

Über Plastizität der Mineralien und Gesteine.

Von **L. Milch** (Greifswald).

Literatur.

- ADAMS, F. D. and NICOLSON, J. TH.: An Experimental Investigation into the Flow of Marble. Philos. Transact. Royal Society of London. **195**. 363 ff. 1901.
- assisted by COKER, E. G.: An Experimental Investigation into the Flow of Rocks. First Paper. The Flow of Marble. Amer. Journ. of Sc. **179**. 465 ff. 1910.
- An Experimental Investigation into the Action of Differential Pressure on certain Minerals and Rocks, employing the Process suggested bei Professor KICK. Journal of Geology. **18**. 489 ff. 1910.
- AUERBACH, F.: Plastizität und Sprödigkeit. Ann. d. Phys. u. Chemie N. F. **45**. 277 ff. 1892.
- BAUER, M.: Über einige physikalische Verhältnisse des Glimmers. Zeitschr. Deutsch. geol. Ges. **26**. 137 ff. 1874.
- Beitrag zur Kenntnis der kristallographischen Verhältnisse des Cyanits. Zeitschr. Deutsch. geol. Ges. **30**. 283 ff. spez. 320. 1878.
- Über das Vorkommen von Gleitflächen am Bleiglanz. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1882. I. 138 ff.
- BECKE, F.: Über Mineralbestand und Struktur der kristallinen Schiefer. Denkschr. d. math.-naturw. Kl. d. k. Akad. d. Wissenschaften. **75**. Wien 1903.
- DAUBRÉE, A.: Etudes synthétiques de Géologie Expérimentale. Paris 1879/80. Deutsche Übersetzung von A. GURLT, Braunschweig. 1880. 320 ff.
- DAY, A. L. und ALLEN E. T.: The Isomorphism and Thermal Properties of the Feldspars. Amer. Journ. of Sc. **169**. 93 ff. spez. 122. 1905. (Auch Public. des Carnegie-Inst. Washington. 1905.)
- DOELTER, C.: Beziehungen zwischen Schmelzpunkt und chemischer Zusammensetzung der Mineralien. TSCHERMAK'S Min. Petr. Mitt. **22**. 297 ff. 1903.
- GRABER, H. V., Über die Plastizität granitischer Gesteine. Verh. k. k. geol. Reichsanst. 1902. 144 ff. Wien.
- GÜMBEL, C. W.: Das Verhalten der Schichtgesteine in gebogenen Lagen. Sitz. Ber. k. bayer. Akad. d. Wissensch. X. 596. spez. 618. 1880.
- HEIM, A.: Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung. Bd. 2. Basel. 1878. spez. 31—99.
- Zum „Mechanismus der Gebirgsbildung“. Zeitschr. Deutsch. geol. Ges. **32**. 262 ff. 1880.
- Stauungsmetamorphose am Walliser Anthracit und einige Folgerungen daraus. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. in Zürich. Festschr. II. 354 ff. 1896.
- Gneisfältelung im alpinen Zentralmassiv. Ein Beitrag zur Kenntnis der Stauungsmetamorphose (Geologische Nachlese No. 12.) Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. in Zürich. **45**. 205 ff. 1900.
- Tunnelbau und Gebirgsdruck. (Geologische Nachlese No. 14.) Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. in Zürich. **50**. 1 ff. 1905.
- Nochmals über Tunnelbau und Gebirgsdruck und über die Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung. (Geologische Nachlese No. 19.) Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. in Zürich. **53**. 33 ff. 1908.
- VAN HISE, C. R.: Metamorphism of Rocks and Rock Flowage. Amer. Journ. of Sc. **156**. 75 ff. 1898.
- A Treatise on Metamorphism. Monogr. of the U. S. Geol. Surv. **47**. spez. 46—50, 90—98, 167—191, 594—602, 670—675, 695—696, 736—774.

- KICK, F.: Die Prinzipien der mechanischen Technologie und die Festigkeitslehre. Zweite Abh. Zeitschr. d. Ver. deutscher Ingenieure. **36**. 919 ff. Berlin 1892.
- VON KOENEN, A.: Über Wirkungen des Gebirgsdruckes im Untergrunde in tiefen Salzbergwerken. Zeitschr. f. prakt. Geologie. **13**. 157 ff. 1905.
- LEHMANN, J.: Resultate der neuen geologischen Aufnahmen im sächsischen Granulitgebirge. Zeitschr. Deutsch. geol. Ges. **30**. 547 ff. spez. 550. 1878.
— Untersuchungen über die Entstehung der altkristallinen Schiefergesteine mit bes. Bezugnahme auf das sächsische Granulitgebirge, Erzgebirge, Fichtelgebirge und bayerisch-böhmische Grenzgebirge. spez. 236, 243 ff. Bonn 1884.
- LEHMANN, O.: Flüssige Kristalle sowie Plastizität von Kristallen im allgemeinen, molekulare Umlagerungen und Aggregatzustandsänderungen. Leipzig 1904. spez. 10—23 und 104—106. [Viele Literaturangaben, bes. auch ältere Literatur.]
- LIEBISCH, TH.: Über eine besondere Art von homogenen Deformationen. Neues Jahrb. f. Min. etc. B. B. **6**. 105 ff. 188.
- LÖWINSON-LESSING, F.: Notiz über die Umformung von Kristallen unter Druck. Verh. kais. russ. mineralog. Ges. (2) **43**. 1905. (zitiert nach Neues Jahrb. f. Min. etc. 1906. II. 80—81).
- MILCH, L.: Beiträge zur Lehre von der Regionalmetamorphose. Neues Jahrb. f. Min. etc. B. B. **9**. 101 ff. 1894.
— Über dynamometamorphe Erscheinungen an einem nordischen Granitgneis. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1900. II. 39 ff.
— Über homogene Deformation von Quarz und Piëzokristallisation. Zentralbl. f. Min. etc. 1904. 181 ff.
— Über Zunahme der Plastizität bei Kristallen durch Erhöhung der Temperatur. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1909. I. 60 ff.
- MÜGGE, A.: Über künstliche Zwillingsbildung durch Druck aus Antimon, Wismut und Diopsid. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1886. I. 183 ff.
— Der Quarzporphyr der Bruchhäuser-Steine in Westfalen. Neues Jahrb. f. Min. etc. B. B. **10**. 757 ff. spez. 766 ff. 1896.
— Über Translationen und verwandte Erscheinungen in Kristallen. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1898. I. 71 ff.
— (Ferner sehr zahlreiche Abhandlungen über entsprechende Erscheinungen an künstlichen Kristallen, Druckzwillingsbildung und Theorie dieser Erscheinungen im Neuen Jahrb. f. Min. etc. von 1883 an.)
- PFAFF, F.: Der Mechanismus der Gebirgsbildung. Heidelberg 1880 (vergl. auch Zeitschr. d. Deutsch. geol. Ges. **32**. 542 ff. 1880).
- REUSCH, E.: Über eine besondere Gattung von Durchgängen im Steinsalz und Kalkspat. Monatsber. Preuss. Akad. d. Wissensch. a. dem J. 1867, 220 ff. 1868.
- RIECKE, Ed.: Über das Gleichgewicht zwischen einem festen, homogen deformierten Körper und einer flüssigen Phase, insbesondere über die Depression des Schmelzpunktes durch einseitige Spannung. Nachr. Kgl. Ges. d. Wissensch. Göttingen, math. naturw. Kl. 1894. 278 ff.
- RINNE, F.: Beitrag zur Kenntnis der Umformung von Kalkspatkristallen und von Marmor unter allseitigem Druck. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1903. I. 160 ff.
— Plastische Umformung von Steinsalz und Sylvin unter allseitigem Druck. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1904. I. ff.
— Über die Umformung von Carnallit unter allseitigem Druck im Vergleich mit Steinsalz, Sylvin und Kalkspat. v. Koenen-Festschr. 369 ff. Stuttgart 1907.
- SALOMON, W.: Gequetschte Gesteine des Mortirolo-Tales. Neues Jahrb. f. Min. etc. B. B. **11**. 335 ff. spez. 390 ff. 1897.

