Werk

Titel: Besprechungen

Ort: Leipzig

Jahr: 1911

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?345572157_0002|log54

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

info@digizeitschriften.de

II. Besprechungen.

A. Unter der Redaktion der Geologischen Vereinigung.

Über die Zusammensetzung der oberen Regionen der Atmosphäre.

Von **E. Kayser** (Marburg).

Hierzu Fig. 1.

HANN, J., Meteorol. Zeitschr. 1903. S. 122.
WEGENER, ALFR., Probleme der Aërologie. „Das Wetter", Monatsschr. f. Witterungskunde. 1909.
— — Über eine neue fundamentale Schichtgrenze der Erdatmosph. Beitr. z. Physik d. freien Atmosph. III S. 225. 1910.
— — Zusammensetzung der höheren Schichten d. Atmosph. Vorl. Mitt. Sitz. Ber. Ges. Beförd. d. ges. Naturw. Marburg 1911.
— — Unters. üb. d. Natur d. obersten Atmosphäreschichten. Pys. Ztschr. XII. Jahrg. S. 170 ff.
V. D. BORNE, G., Über die Schallverbreitung bei Explosionskatastrophen. Physik. Zeitschr. XI. S. 483. 1910.

Es ist schon lange bekannt, dass der Luftdruck mit der Höhe abnimmt. Schon in 5000 m Höhe ist er auf die Hälfte gesunken, und in 10—11 km Höhe hat man der Masse nach bereits $^3/_4$ der gesamten Atmosphäre unter sich.

Ebenso weiss man schon lange, dass die Lufttemperatur mit der Erhebung über die Erdoberfläche abnimmt, und zwar um 1° C auf je 100 m. Der Hauptgrund dafür liegt darin, dass die Luft beim Aufsteigen sich ausdehnt und dass mit dieser Ausdehnung eine Abkühlung verbunden ist.

Die Erfahrungen, die man in den beiden letzten Jahrzehnten bei Ballonfahrten, namentlich aber mittelst Registrierballons — mit denen Höhen von 29 km erreicht wurden — gemacht hat, haben aber zu dem wichtigen Ergebnisse geführt, dass eine Wärmeabnahme der Atmosphäre nur bis zur Höhe von 11 km[1]) stattfindet, während

[1]) Dieser Wert ist nur für unsere Breiten gültig. Nach dem Äquator zu steigt er allmählich auf 17 km an, während er an den Polen wahrscheinlich auf 9 km herabsinkt.

oberhalb dieser Grenze die Lufttemperatur bis zu gewaltigen Höhen fast unverändert — 55° C beträgt.

Die Höhengrenze von 11 km ist für unsere Atmosphäre von ausserordentlicher Bedeutung: sie scheidet nicht nur eine untere, dichtere Gas-Zone mit nach oben abnehmender Temperatur von einer oberen, dünneren Zone mit sich wesentlich gleichbleibender Temperatur, sondern es beschränkt sich auch die ganze Zirkulation der Luft auf die untere Zone, die Troposphäre der Meteorologen, während in der oberen Zone statisches Gleichgewicht herrscht. Es findet hier keine Kondensation des Wasserdampfs mehr statt. Diese — und damit alle Wolkenbildung — ist vielmehr ganz auf die Troposphäre beschränkt. In dieser spielt sich mithin alles ab, was wir als „Wetter" bezeichnen, so dass man alles Recht hätte, die Troposphäre als die Wolken- oder Wettersphäre zu bezeichnen.

Was wissen wir nun über das über der Troposphäre liegende Viertel der Atmosphäre?

Soviel ist jedenfalls sicher, dass dieses Viertel an Dicke die Troposphäre so übertrifft, dass diese dagegen fast verschwindet. Denn einmal beweist das Hinaufreichen der Dämmerungserscheinungen bis etwa 70 km über den Meeresspiegel, dass noch in solchen Höhen eine Atmosphäre vorhanden ist, die bei Sonnendurchstrahlung das Licht diffus zu reflektieren vermag. Dass aber die Atmosphäre noch viel höher hinaufgeht, zeigt das in 100—150 km Höhe erfolgende Erglühen der Meteoriten (sog. Sternschnuppen), das nur eine Folge des Widerstandes ist, den die Gashülle unserer Erde dem Eindringen dieser mit ungeheurer Geschwindigkeit ankommenden Körper entgegensetzt. Und endlich kann man die in Höhen von 400—500 km sich abspielenden obersten Polarlichter, ganz abgesehen von ihrem Wesen, nur aus der Annahme erklären, dass selbst in dieser Entfernung von der Erde noch eine Atmosphäre von genügender Dichte vorhanden ist, um gewisse Strahlen zu absorbieren.

Was die Frage nach der Beschaffenheit der Atmosphäre in diesen Höhen betrifft, so hat man erst in allerneuester Zeit sie zu beantworten versucht.

Bereits 1903 hatte der berühmte Wiener Meteorologe Hann die Vermutung ausgesprochen, dass die Zusammensetzung der Atmosphäre in verschiedenen Höhen sehr verschieden sein, und dass Änderungen sich sehr rasch vollziehen könnten.

Einen wichtigen Anhaltspunkt für die Annahme einer solchen Änderung haben die vielbesprochenen leuchtenden Nachtwolken geliefert, die 1883 im Gefolge des Ausbruchs des malaiischen Vulkans Krakatau entstanden und jahrelang durch Beobachtung verfolgt werden konnten. Es ist festgestellt worden, dass diese, auf die allerfeinsten, bei jenem Ausbruche emporgeschleuderten Aschen-

teilchen zurückzuführenden Wolken überall eine Höhe von etwa 70 km über dem Meere inne gehalten haben, also dieselbe Höhe, bis zu der die Dämmerungserscheinungen hinaufreichen. Darin lag aber ein Hinweis darauf, dass sich in der genannten Höhe eine Änderung in der Beschaffenheit der Atmosphäre vollziehen muss, die ebensowohl den Ausbruchsmassen des Krakataus Halt gebot, wie sie die obere Grenze der Dämmerung bestimmt.

