleiner eine Streckenbreite im Vergleich zur kritischen Streckenbreite ist. Wenn die Streckenbreite jedoch größer als die kritische ist, dann wird die Anzahl der Gebirgsschläge um so kleiner, je größer diese Streckenbreite ist. Bei bestimmter Streckenbreite können sogar Gebirgsschläge ausbleiben.

Die Wirkung der in natürlicher Lagerung an Kohle gebundenen Gase auf die Gesteinszerstörung durch Zersplittern beim Gebirgsschlag ist durch die Veränderung der Belastungsart und der Umwandlung des Deformationscharakters gekennzeichnet. Sie entspricht der Wirkung der Gebirgsschläge, die durch schnelle Belastung entstehen. Bei der Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge der Veränderung der Belastung und des Deformationscharakters expandieren plötzlich die Gase in einzelne Kohlesplitter und verursachen dadurch deren Pulverisierung.

Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Änderung des Deformationscharakters bei gleicher Belastung

Außer den Fällen, bei denen die Gesteinszerstörung durch Zersplittern, durch Änderung der Belastungsart und der Deformation verursacht wird, können auch Fälle eintreten, bei denen die Gesteinszerstörung zwar durch die Veränderung von positiver in negative Deformation hervorgerufen wird, jedoch die Belastungsart unverändert bleibt.

Ein solcher Fall ist dadurch gekennzeichnet, daß der belastete Kohle- oder Gesteinskörper erst nach einer gewissen Zeit, wenn auf ihn eine Belastung gleicher Art wirkt, zerstört wird. Diese Belastung kann auch konstant sein. Durch den Zeitfaktor verkleinert sich die Tragfähigkeit des Gesteins.

Bei den Versuchen, bei denen Kohlewürfel einseitig beansprucht wurden, wurden die Prüfkörper nicht im Moment der kritischen Belastung zerstört, sondern mit einer bestimmten Verzögerung. Das Intervall der Verzögerung war bei Kohle um so größer, je größer der Prüfkörper war.

Für die Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung der positiven Deformation in negative bei konstanter Belastung ist es charakteristisch, daß der Belastungswert über der Elastizitätsgrenze liegt und daß sich das Gestein bei Belastung zu verformen anfängt.

Wir wissen, daß die Menge an potentieller Spannungsenergie von der elastischen Verformung abhängt. Einer bestimmten Deformation entspricht nur eine bestimmte Menge an potentieller Energie. Bei gleicher Belastungsart wird das Vermögen, des Gesteins, die potentielle Energie zu akkumulieren, unter der Voraussetzung größer, daß die Deformation des Gesteins positiv ist. Bei bleibender Belastungsart ist die maximale positive Deformation dann erreicht, wenn das Gestein an der Elastizitätsgrenze beansprucht wird. Bei diesem Zustand wird auch die maximale Menge an potentieller Spannungsenergie akkumuliert. Wenn wir aber das Gestein über die Elastizitätsgrenze hinaus belasten, wobei es sich zu deformieren beginnt, dann sind unter diesen Umständen die Deformationen nicht positiv, sondern können im Gegenteil stark negativ sein. Wenn wir einen Gesteinswürfel betrachten, dann entstehen die größten negativen Deformationen in den Randgebieten der Seitenwände. Wird an diesen Stellen der kritische Unterschied $E_p - E_n$ erreicht, dann kommt es dort zu einer Zerstörung durch Zersplittern. Nach der Zerstörung der Randzonen folgt die Zerstörung der restlichen Teile des beanspruchten Körpers durch Zersplittern. Durch die Zerstörung der Randzonen wird die Tragfähigkeit des Körpers verringert. Das hat zur Folge, daß sich die Belastungsart ändert, weil die ursprüngliche statische Belastung infolge der Verringerung des Querschnittes und dadurch der Verringerung der Tragfähigkeit eine Funktion der schnellen dynamischen Belastung wird, die die Zerstörung des Restkörpers durch Zersplittern zur Folge hat.

Das Prinzip der Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung von positiver Deformation in negative bei unveränderter Belastung gilt in diesem Falle nur in der ersten Phase der Zerstörung.

Ein anderer Fall der gleichen Gesteinszerstörung ist dadurch gekennzeichnet, daß der Effekt der Deformationsänderung infolge des Zeitfaktors, d. h. als Folge langer Belastung, erzielt wird. Nach den Ausführungen weiter vorn wissen wir, daß lange Belastung eine Vergrößerung der Deformation bei gleichzeitiger Verkleinerung der Festigkeit herbeiführt. Dadurch entstehen negative Deformationen, die unter bestimmten Bedingungen, d. h. beim Erreichen der kritischen Werte, eine Zerstörung durch Zersplittern verursachen können.