- SALOMON, W.: Die Adamellogruppe, ein alpines Zentralmassiv. II. Teil. Abh. k. k. geol. Reichsamt. **21**. spez. p. 518. Wien 1910.
- SCHMIDT, C.: Die Geologie des Simplongebirges und des Simplontunnels. Rektorats-Programm für 1906 und 1907. spez. 84 ff. und 90 ff. Basel 1908.
- SPRING, W.: La plasticité des corps solides et ses rapports avec la formation des roches. Bull. de l'académie de Belgique, Cl. des Sciences **III**. **37**. I. 790 ff. 1899. (Enthält die Zusammenstellung der Ergebnisse zahlreicher hier in Betracht kommender Untersuchungen.)
- STAPFF, F. M.: Zur Mechanik der Schichtenfaltungen. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1879. 292 ff. 792 ff. 1881 I. 184 ff.
- STEINMANN, G.: Über Gesteinsverknüpfungen. Neues Jahrb. f. Min. etc. Festband 330 ff. 1907.
- SUESS, F. E.: Beispiele plastischer und kristalloblastischer Gesteinsumformung. Mitt. geol. Ges. Wien. **3**. 250 ff. 1909.
- TAMMANN, G.: Kristallisieren und Schmelzen. Ein Beitrag zur Lehre der Änderungen des Aggregatzustandes. spez. 162 ff. Leipzig 1903. [Enthält auch Angaben über hierher gehörige phys. chem. Untersuchungen des Verf. und anderer Forscher.]
- TRESCA, H.: Bericht über: Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. Compt. rend. des séanc. de l'Acad. des sc. **59**. 754 ff. Paris 1864.
- Mémoire sur l'écoulement des corps solides. Mémoires présentés à l'Acad. des sc. **18**. 733 ff. 1868. **20**. 75 ff. 1872 und Complément zu dem Mémoire (17 Tafeln) **20**. 281 ff. 1872.
- VERNADSKY, W.: Die Erscheinungen der Gleitung bei kristallinen Körpern. Wissensch. Annalen der Universität Moskau. Naturw. Abt. Heft **13**. 1897. (russisch, zitiert nach Neues Jahrb. f. Min. etc. 1899. II. 351—353 u. Zeitschr. f. Kristallographie. **31**. 519—522, 1899.)
- WEINSCHENK, E.: Über die Plastizität der Gesteine. Zentralbl. f. Min. etc. 1902. 161 ff.

Die Auffassung der kristallinen Schiefer zeigt in den letzten Jahren vielfach die Neigung, zu den Anschauungen der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zurückzukehren und Zusammensetzung und Struktur dieser Gebilde, soweit sie sich nicht als unveränderte Eruptivgebilde auffassen lassen, durch die Einwirkung von Magmen auf wesentlich sedimentäre Gesteine zu erklären: neben kontakt-metamorphen Einflüssen nimmt die gegenwärtig besonders bevorzugte Injektionshypothese ein Eindringen eruptiven Materials in geschmolzenem oder gasförmigem Zustande an. Diese Anschauung ist in immer weiterer Ausdehnung begriffen und wohl berufen, einen Teil der in gewissen Gliedern der kristallinen Schiefer beobachteten Erscheinungen zu erklären; allerdings ist es ihr noch nicht gelungen, zwei grundlegende Fragen zu beantworten. Unerklärt ist bis jetzt, wieso das neu hinzutretende, nicht selten den grössten Teil des Gneises bildende Eruptivmaterial in dem älteren Gestein Platz fand, da dieses doch schon vor der Injektion den von ihm eingenommenen Raum ganz ausfüllte; es fehlt ferner ein Grund, warum die aufsteigenden Massen beim Eindringen in das kompakte und unbestreitbar unter gewaltigem Druck sich befindende Gestein die Schicht- und Schieferungsfugen derartig bevorzugten, dass die regelmässige Lagenstruktur ungeheure

Komplexe völlig beherrscht. Gleichzeitig, aber natürlich unabhängig von dieser Bewegung, hat die Erkenntnis der einflussreichen Mitwirkung des überhitzten Wassers bei den als Dynamometamorphose (im weiteren Sinne) zusammengefassten Erscheinungen dazu geführt, Dislokationsmetamorphose und Belastungsmetamorphose zu unterscheiden. Die Theorie ist somit bis zu einem gewissen Grade zu dem Regionalmetamorphismus LYELL's und DAUBRÉE's zurückgekehrt; infolgedessen wird den durch die Wärme des Erdinnern mittelst überhitzten Wassers unter hohem Druck hervorgerufenen Neubildungen und ihren Anordnungen naturgemäss besondere Aufmerksamkeit gewidmet. (Vergl. hierüber diese Rundschau I. p. 43—48.)

Diese Entwicklung erklärt das augenblicklich nicht selten zu beobachtende Bestreben, als mechanische Wirkungen des Druckes lediglich klastische Erscheinungen und die in vielen Fällen unbestreitbare Druckzwillingsbildung anzusprechen, hingegen bruchlose Umformungen trotz zahlreicher unzweideutiger Nachweise und trotz der theoretischen Notwendigkeit ihres Auftretens für die meisten gesteinsbildenden Minerale und somit auch für die meisten Gesteine nicht anzuerkennen oder sogar als unmöglich darzustellen. Da hierdurch in weiteren Kreisen der Glaube hervorgerufen werden kann, dass der Druck mechanisch stets zertrümmernd, niemals umformend auf die Gesteine wirke, bieten die an erster Stelle des Literaturnachweises angeführten wichtigen Experimentaluntersuchungen von FRANK D. ADAMS erwünschten Anlass, die ganze Frage nach der Plastizität der Mineralien und Gesteine im Zusammenhange darzustellen.

Die Lehre von der plastischen oder bruchlosen Umformung der Gesteine wurde bekanntlich von A. HEIM 1878 in seinem Mechanismus der Gebirgsbildung Bd. II begründet; seine Anschauungen fasst er 1908 in folgenden Sätzen zusammen:

„a) Ein Gesteinsstück in grosser Tiefe ist schliesslich weit über seine rückwirkende Festigkeit belastet, kann aber nicht brechen und nicht weichen, weil es ringsum von gleich gepressten eingeschlossen ist. Seine Tendenz, dem Drucke seitlich auszuweichen, wird es als Seitendruck auf das Nebengestein äussern, das führt mehr und mehr zu allseitiger (hydrostatischer) Druckverteilung. Unter Belastung viel grösser als die rückwirkende Festigkeit muss das Gestein ohne Bruch umformbar sein, denn zur Bildung von Total-Trennungen ist kein Raum da. Ich habe diesen Zustand latent plastisch genannt.

b) Wenn nun das Gestein in diesem Zustande noch von einer neuen grossen Kraft, der Dislokation, ergriffen wird, so macht sich die Umformung geltend, die Plastizität tritt aus der Latenz in Aktivität.

Das Vorbild für diese Umformung blieben, wie schon die Worte andeuten, die plastischen Körper, also Wachs, Modellierton usw.

Wir können a und b noch kürzer ausdrücken: „Überlastung macht deformierbar, Dislokation deformiert.“ (p. 51, 52).

I.

Plastizität eines Gesteins ist natürlich nur denkbar, wenn seine Komponenten, die einzelnen Minerale plastisch werden. Selbst wenn man mit HEIM Gesteinsdeformation und Mineraldeformation unterscheidet und von plastischer Deformation eines Gesteins auch dort spricht, wo nicht alle Gemengteile plastisch deformiert, sondern ein Teil zerbrochen wurde, das Gestein als solches aber nicht zerbrochen ist, so bleibt doch das plastische Verhalten der Hauptmenge der Gesteinsbestandteile die Grundlage der ganzen Erscheinung. Mit der Darlegung unserer Kenntnisse über die Plastizität der Minerale soll daher die vorliegende Auseinandersetzung beginnen. Da es sich hier hauptsächlich um geologische Erscheinungen handelt, werden künstliche Kristalle nicht berücksichtigt, obwohl unter ihnen sich gerade die schönsten Beispiele für hohe Plastizität von Kristallen finden; aus dem gleichen Grunde kann hier selbstverständlich nicht auf fließende und flüssige Kristalle eingegangen werden, trotzdem sie den höchsten Grad der Plastizität besitzen, wie er sonst nur normalen Flüssigkeiten zukommt. Auch für die kristallographische und physikalische Theorie der hier in ihrer Wirkung in Betracht kommenden Erscheinungen muss auf die Untersuchungen von O. LEHMANN, TH. LIEBISCH, O. MÜGGE, G. TAMMANN, W. VOIGT, E. v. FEDOROW und anderer hingewiesen werden.

Die Bezeichnungen „vollkommen starr“ und „vollkommen plastisch“ im Sinne der Physik gelten für Grenzfälle, die in der Natur niemals vorkommen. Bei keinem Körper halten die ihn aufbauenden materiellen Punkte ihre gegenseitige Lage unter dem Einfluss von Kräften aufrecht, sondern sie erfahren vorübergehende oder dauernde Veränderungen dieser Lage. Und wie es somit keinen vollkommen starren Körper gibt, gibt es auch keinen Körper, der einer Verschiebung seiner Teile gar keine Kraft entgegensetzt, also der Anforderung der vollkommenen Plastizität entspricht (vergl. z. B. MÜLLER-POUILLET'S Lehrbuch der Physik I 178 und 325, 1906; besonders auch F. AUERBACH: Plastizität und Sprödigkeit [Ann. d. Physik und Chemie, N. F. 45, 277 ff. 1892]). Als „starr“ oder „plastisch“ bezeichnet der Sprachgebrauch Körper, die sich den Grenzfällen nähern; die Körper sind somit in dieser Hinsicht nicht der Art, sondern dem Grade nach verschieden, und man könnte sie ebensogut als „mehr oder weniger starr“ wie als „mehr oder weniger plastisch“ zusammenfassen. Die übliche Angabe: „eine Substanz ist starr“ oder die entgegengesetzte: „eine Substanz ist

plastisch“ bezieht sich obendrein vielfach nur auf das Verhalten bei Zimmertemperatur und bei Beanspruchung in einer Richtung, während der Körper im übrigen unter Druck von einer Atmosphäre steht; auch setzt bei den gewöhnlichen Versuchen die Einwirkung rasch ein und dauert nur kurze Zeit an.

Selbst unter diesen für die Plastizität der Minerale wohl besonders ungünstigen Bedingungen erweist sich eine verhältnismässig grosse Zahl von ihnen plastisch, d. h. sie besitzen die Eigenschaft, bei einer Beanspruchung durch äussere Kräfte über die Elastizitätsgrenze hinaus, bleibende, aber allmähliche und stetige Veränderungen ihrer Gestalt zu erleiden, ohne durch ein plötzliches Ereignis den Zusammenhang ihrer Teile einzubüssen (nach P. GROTH). Schon lange ist bekannt, dass sich Gypskristalle und Antimon-glanzkristalle sehr leicht biegen lassen, durch D. BREWSTER und E. REUSCH wurden die Gleitflächen beim Steinsalz und beim Kalkspat aufgefunden, Eis erwies sich als biegsam. M. BAUER hat die Plastizität von Bleiglanz und Cyanit durch den Versuch gezeigt und F. AUERBACH fand, dass auch Flusspat und Apatit bei Beanspruchung auf Druck bleibende Deformationen aufwiesen, bevor Sprünge entstanden. In seiner grundlegenden Arbeit von 1898 zeigte O. MÜGGE, dass ausser den genannten Substanzen auch Anhydrit, Wismutglanz, Auripigment, Vivianit, Lorandit, Graphit, Molybdän-glanz, Brucit, Glimmer, Sylvin sich unter den angegebenen Bedingungen biegen lassen; er zeigte, „dass unter den Kristallen, besonders auch den natürlichen, nicht wenige plastisch sind, dass es durch besonders grosse Plastizität ausgezeichnete Richtungen gibt, und dass dadurch eine Reihe von Kohäsionseigenschaften der Kristalle, nämlich bruchlose Biegungen, Torsionen verständlicher werden.“

Da die Plastizität nach dem Ergebnis der Untersuchungen O. MÜGGE's bedingt erscheint durch das „Vorhandensein von Translationsflächen, längs denen Verschiebungen der Kristallteile nach bestimmten Richtungen vor sich gehen können“, so gestattet umgekehrt der Nachweis von Veränderungen im Kristallbau, die auf Translationen zurückgeführt werden müssen, den Rückschluss, dass unter irgendwelchen physikalischen Bedingungen diese Substanzen deutlich plastisch sind. Derartige auf Translationen hinweisende Erscheinungen (Translationsstreifung, regelmässige Biegungen und Knickungen) stellte O. MÜGGE in der Abhandlung von 1898 an Columbit, Wolframit, Baryt und — wegen der grossen Rolle als Gesteinsgemengteile besonders wichtig — an monosymmetrischen und rhombischen Pyroxenen fest; er nimmt auch für sie Plastizität an, obwohl es nicht möglich war, bei ihnen nach dem gleichen Verfahren wie bei den anderen Substanzen, durch Anwendung der Kristallpresse Translationen künstlich hervorzurufen. Ebenso

erblickt er (1896) in Translationsvorgängen die Ursache des bekannten eigentümlich striemigen, bisweilen geradezu an Plagioklas erinnernden Aussehens mancher Quarze zwischen gekreuzten Nicols, das schon lange als eine Druckwirkung angesprochen wurde, und vermutet auch für entsprechende Erscheinungen am Olivin die gleiche Ursache (1898). Gekrümmte Spaltungsflächen am Kalifeldspat pegmatitischer Adern in einem nordischen Granitgneis beschrieb L. MILCH 1900, ferner gestreckte und gekrümmte Quarzkörner 1894 aus alpinen Sedimentgesteinen und schilderte ein besonders schönes Beispiel von homogener Deformation eines Quarzkorns aus einem alpinen Konglomerat ausführlich im Jahre 1904. Messungen über den Grad der Deformation an Quarz veröffentlichte W. SALOMON 1897; durch seine Beobachtungen stellte er fest, dass in dem von ihm untersuchten alpinen Gneis bruchlose Biegung von Quarz bis zu 57° stattgefunden hat und dass wahrscheinlich noch viel stärkere bruchlose Biegungen von Quarz möglich sind.