Gebirgsschläge infolge Veränderung des Deformationscharakters bei gleicher Belastungsart

Der Mechanismus der Gebirgsschläge, die durch Veränderung des Deformationscharakters bei gleicher Belastungsart entstehen, zeichnet sich dadurch aus, daß die Zerstörung des Gesteins durch Zersplittern infolge der Umwandlung von positiver in negative Deformation verursacht wird, ohne daß sich dabei die Art und die Größe der Belastung ändern. Durch den Zeitfaktor ändert sich aber die Tragfähigkeit.

Es ist klar, daß für die objektive Lösung der Probleme dieser Gebirgsschläge eine ganze Reihe von sehr schwierigen Zusammenhängen erforscht werden muß. Als Beispiel sei die Untersuchung der Wirkung des Zeitfaktors (im Hinblick auf eine lange Belastung) auf die Veränderung der positiven in negative Deformation angeführt.

Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge der schnellen Belastung und der Änderung des Deformationscharakters

Die Gesteinszerstörung durch Zersplittern ist nicht ausschließlich dadurch bedingt, daß ihr Mechanismus nur durch schnelle Belastung oder durch bestimmte Änderungen des Deformationscharakters erzielt wird.

Die Vielseitigkeit der Natur hat auch hier ihre volle Gültigkeit, weil die Gesteinszerstörung durch Zersplittern durch sehr verschiedene Kombinationen ihrer beiden Grundprinzipien hervorgerufen werden kann.

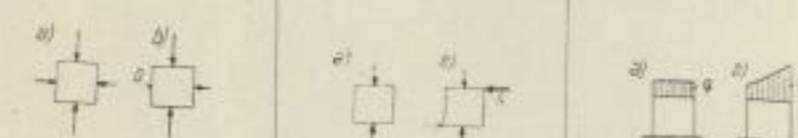
Kombinierte Gebirgsschläge

Unter natürlichen Bedingungen können durch schnelle Belastung verursachte Gebirgsschläge einen Mechanismus haben, an dem auch die Zerstörung durch Zersplittern infolge bestimmter Veränderungen von positiver Deformation in negative beteiligt ist. Umgekehrt kann die schnelle Belastung auf den Mechanismus des Gebirgsschlages, der durch geeignete Umwandlung von positiver in negative Deformation verursacht wird, einen mehr oder weniger großen Einfluß haben. Solche Gebirgsschläge bezeichnen wir als kombinierte Gebirgsschläge, da sich ihre Ursachen aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen.

Im Kapitel über die Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge schneller Belastung haben wir festgestellt, daß die schnelle Belastung eine sogenannte kritische Geschwindigkeit erreichen muß, damit das Gestein durch Zersplittern zerstört werden kann. Wenn aber zu der schnellen Belastung im geeigneten Moment die Umwandlung von positiver Deformation in negative hinzutritt, dann erreicht die schnelle Belastung infolge der negativen Deformation viel eher die kritischen Werte, bei denen das Gestein durch Zersplittern zerstört wird. Die Kombinationen der Grundprinzipien der Gesteinszerstörung durch Zersplittern begünstigen in vielen Fällen die Entstehung von Gebirgsschlägen. Bezüglich der Möglichkeiten, die aus diesen Kombinationen für natürliche Bedingungen hervorgehen, können wir voraussetzen, daß die meisten Gebirgsschläge kombinierte Gebirgsschläge sind.

Damit ist aber nicht gesagt, daß die vorhergehende Aufteilung der Gesteinszerstörung durch Zersplittern und der Gebirgsschläge ihren Zweck verliert. Die Aufzeichnung der Grundprinzipien der Gesteinszersplitterung, die durch diese Aufteilung begrenzt wird, ermöglicht uns die Beurteilung der kompliziertesten Fälle, die die Entstehung kombinierter Gebirgsschläge bedingen.