Die Zahl der kristallisierten Substanzen, an denen Gleitflächen nachgewiesen sind, ist sehr erheblich. Schon 1897 stellte W. VERNADSKY eine Tabelle von 77 derartigen Substanzen zusammen und nannte unter diesen neben anderen die monoklinen Hornblenden, Topas, Dolomit, Korund, Beryll, Turmalin, Epidot; gleichzeitig stellte er fest, dass die bis jetzt vorhandenen Beobachtungen auf eine viel grössere Häufigkeit von Gleiterscheinungen hindeuten, als gewöhnlich angenommen wird, so dass man diese Erscheinung als eine ganz allgemeine Eigenschaft der kristallisierten Substanzen betrachten kann.

II.

Die Berechtigung, auch für Substanzen, deren Plastizität experimentell noch nicht nachgewiesen werden konnte, unter Verhältnissen, wie sie in grösserer Tiefe der Erdrinde herrschen, zur Erklärung tatsächlich beobachteter Deformationen plastisches Verhalten anzunehmen, lässt sich herleiten aus dem durch den Versuch geführten Nachweis, dass die Plastizität kristallisierter Körper zunimmt mit zunehmendem Druck und zunehmender Temperatur. Auf diesem Wege gelang es nicht nur, die Plastizität vieler Körper zu steigern, sondern sie auch bei scheinbar starren zur Anschauung zu bringen: „in Wahrheit ist Plastizität eine quantitative Eigenschaft der Stoffe“. (F. AUERBACH, Kanon der Physik, p. 121, 1899.)

Den ersten Beweis für die starke Zunahme der Plastizität durch Druck bei plastischen (z. B. prägbaren) kristallisierten Substanzen erbrachte H. TRESCA 1864 durch seine berühmten Versuche, bei denen starker Druck bei gleichzeitiger Verhinderung seitlichen Ausweichens Blei, Aluminium, auch Eis zum Ausfliessen aus weiten

Öffnungen zwang. W. SPRING schweisste feinstes Pulver verschiedener Substanzen, besonders Metalle, aber auch Chlornatrium und Chlorkalium, in einer ein Ausweichen verhindernden Presse durch starken Druck zu einer zusammenhängenden Masse zusammen und brachte diese zum Ausfliessen (1880). Durch seine Versuche über die Ausflussgeschwindigkeit kristallisierter Stoffe führte 1902 und 1903 G. TAMMANN den Nachweis, dass das Fliessen derselben nicht durch eine vorübergehende Schmelzung bedingt wird, sondern dass die Plastizität, die reziproke innere Reibung, eine den Kristallen eigentümliche Eigenschaft ist.

Nachdem A. HEIM die Plastizität im Jahre 1878 zur Erklärung der Gesteinsdeformationen in gefaltetem Gebirge herangezogen hatte, liess die grosse Tragweite seiner Anschauungen eine Prüfung durch das Experiment sehr wünschenswert erscheinen; die ersten Versuche von F. PFAFF (1879) erwiesen sich aber, wie HEIM 1880 ausführte, in ihrer ganzen Anlage als durchaus ungeeignet und das gleiche gilt von W. GÜMBEL'S Versuchen von 1880, bei denen infolge nicht genügenden Seitendrucks regelmässig eine Zertrümmerung der Versuchskörper eintrat. Hingegen gelang es 1886 O. MÜGGE in Anlehnung an das von A. DAUBRÉE zur Nachahmung von Verdrückungen und Zerreiassungen der Versteinerungen in gefaltetem Gebirge angewandte Verfahren, durch Eingiessen der zu prüfenden Körper in Blei (oder Zinn) und Pressen zwischen dem Schraubstock resp. Bearbeiten mit dem Hammer, an Diopsid gelegentlich künstliche Zwillingsbildung zu erzeugen, Anhydritspaltungsstücke zu fälteln und Bleiglanzwürfel zu Rhomboeder-ähnlichen Gebilden zu deformieren sowie ihre Spaltungsflächen stark windschief zu verbiegen.

Die grossen Schwierigkeiten, die, wie HEIM 1880 betonte, dem experimentellen Nachweis plastischer Deformationen durch hohen Druck gegenüberstehen, wurden wenigstens zum Teil zum ersten Mal von G. KICK im Jahre 1892 überwunden. Die zu prüfenden Kristalle resp. Gesteinsstücke werden in einer kräftigen Kupferhülse (kurzes massives Rohr mit angelötetem Weissblechboden) mit einer geschmolzenen Substanz (Schellack, Schwefel, Alaun, der sich am besten bewährte) umgossen und der kombinierte Versuchskörper durch Zusammendrücken zwischen parallelen Platten der hydraulischen Presse deformiert. Auf diesem Wege gelang es, Steinsalzspaltungsstücke kräftig zu deformieren, wobei die Substanz fest und klar blieb und keinerlei Sprünge aufwies; auch Marmor kugeln wurden abgeplattet, ohne dass der Zusammenhang gelöst wurde. Schliesslich gelang es KICK auch, durch Anwendung allseitiger, genügend hoher Pressung Marmor zu prägen; es wurde durch Ausfüllung der Vertiefungen des Prägstempels und des Zwischenraumes zwischen Prägstock, Prägring und Stempel mit einer Flüssigkeit die erforderliche allseitige Pressung erreicht und auf diesem Wege bei Anwendung eines Druckes von 1300 Atmosphären eine seichte Prägung (0,05 mm

Höhe der Linien gegenüber 0,3 mm bei vollkommener Prägung) erzielt, wobei jedoch der Zusammenhang des Materiales vollständig gewahrt blieb. Gegenüber der immer noch wiederkehrenden Behauptung von der absoluten Sprödigkeit vieler Substanzen gegen Druck, der Notwendigkeit des Zerbrechens etc. ist die ausdrückliche Feststellung des experimentierenden Ingenieurs besonders hervorzuheben, „dass ein bestimmter allseitiger Druck den spröden Körper in den bildsamen Zustand überführt, in welchem Zustande es dann möglich wird, durch weitere mechanische Einwirkung Formveränderungen zu erzielen, wie sie sonst nur bei bildsamen Körpern erzielbar sind“ (p. 921).

Eine wesentliche Ergänzung der KICK'schen Versuche lieferte F. RINNE 1903 und 1904 durch Erreichung viel stärkerer Deformationen und durch genaue Untersuchung gepresster Versuchskörper. Mit dem gleichen Verfahren wie KICK arbeitend, erzielte er 1903 bei Anwendung eines Druckes von etwa 1200 kg/qcm auf das Gefäss mit dem in Alaun eingebetteten Versuchskörper vollkommene Auswalzung von Kalkspatrhomboëdern zu blattartigen Körpern. Der geringe Zusammenhalt der flachen Gebilde zeigte aber ebenso wie die mikroskopische Untersuchung, dass sich bei der Umformung nur zum Teil stetige Verschiebungen geltend machten; neben diesen fand sich „Lösung des Zusammenhangs einst benachbarter Teile entweder unter Bildung einer scharflinigen Grenze oder unter Zermalmung der Grenzteilte zu sehr feinem Grus. Die in Rede stehenden Erscheinungen haben stellenweise grosse Ähnlichkeit mit den wohlbekannten Verhältnissen der Quarze gequetschter Granite“. Ähnliche Verhältnisse ergaben sich bei Marmor: die Versuchskörper wurden stark deformiert, behielten ihren Zusammenhang, verloren aber beträchtlich an Festigkeit und wurden von regelmässig gescharten Zermalmungszonen durchzogen; das Mikroskop zeigte neben plastisch deformierten, gebogenen und in der Ausweichungsrichtung gestreckten Körnern grusig zermalmtes Material und Mörtelstruktur. Hingegen fand derselbe Forscher 1904 bei Anwendung von Gefässen, die einen Druck von 2000 bis fast 3000 kg/qcm aushielten, dass Steinsalz- und Sylvinkristalle „in überraschend weitgehender und vollkommener Art plastisch umgeformt“ werden, wobei sie sich „im grossen den durch Druck gegebenen Ausweichungsrichtungen anpassten und sich auch im kleinen den Raumverhältnissen gewissermassen anschmiegen, die durch das Verschieben der die Präparate umschliessenden Kristalle des Alaunaggregates gegeben wurden“. Dabei erwiesen sich die Präparate vollkommen durchsichtig, genau so fest wie vor der Pressung und liessen bei gutem Gelingen auch keine Spaltungsrisse beobachten: „Die Teile haben sich ohne jede Unstetigkeit, dem Drucke nachgebend, zueinander verschoben“.

Die nachgewiesene Plastizität des Steinsalzes zog A. VON KOENEN (1905) zur Erklärung sehr verwickelter Lagerungsverhältnisse in

mitteldeutschen Salzbergwerken heran. Für eine Reihe dieser Bergwerke wies er nach, dass die Lage der Schichten in grösserer Tiefe mehr oder minder verschieden ist von dem an der Tagesoberfläche sichtbaren Gebirgsbau und stellte fest, „dass die Lagerung im Untergrunde mancherlei Ähnlichkeit mit dem Gebirgsbau der Alpen oder auch der gefalteten, paläozoischen Schichten des Harzes und ähnlicher Gebirgsmassen zeigt“. Auch die Struktur der in den Tiefen der Salzbergwerke angefahrenen Gesteine erinnert vielfach an alpine Vorkommen. „Eine Erklärung für diese Ähnlichkeit im Schichtenbau und der Struktur dürfte aber zunächst darin zu suchen sein, dass bei der Entstehung der Störungen die Gesteine einem allseitigen starken Druck ausgesetzt waren und weniger leicht ausweichen konnten, als die der Oberfläche näher liegenden, dann aber auch darin, dass das Salz eben plastisch ist, gänzlich umgeformt werden konnte und den Druck in anderer Weise weiterhin mitteilte, als dies bei starren Gesteinen der Fall sein kann.“

Gleichfalls in Salzbergwerken beobachtete F. RINNE (1907) wasserhellen Carnallit unter Verhältnissen, die auf vollständig plastische Umformung unter hohem Druck schliessen liessen. Nach dem KICK'schen Verfahren ausgeführte Versuche ergaben Trübung und Druckzwillingsbildung, teilweise auch Lösung des Zusammenhangs der Teilchen, also ein Verhalten, das an das des Kalkspates erinnert. Dass bei dem natürlichen Vorkommen der gleichfalls Zwillingsbildung aufweisende Carnallit wasserhell erscheint, wird auf die langsame Wirkung des Gebirgsdrucks im Vergleich zu der schnellen Beeinflussung beim Versuche zurückgeführt (vgl. unten: Einfluss der Zeit).

Die Ergebnisse einer grösseren Versuchsreihe nach dem KICK'schen Verfahren teilte 1910 F. D. ADAMS mit. Es zeigte sich, dass die geprüften Minerale, soweit ihre Härte die Stufe 5 der MOHS'schen Skala nicht übersteigt, sich plastisch verhalten und zwar um so vollkommener, je weicher sie sind. So erwies Flussspat ($H = 4$) sich noch in hohem Grade plastisch; auch bei Apatit ($H = 5$) ergaben sich deutliche Anzeichen der Plastizität. Diopsid ($H = 5,5$) zeigte nach der Pressung prachtvolle polysynthetische Zwillingsbildung nach der Basis, Kalifeldspat erwies sich zwar stark zertrümmert, die einzelnen Fragmente liessen aber deutlich optische Deformationen erkennen, die auf allerdings dem Einfluss nach sehr untergeordnete Mitwirkung plastischer Bewegungen hinweisen. Quarz endlich liess unter den angewandten Versuchsbedingungen keine Plastizität erkennen. Versuche mit Marmor führten zu ähnlichen Ergebnissen, wie sie KICK und RINNE erzielt hatten; Granit hatte zwar in zusammenhängenden Partien eine gneissähnliche Struktur angenommen, doch zeigte die mikroskopische Untersuchung nur kataklastische Phänomene. So erfolgreich die KICK'sche Methode im allgemeinen war, so wiesen diese Versuchsreihen doch auf beträchtliche ihr anhaftende Schwächen hin: der seitliche Widerstand ist doch noch zu gering, wodurch das

Zerbrechen des Versuchskörpers begünstigt wird, und ferner ist es unmöglich, den Druck anzugeben, der auf den Versuchskörper gewirkt hat, da sich der angewendete Druck in einer der Berechnung nicht zugänglichen Weise auf die Metallhülse, das Material, in das der Versuchskörper eingebettet wird, und den Versuchskörper selbst verteilt.

Diese Mängel vermied die Anordnung, wie sie F. D. ADAMS und J. T. NICOLSON in ihren Untersuchungen von 1901 anwandten und weiterhin F. D. ADAMS etwas abgeändert seinen späteren mit C. G. COKER gemeinsam unternommenen Experimenten zugrunde legte. In seiner Gestalt von 1910 besteht der Apparat aus einer dickwandigen Hülse von Nickelstahl, aus einem Stahlblock hergestellt, in den die zur Aufnahme des Gesteinszylinders bestimmte Öffnung mit grösster Sorgfalt ausgebohrt und geglättet wird. Der Durchmesser ist ein wenig kleiner als den Massen der gleichfalls so gut wie irgend möglich polierten Gesteinssäule entspricht, so dass diese nur in die erwärmte Hülse hineingeschoben werden kann und beim Abkühlen ganz fest und gleichmässig von dem Stahl umschlossen wird. Der Druck wird durch zwei aus besonders gehärtetem Chrom-Wolfram-Stahl (Novo-Stahl) hergestellte, genau in den Hohlraum der Hülse passende Stempel übertragen; um die Wirkung des Druckes zu konzentrieren und gleichzeitig ein Eindringen der Gesteinsmasse zwischen Wand und Stempel zu verhindern, wird die Wand des mittleren Teils der Stahlhülse, dem beim Versuch auch die mittlere Partie der Gesteinssäule anliegt, erheblich geschwächt. Die Gesteinssäulchen hatten in der Regel eine Höhe von 4 cm und einen Durchmesser von 2 cm, die Wanddicke der Stahlhülse aber betrug 6 cm und wurde an der den mittleren 2 cm der Gesteinssäule entsprechenden Strecke je nach der Stärke des angewandten Druckes auf 2,5—1 cm vermindert. Während bei den Versuchen von 1901 neben plastischer Umformung immer noch Zertrümmerungszonen auftraten, gelang es unter den 1910 eingehaltenen Bedingungen, eine vollkommen plastische Umformung von Marmor zu erzielen. Hierbei sank die Höhe der aus carrarischem Marmor hergestellten Säule bei Anwendung eines Druckes von 20 875 kg auf den qcm der ursprünglich 40 mm hohen Säule auf 17,3 mm und der Durchmesser stieg an der breitesten Stelle von 20 mm auf 28,81 mm; der Zusammenhang blieb völlig gewahrt, und das Mikroskop zeigte keine Spur einer kataklastischen Einwirkung, sondern ausschliesslich Auswanzung der ursprünglich isometrischen Körner zu flachen Platten und vollständige Parallelanordnung dieser, so dass eine vorzügliche Schieferung sich herausbildete. Der Druck wurde nur langsam verstärkt und wirkte im ganzen 41 Stunden; seine Stärke entspricht der in einer Tiefe von 41 miles herrschenden. Festigkeitsprüfungen der deformierten Marmorsäulchen ergaben eine Zunahme der Festigkeit mit der Höhe des deformierenden Druckes.