Tabelle 5. Gesamtübersicht der Gebirgsschlagsarten

Arten der Gebirgsschläge	A Gebirgsschläge, verursacht durch schnelle Belastung		B Gebirgsschläge, verursacht durch die Veränderung des Deformationscharakters	
Hauptfaktoren, die die Gesteinszerstörung durch Zersplittern beim Gebirgsschlag verursachen.	natürliche schnelle Belastung (Die Druckwelle wird durch Erdbeben hervorgerufen)	künstliche schnelle Belastung (Die Druckwelle wird durch Schießarbeiten, durch Bruch des Deckgebirges u. ä., d. h. durch bergmännische Arbeiten hervorgerufen.)	<p>Durch die Veränderung der Belastung wandelt sich die positive Deformation in die negative um.</p> <p>1. Durch Hinzufügen einer Belastung in einer anderen Richtung (z. B. Verschiebung des Deckgebirges)</p> <p>2. Durch Wegfall einer Belastungsrichtung</p> <p>3. Durch Veränderung der Belastungsverteilung auf den Druckflächen</p>  <p>Positive Deformation wird bei gleicher Belastungsart in negative verändert. (Gesteinsverformung oberhalb der Elastizitätsgrenze, Einfluß des Zeitfaktors im Sinne langer Belastung)</p>	
Das Prinzip der Gesteinszerstörung beim Gebirgsschlag	Der Gebirgsschlag, der durch schnelle Belastung entsteht, wird dadurch charakterisiert, daß bei der Belastungsgeschwindigkeit, die größer oder gleich der kritischen Geschwindigkeit ist, die Elastizitätsgrenze in die Bruchfestigkeitsgrenze übergeht; das Gestein wird spröde. Dabei wird für kurze Zeit die Akkumulationskapazität des Gesteins an potentieller Spannungsenergie größer, die plötzliche Umwandlung der Energie in Arbeit verursacht die Gesteinszerstörung durch Zersplittern.		Die Gebirgsschläge, die durch bestimmte Veränderungen der positiven Deformation in negative verursacht werden, sind dadurch gekennzeichnet, daß ein Teil der potentiellen Spannungsenergie, der im Gestein bei positiver Deformation akkumuliert wird, bei negativer Deformation überflüssig wird. Ihre schnelle Umwandlung in Arbeit verursacht die Gesteinszerstörung durch Zersplittern, weil dieser Prozeß oberhalb der Bruchgrenze verläuft, die für das Gestein bei negativer Deformation maßgebend wäre.	
Gesteinszerstörung durch Zersplittern beim Gebirgsschlag vom Standpunkt der potentiellen Energie aus betrachtet.	Der Prozeß der Gesteinszerstörung durch Zersplittern wird durch die Umwandlung der ganzen potentiellen Spannungsenergie E_c in Arbeit bedingt. Sie ist gleich der Summe der potentiellen Energie, die das Gestein bei statischer und dynamischer Belastung zu akkumulieren vermag. $E_c = E_s + E_d$		Die Ursache ist die Umwandlung der überflüssigen potentiellen Spannungsenergie $E_p = E_p - E_n$ in Arbeit. Die gesamte potentielle Spannungsenergie E_c ist gleich der Summe von freier überflüssiger potentieller Energie E_e und der potentiellen Energie E_p , die das Gestein bei negativer Deformation zu akkumulieren vermag. $E_c = E_e + E_n$	
Art der Gebirgsschläge	C Kombinierte Gebirgsschläge			
Grundprinzip	An dem Mechanismus der kombinierten Gebirgsschläge werden sowohl die Faktoren, die für die Gebirgsschläge durch schnelle Belastung charakteristisch sind, wie auch die Faktoren, die für die Gebirgsschläge infolge Deformationsumwandlung kennzeichnend sind, beteiligt.			
Bemerkung	Bei allen Gebirgsschlägen (A, B und C) in der Kohle kann die Intensität des Gebirgsschlages wesentlich erhöht werden, wenn an dem Mechanismus der Zerstörung durch Zersplittern auch die Expansion der Gase, die ursprünglich an die Kohle gebunden waren, teilnimmt.			

Bergakademie
- Bucherei -
Freiberg i. Sa.

Bergakademie
- Bucherei -
Freiberg i. Sa.



SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



ÜBERSICHT ÜBER EINZELNE ARTEN DER GESTEINSZERSTÖRUNG DURCH ZERSPLITTEN BEI GEBIRGSSCHLÄGEN

Auf Grund vorhergehender Erklärungen über den Mechanismus der Gesteinszersplitterung bei den Gebirgsschlägen gilt folgende Übersicht.

- A Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge schneller Belastung
- B Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Änderung des Deformationscharakters
- C Gesteinszerstörung durch Zersplittern infolge Kombination von schneller Belastung und Änderung des Deformationscharakters

Weil jede Gruppe der Gesteinszerstörung durch Zersplittern auch den Mechanismus der Gebirgsschläge charakterisiert, können wir in Einklang mit den Gruppen der Gesteinszerstörung durch Zersplittern auch die Arten der Gebirgsschläge unterscheiden.