Alle bisher geschilderten Versuche wurden bei gewöhnlicher Temperatur angestellt und entsprachen insofern nicht den natürlichen Verhältnissen; sowohl dieser Umstand wie auch die Aussicht, durch Zusammenwirken von Druck mit erhöhter Temperatur noch bessere Erfolge zu erzielen, liessen unter diesen Bedingungen angestellte Versuche sehr wünschenswert erscheinen.

Von der Tatsache, dass die Erhöhung der Temperatur die Plastizität vieler kristallisierter Körper, besonders der Metalle erhöht, macht die Technik beim Schmieden der Metalle ausgedehnten Gebrauch. G. TAMMANN wies für eine Reihe von Metallen nach, dass ein Temperaturzuwachs von 10^0 in der Regel bei gleichen Drucken und gleichen Ausflussöffnungen die Ausflussgeschwindigkeit nahezu verdoppelt und gelangt zu der Feststellung, dass die Plastizität kristallisierter Stoffe ganz allgemein in der Nähe der Schmelzkurve sehr erhebliche Beträge erreicht. Dass auch in beträchtlicher Entfernung von der Schmelzkurve die Plastizität durch Temperaturerhöhung bedeutend zunehmen kann, bewies L. MILCH 1909 durch Versuche am Steinsalz, das (bei einem Schmelzpunkt von appr. 800^0 C) schon bei Temperaturen von 200^0 sehr starke plastische Deformationen gestattet. In diesem Zusammenhange kann auch die Beobachtung C. DÖLTER's angeführt werden, dass beim Schmelzen von Silikaten kein plötzlicher Übergang zwischen fest und flüssig zu beobachten ist, sondern dass sich stets zwischen Weichwerden und Flüssigwerden ein eigentümlicher viskoser, zwischen fest und flüssig ungefähr die Mitte haltender Zustand einschiebt (1903). In diesem Zustand liessen sich nach A. L. DAY und E. T. ALLEN belastete Albitkristalle sehr leicht biegen; als Wirkung des Intrusionsdruckes auf erstarrende Magmen, deren Ausscheidungen sich noch in dem Temperaturintervall zwischen Ausscheidungspunkt (Schmelzpunkt) und Erweichungspunkt befinden, erklärt W. SALOMON (1910) die Protoklase der Tiefengesteine.

Es war von vornherein anzunehmen, dass ein Zusammenwirken von erhöhter Temperatur und starkem Druck die Plastizität erheblich erhöhen muss: G. TAMMANN hatte festgestellt, „dass die Kurven gleicher Plastizität der Stoffe auf der pT-Ebene mit steigendem Druck zu niederen Temperaturen gehen“ und hatte beim Studium der Ausflussgeschwindigkeiten der Metalle gefunden, „dass ein Temperaturzuwachs von 10^0 in der Regel bei gleichen Drucken und gleichen Ausflussöffnungen die Ausflussgeschwindigkeit nahezu verdoppelt.“ Die Wirkungen von Erhöhung der Temperaturen und Erhöhung des Druckes verstärken sich also gegenseitig; hierzu kommt noch, dass nach E. RIECKE „der Schmelzpunkt des Kristalls sowohl bei der Wirkung von komprimierenden als auch

von dilatierenden Kräften erniedrigt wird“, mithin auch die in der Nähe der Schmelzkurve sich einstellende Plastizität früher eintreten muss.

Diesen Erwartungen entsprach der Erfolg des Versuches. Während es F. D. ADAMS und J. T. NICOLSON mit ihren Apparaten von 1901 nicht gelang, bei gewöhnlicher Temperatur kataklastische Erscheinungen beim Pressen der Marmorsäulchen gänzlich zu vermeiden, erzielten sie mit dem gleichen Apparat und der gleichen Substanz völlig bruchlose plastische Umformung durch Erhöhung der Temperatur auf 300° — 400° C. Ein Vergleich mit den Versuchen von 1910 ergibt, dass vollkommen plastische Deformation bei dieser erhöhten Temperatur durch erheblich geringere Drucke erreicht wird, als bei gewöhnlicher Temperatur, dass das Umwandlungsprodukt in beiden Fällen durchaus übereinstimmt und dass unter sonst gleichen Bedingungen die bei höherer Temperatur bruchlos umgeformten Marmorsäulchen eine höhere Druckfestigkeit aufweisen als die bei niedriger Temperatur beanspruchten: der bei höherer Temperatur deformierte Versuchskörper besitzt nahezu die gleiche Druckfestigkeit wie eine gleiche ungespresste Marmorsäule.

Der letzte bekannte und in seiner Wirkung zu berücksichtigende Faktor ist die Zeit; je langsamer der Druck zunimmt und je länger der gepresste Körper unter hohem Druck bleibt, desto günstiger sind die Bedingungen für plastische Umformung. Schon 1878 führte J. LEHMANN bei der Besprechung der sächsischen Granulite aus, dass ein gewöhnlich als starr bezeichnetes Gestein sich einem langandauernden Druck gegenüber plastisch verhält; „kleine Formveränderungen summieren sich im Laufe der Jahrtausende zu gewaltigen Störungen.“

Auch diese theoretisch begründete und zur Erklärung der Plastizität der Gesteine vielfach herangezogene Annahme von Wachsen der Plastizität mit der Dauer der Beanspruchung konnten F. D. ADAMS und seine Mitarbeiter durch Bestimmung der Druckfestigkeit der auf verschiedene Weise beanspruchten Versuchskörper bestätigen. Eine in 1 Minute deformierte Marmorsäule, die sofort nach der Pressung aus der Hülse herausgenommen und auf ihre Druckfestigkeit geprüft wurde, wies 60,6 % der ursprünglichen Druckfestigkeit auf; der Wert stieg auf 65,7 % bei einer gleichfalls in 1 Minute deformierten, aber erst 100 Tage später auf ihre Druckfestigkeit geprüften Säule und er erreichte durchschnittlich 84,7 % bei drei ganz gleichen Versuchskörpern, die während 30 Tage einem sehr langsam wachsenden Druck ausgesetzt und nahezu 2 Jahre in ihrer Stahlhülse belassen wurden. Bei diesem Versuch hatte einer der drei Versuchskörper sogar eine grössere Druckfestigkeit erhalten, als sie dem ungespressten Marmor zukommt. Bei einer anderen Versuchsreihe wies eine innerhalb 64 Tagen gepresste Marmorsäule fast die doppelte Druckfestig-

keit einer anderen von gleicher Beschaffenheit auf, die in 10 Minuten entsprechend deformiert war.

Einen Einfluss von anwesendem Wasser bei Druckversuchen unter hoher Temperatur (300° C) auf die Art der mechanischen Umformung konnten ADAMS und NICOLSON bei ihren Versuchen mit Marmor (1901) nicht nachweisen; natürlich ist hierdurch auch nach ihrer Ansicht nicht etwa die Wirkungslosigkeit dieses chemisch überaus wirksamen Faktors für die Plastizität anderer Körper oder selbst von Marmor unter anderen Versuchsbedingungen wahrscheinlich gemacht oder gar erwiesen.

Während bisher zu erfolgreichen Versuchen unter den theoretisch erforderlichen Bedingungen von Gesteinen nur Marmor (sowie feinkörnige Kalke und Dolomit) herangezogen wurden, machte F. D. ADAMS auf dem internationalen Geologenkongress in Stockholm (1910) Mitteilung von gelungenen Versuchen an Granit, über die an dieser Stelle nach ihrer Veröffentlichung berichtet werden wird. Aber schon als Ergebnis der allgemeinen Erfahrungen von dem Verhalten kristallisierter Körper gegen Druck, sowie der bisher bekannt gewordenen Versuche verschiedener Forscher lässt sich mit Bestimmtheit sagen, dass die aus der Beschaffenheit der Gesteine von A. HEIM gefolgerte plastische Umformung in der Erdrinde als Folge von Dislokationen hoch belasteter Gesteine eintreten kann, und dass mit dieser Möglichkeit bei der Erklärung der Textur und Struktur dislozierter Gesteine gerechnet werden muss.

III.

Eine gewisse Schwierigkeit bei der Erörterung des Problems ist dadurch entstanden, dass die Ausdrücke: „plastische Umformung“ und „bruchlose Umformung“ nicht selten als gleichwertig gebraucht werden. Tatsächlich kann plastische Umformung zu bruchloser Umformung führen, aber nicht jede bruchlose Umformung muss ausschliesslich oder vorwiegend plastisch sein: Umkristallisation und Ummineralisation können gleichfalls bruchlose Umformung hervorrufen oder neben der plastischen erheblich mitwirken.

Während die meisten Forscher in der Annahme übereinstimmen, dass in gepressten Gesteinen vorhandenes Wasser lebhaftere Ummineralisation bewirkt, so ist andererseits die Frage noch nicht entschieden, ob die Anwesenheit von Wasser zu diesem Vorgange immer unbedingt erforderlich ist. Nachdem durch die berühmten Versuche W. SPRING'S — sein im Literaturverzeichnis angeführter Vortrag von 1899 gibt eine kurze Zusammenfassung seiner Ergeb-

nisse — chemische Reaktionen allein durch Druck unter Ausschluss von Flüssigkeit erzielt waren und somit für verschiedene feste Körper ein durch Druck gesteigertes Diffusionsvermögen nachgewiesen war, konnte man mit der Möglichkeit derartiger Vorgänge auch in der Erdrinde rechnen. Es gelang zwar nicht, wie W. SPRING in dem gleichen Vortrag berichtet, durch hohen Druck Sand zu verfestigen, so dass SPRING zur Erklärung der Verfestigung von Sedimentgesteinen die Mitwirkung des Wassers in Anspruch nimmt; doch könnten Anhänger der Ummineralisation durch Druck ohne Wasser sich auf W. SPRING's Ergebnisstützen, dass die Fähigkeit der Diffusion im festen Zustand nur plastischen Körpern zukommt, mithin auch bei Körpern angenommen werden kann, die unter den Versuchsbedingungen SPRING's noch nicht plastisch waren. So wichtig übrigens die Frage an sich ist, besonders auch für gewisse Glieder der kristallinen Schiefer, ist sie doch für eine Untersuchung über die Plastizität der Gesteine nicht von entscheidender Bedeutung: Plastizität ist für die umstrittenen chemischen Reaktionen, Einwirkung fester Körper aufeinander ohne Mitwirkung einer Lösung, offenbar eine Vorbedingung, nicht eine Folge, und die Ummineralisation mit oder ohne Wasser kann überhaupt nicht die plastische, sondern nur die bruchlose Umformung eines Gesteins bedingen oder begünstigen.

Für die Frage, ob und in welchem Masse wirklich plastische Umformung im einzelnen Falle stattgefunden hat, ist die von F. BECKE und U. GRUBENMANN eingeführte Anwendung des RIECKE'schen Prinzips auf den Lösungsumsatz von grosser Bedeutung. Nach RIECKE wird der Schmelzpunkt eines Körpers in seiner gesättigten Lösung durch Druck oder Zug, der nur ihn, nicht auch die Lösung betrifft, herabgesetzt; in diesem Falle muss ein Teil von ihm in Lösung gehen, die Lösung mithin übersättigt werden. Aus der übersättigten Lösung scheidet sich die Substanz an den Orten geringeren Druckes wieder ab; von einem in der Längsrichtung einseitig gepressten Prisma löst sich, um ein Beispiel anzuführen, von den beiden Enden Substanz ab, die sich in der Richtung des geringsten Druckes, in unserem Falle senkrecht zur Längsrichtung des Prismas, wieder absetzt: aus dem Prisma entsteht ein mehr oder weniger tafelförmiges Gebilde, dessen Tafelfläche senkrecht zur Richtung grössten Druckes liegt. Ein derartiger Vorgang bringt im Gestein die von BECKE als Kristallisationsschieferung bezeichnete Textur hervor; zeichnet sich umgekehrt eine Richtung durch den kleinsten Druck aus, so lagert sich in ihr die aus den anderen Richtungen gelöste Substanz ab und das bevorzugte Längenwachstum der Gesteinsmengteile führt zu einer scheinbaren Streckung des Gesteins. Diese durch Ausscheidung und Absatz bedingten Gestaltsänderungen der einzelnen Gemengteile können mit den durch plastische Umformung hervorgerufenen durchaus übereinstimmen. Hieraus erklärt sich, dass ein Teil der

„Metamorphiker“ Textur und Struktur der kristallinen Schiefer mit F. BECKE und U. GRUBENMANN wesentlich durch Lösungsumsatz nach dem RIECKE'schen Prinzip erklären will, während andere mit A. HEIM und H. ROSENBUSCH dem direkten mechanischen Einfluss des Druckes einen grösseren Anteil zuschreiben, auch wenn sie, wie der Berichterstatter, eine direkte chemische Wirkung des Druckes (ohne Mitwirkung des Wassers) in grösserem Umfange nicht anerkennen können. Die Entscheidung ist durch Zusammenwirken mehrerer bekannter und vielleicht noch zahlreicherer unbekannter Ursachen erschwert; nur verhältnismässig selten sprechen die zu beobachtenden Erscheinungen nach dem gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse so eindeutig für die eine oder andere Ursache, wie in dem von L. MILCH 1904 beschriebenen, plastisch deformierten Quarzkorn aus dem Verrucano-Konglomerat des Murgtales.

IV.

A. HEIM unterscheidet „Gesteinsdeformationen“ und „Mineraldeformationen“ und erweitert für Gesteine, ihrer Definition als geologisch selbständige Teile der festen Erdrinde entsprechend, die von ihm als gleichwertig benützten Bezeichnungen: „bruchlose Umformung“ und „plastische Umformung“ erheblich über die Grenzen hinaus, die der Mineraloge bei der Untersuchung von Eigenschaften seiner chemisch und physikalisch homogenen Kristalle inne halten muss. So führt er (1908) aus: „Vor dreissig Jahren habe ich noch kaum daran zu denken gewagt, dass ein enorm stenglig ausgequetschter Gneis ursprünglich ein massiger Granit gewesen sein könnte. Wenn ein solches Material auf z. B. ein Viertel der ursprünglichen Dicke und auf die vierfache Länge deformiert ist, und dabei ausgeprägte Lineartextur erhalten hat, aber festes, zusammenhängendes Gestein geblieben ist, nicht in Brocken, nicht in eine Breccie sich umgewandelt hat, so muss ich das als Ganzes eine plastische Gesteinsumformung nennen. Dass dabei die einzelnen Elemente des Gesteines sich verschieden verhalten haben, ob z. B. der Quarz feintrümmerig zerquetscht, der Feldspat zum Teil Lösungsumsatz erfahren hat, zum Teil dabei in Sericit umgewandelt ist, und wenn Sericit und Glimmer vorherrschend nach Gleitflächen sich bewegt haben, so ändert das an der Tatsache nichts, dass das Gestein umgeformt ist, **ohne als Gestein zu zerbrechen**. Hätte die Dislokation hier nicht ein Gestein erfasst, das schon vorher über seine rückwirkende Gesteinsfestigkeit belastet, d. h. in latent plastischem Zustand sich befunden hätte, so wäre diese Deformation gar nicht zustande gekommen. Man muss nicht von jeder Gesteinsdeformation verlangen, dass sie zugleich auch alle Einzelelemente des Gesteines in gleich tadelloser Weise bruchlos umforme. Gesteinsdeformation und

Mineraldeformation brauchen nicht identifiziert zu werden.“ (p. 65, 1908.)