- A Gebirgsschläge infolge schneller Belastung
- B Gebirgsschläge infolge der Veränderung des Deformationscharakters
- C Kombinierte Gebirgsschläge

Tabelle 5 bietet eine Gesamt-Übersicht der einzelnen Arten der Gebirgsschläge mit Angaben über ihre Mechanismen.

LITERATUR

- [1] TIMOSENKO, S. P.: Pruznost a pevnost. (Strength of materials) Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1951 (Elastizität und Festigkeit, Technisch-wissenschaftlicher Verlag, Prag).
- [2] KVAPIL, R.: K otázce proměnnosti mechanických a fyzikálních vlastností anisotropních látek? Jadrná energie [SNTL], Nr. 1 Januar 1959. (Zu der Frage über die Veränderung mechanischer und physikalischer Eigenschaften von anisotropen Stoffen.)
- [3] KVAPIL, R.: Changes of Mechanical and Physikal Properties of Natural Rocks due to Radiation, The SNTL Technical Digest, Nr. 4 (1959) S. 212—214.
- [4] KVAPIL, R.: Einfluß der Strahlungsenergie auf die Gesteinseigenschaften. Geologie und Bauwesen, Springer-Verlag Wien, Heft 2—3 (1960) S. 142—147.
- [5] Gesammelte Arbeiten: Action des rayonnements de grand energie sur les solides. 1956, Gauthier-Villars, Paris.
- [6] KVAPIL, R.: Theorie dulnich otresu. (Theorie der Gebirgsschläge.) Vortrag auf dem Allunionskongreß in Moskau, Dezember 1957, SNTL, Praha 1958.
- [7] KVAPIL, R.: Zur Theorie der Gesteinszerstörung. Vortrag auf der Gebirgsdrucktagung 1958 in Leipzig. Abhandlungen der DAW zu Berlin, Jahrgang 1958, Nr. 2a, S. 36—42, XXVII—XXIV, Akademie-Verlag Berlin 1958.

- [8] SALUSTOWICZ, A.: Neue Anschauung über den Spannungs- und Formänderungszustand im Gebirge. Internationale Gebirgsdrucktagung 1958, S. 5—11, III.—IV. Akademie-Verlag Berlin, 1958.
- [9] BUDRYK, W.: Gebirgsschläge im Lichte der Untersuchungen über Erdbeben in Oberschlesien. Internationale Gebirgsdrucktagung 1958, S. 134—137. CXI.—CXIII., Akademie-Verlag, Berlin 1958.
- [10] HUBER, M. T.: Die spezifische Formänderungsarbeit als Maß der Anstrengung eines Materials. Lemberg 1904.
- [11] KVAPIL, R.: Rozrušování hornin z hlediska potenciální energie napjatosti. Uhlí [SNTL] Nr. 9 (1957) S. 285—291. (Gesteinszerstörung vom Gesichtspunkt der potentiellen Spannungsenergie aus.)
- [12] KOMAR, A. P., TALANIN, J. N.: Izučenie kristallisacii primesej na poverchnosti kristalla s pomoščju el'ktronogo i ionnogo proektorov. (Erforschung der Kristallisation bei Mischungen an der Kristalloberfläche mit Hilfe eines Projektionsmikroskopes.) Vortrag auf einem Kongreß in Leningrad 1956, Rost kristallov, Verlag AN SSSR (1957) S. 110—118.
- [13] KVAPIL, R.: Theorie kladenských a březohorských dulních otřesu. (Theorie der Gebirgsschläge von Kladno und Brezove Hory.) I. Teil UHLÍ, Nr. 5, S. 148—156 (1958), II. Teil UHLÍ, Nr. 7, S. 219—225 (1958).
- [14] KVAPIL, R., PFORR, H.: Über statische Bedingungen zur Entstehung des Gebirgsschlages Merkers vom 8. Juli 1958. Freib. Forsch.-H. A 173 (1961).
- [15] KVAPIL, R.: Photoelasticimetric Research in Rock Mechanics. Technical Digest Nr. 4, S. 26—36 (1960).
- [16] AWERSIN, S. G.: Gornye udary. (Gebirgsschläge.) Ugletechizdat, Moskau 1956.
- [17] KEGEL, K.: Bergmännische Gebirgsmechanik. Verlag Knapp Halle 1960.
- [18] SPACKELER, G.: Beobachtungen über die Spannungsverteilung um Steinkohlen- und Salzabbaue. Vortrag auf der Internationalen Gebirgsdrucktagung 1958 S. 162—168, CXXXVII—CXXXIX., Akademie-Verlag, Berlin 1958.

V

Bücherei
Bergakademie
Freiberg i Sa.