Noch weiter geht J. LEHMANN (1889); er glaubt „sogar mit Recht eine Gesteinsumformung, bei welcher nur die einzelnen Gemengteile zerspalten und sich aneinander verschieben, als eine bruchlose bezeichnen zu können, wenn das Gestein seinen Zusammenhalt bewahrt hat und keine das Gestein durchsetzenden Risse vorhanden sind.“

Vielleicht käme man in Fällen, wie sie A. HEIM im Auge hat — die von J. LEHMANN vorgeschlagene Ausdehnung geht wohl etwas zu weit, ganz abgesehen davon, dass derartige rein klastische Einwirkungen fast immer ein Zerbrechen des Gesteins zur Folge haben werden — zur Bezeichnung der mit dem Gestein vorgegangenen Veränderung mit dem allgemeineren Ausdruck „Umformung“ aus, die den Gegensatz zur Zertrümmerung wohl genügend betont. Zerbricht ein Körper unter Druck, so ändert er nicht seine Form, wird also nicht „umgeformt“, sondern verliert sie — so bezeichnet auch F. RINNE (1903) seine gepressten, nach der Beanspruchung teils aus plastisch deformierten Körnern, teils aus Vergrusungszonen bestehenden Marmorsäulen als „umgeformt“. Durch Zusätze wie „nahezu plastisch“, „teilweise durch Lösungsumsatz“ und andere mehr könnte man dann Art und Grad der Umformung angeben, wie sich ja auch in der Natur alle Übergänge und Zwischenglieder finden und wie sie von ADAMS und NICOLSON (1901) für plastische Umwandlung in ihren Versuchen hergestellt wurden. Eine derartige Beschränkung des Ausdrucks würde dann das Auftreten von zertrümmerten Mineralen und von Sprüngen in „umgeformten“ Gesteinen nicht als Beweis gegen die Plastizität des Gesteins überhaupt erscheinen lassen. Auf diese Weise würde ein Gegengrund gegen die von A. HEIM begründete und durch Experimente zahlreicher Forscher vielfach gestützte Lehre von der Umformung der Gesteine in der Geologie wegfallen; gleichzeitig würde es der aus kristallographischen Gründen erforderlichen, vielfach nachgewiesenen und von der physikalischen Chemie anerkannten Plastizität der Minerale leichter werden, sich bei der Erklärung der Struktur metamorpher Gesteine den ihr neben anderen Ursachen (Zertrümmerung und Ausheilung von Sprüngen, Lösungsumsatz durch überhitztes Wasser, RIECKE'sches Prinzip) gebührenden Platz zu verschaffen und zu erhalten.

Hierfür sind die Aussichten nicht ungünstig. Von allen Forschern, die sich eingehender mit der Frage der Plastizität und der bruchlosen Umformung der Gesteine beschäftigt haben, nimmt wohl nur E. WEINSCHENK einen grundsätzlich ablehnenden Standpunkt ein. Zwar erkennt er (1902) für Kalk und Tonschiefer die Möglichkeit bruchloser Faltungen an, betont aber, dass „weitaus in den meisten gefalteten Gesteinen die Erscheinungen einer inneren Zertrümmerung

der Bestandteile die Verbiegung der Schichten begleiten, bei diesen also von einer bruchlosen Faltung, von einem eigentlich plastischen Verhalten nicht die Rede sein kann.“ In anderen Fällen bezeichnet er die bisher als sekundär betrachtete, d. h. nach der Verfestigung des Gesteins erworbene Gestalt und Anordnung von Gemengteilen schieferiger Gesteine, soweit diese überhaupt als aus Schmelzfluss entstanden angesprochen werden können, als primär und erklärt die abweichende Beschaffenheit durch Einwirkung gerichteten Druckes auf einen Schmelzfluss während der Auskristallisation. Auf diese „Piezokristallisation“ kann in diesem Zusammenhange nicht eingegangen werden (vergl. hierüber diese Rundschau I, 49 ff.); aber selbst wenn man diese Anschauungen für gerechtfertigt halten sollte, beweisen sie nichts gegen die Plastizität als allgemeine Eigenschaft der Kristalle und können andererseits zur Erklärung entsprechender Erscheinungen in dislozierten Sedimentgesteinen selbstverständlich nicht herangezogen werden. Bei den meisten anderen Forschern machen sich wesentlich Unterschiede des Grades geltend; Meinungsverschiedenheiten betreffen weniger die Frage, ob Plastizität bei der Gesteinsumformung mitwirkt, sondern inwieweit die beobachteten Erscheinungen dislozierter Gesteine auf Plastizität zurückgeführt werden können. So wendet sich, um einige der jüngsten Arbeiten zu erwähnen, G. STEINMANN (1907) zwar gegen die latente Plastizität HEIM's, weist aber bruchloser Faltung und Ausdünnung, überhaupt bruchloser Deformation eine bedeutende Rolle zu und C. SCHMIDT bekämpft (1908) nicht die Lehre, dass „in gewissen Tiefen der Erdkruste das Gestein unter hydrostatischem Druck allgemein plastisch sich verhält“, sondern nur die seiner Ansicht nach zu geringe Tiefe, für die A. HEIM die allgemeine Plastizität angenommen hat. Aber auch diejenigen Forscher, die wie C. R. VAN HISE, F. BECKE und U. GRUBENMANN in der Wirkung des überhitzten Wassers die Hauptursache des Mineralbestandes und der Struktur der metamorphosierten Gesteine erblicken, erkennen eine Mitwirkung der Plastizität an, so dass Versuch, Theorie und Deutung der petrographisch-mikroskopischen Beobachtungen bei dem gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse der Plastizität der Mineralien und Gesteine eine wichtige Stellung anweisen.

Schuttbewegungen.

Von **K. Stamm** (Bonn).

Literatur.

1. G. GÖTZINGER, Beiträge zur Entstehung der Bergrückenformen. (Geogr. Abhandlungen. Bd. IX. Heft 1. 1907.)
2. J. G. ANDERSSON, Solifluction, a component of subaerial denudation. (Journal of Geology. 1906. No. 2.)
3. STEPHAN R. CAPPS, Rock glaciers in Alaska. (Journal of Geology. 1910. No. 4.)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Geologische Rundschau - Zeitschrift für allgemeine Geologie](#)

Jahr/Year: 1911

Band/Volume: [2](#)

Autor(en)/Author(s): Milch Ludwig

Artikel/Article: [Über Plastizität der Mineralien und Gesteine 145-162](#)