HANN dürfte der erste gewesen sein, der gemutmasst hat, dass der an der Erdoberfläche nur in Spuren vorhandene Wasserstoff mit zunehmender Höhe sehr an Bedeutung gewinnen, und in bestimmter Höhe die Atmosphäre fast allein zusammensetzen könne.

Von einem Wasserstoffgehalt von 0,01 Prozent (auf 78,03 Stickstoff, 20,99 Sauerstoff und 0,94 Argon) an der Erdoberfläche ausgehend, berechnete HANN auf Grund des DALTON'schen Gesetzes, dass noch in 50 km Höhe der Stickstoffgehalt der Atmosphäre nahezu unverändert (79 Volumprozente) sein müsse, dass er aber in 100 km Höhe nur noch $^1/_{10}$ Prozent betrage, während der Gehalt an Wasserstoff dort auf 99,5 Prozent angewachsen sei.

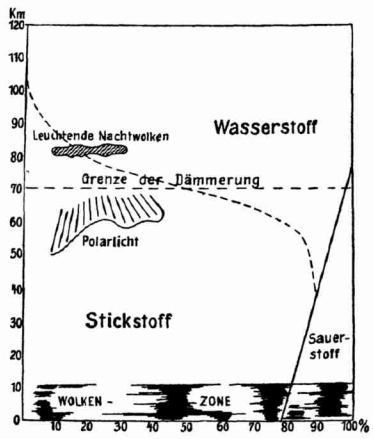

Fig. 1.

Neuerdings hat nun ALFRED WEGENER, ebenfalls auf Grund des DALTON'schen Gesetzes und unter Voraussetzung des nämlichen Wasserstoffgehaltes an der Erdoberfläche, aber unter Annahme etwas anderer (höherer) Mitteltemperaturen für die höheren Regionen der Atmosphäre, deren Zusammensetzung abermals berechnet und die dabei erlangten Ergebnisse durch die nebenstehende Abbildung Figur 1 graphisch dargestellt.

Es ergibt sich daraus, dass die Zusammensetzung der Lufthülle unserer Erde gerade in der Höhe von 70 km eine sehr wesentliche Änderung erleidet, deren Ursache in dem sich dort vollziehenden, ungemein raschen Überhandnehmen des Wasserstoffs zu suchen ist. In 70 km Höhe liegt also eine zweite, überaus wichtige Grenze der Atmosphäre: die Grenze zwischen einer tieferen, wesentlich aus Stickstoff bestehenden Zone und einer höheren, wesentlich aus Wasserstoff bestehenden. Bei dem grossen Unterschiede im spezifischen Gewicht von Stickstoff und Wasserstoff muss die Trennung beider Zonen sehr scharf sein, und daraus erklärt sich, warum die Krakatau-Aschen gerade hier, an der Basis der leichteren Gassphäre, Halt gemacht haben.

Aus der obigen graphischen Darstellung ergeben sich aber noch einige weitere bemerkenswerte Tatsachen. Man sieht, dass der Stickstoffgehalt zunächst mit der Höhe noch zunimmt und etwa bei 35 km ein Maximum von 87 % erreicht. Man könnte deshalb den unteren Teil der Atmosphäre bis zur Höhe von 60 km als Stickstoffatmosphäre kennzeichnen. Der Sauerstoffgehalt nimmt vom Erdboden an mit der Höhe sehr gleichmässig ab. Die Wasserstoffatmosphäre aber enthält keinen nennenswerten Gehalt an Sauerstoff mehr, und daraus folgt, dass die in ihr zum Aufleuchten kommenden Meteoriten nicht verbrennen, sondern nur erglühen.

Haben wir nun irgendwelche tatsächlichen Beweise für das Vorhandensein einer Wasserstoff-Atmosphäre?

Darauf wäre erstens zu antworten, dass der bekannte amerikanische Astronom PICKERING berichtet, er habe im Spektrum eines Meteoriten die Linien des Wasserstoffs und des Heliums beobachtet. Weiter weiss man schon seit längerer Zeit, dass die Meteoriten verschiedene freie Gase enthalten und dass unter diesen der Wasserstoff — wie er wohl zuerst durch GRAHAM für den Meteoriten von Lenarto festgestellt worden ist — eines der häufigsten ist. Ist die Annahme, dass diese Gase erst beim Durchschneiden der Atmosphäre von dem Meteoriten aufgenommen werden, zulässig, so würde die Häufigkeit des Wasserstoffes in ihnen bei der gewaltigen Dicke der Wasserstoffatmosphäre und dem Umstand, dass in ihr die Meteoriten zum Erglühen kommen, sehr begreiflich sein.

Sehr beachtenswert sind aber auch die merkwürdigen Schallerscheinungen, die wiederholt, zuletzt 1908 bei der grossen Dynamitexplosion an der Jungfraubahn im Berner Oberlande beobachtet worden sind. Die Explosion ist hier nicht nur an ihrem Ausgangspunkte und in dessen Umgebung gehört worden, sondern ausserdem in grosser Deutlichkeit auch in 200 km Entfernung, in einer den Ausgangspunkt halbkreisförmig umschliessenden Zone, während im ganzen zwischenliegenden Gebiete (in der sogen. Zone des Schweigens) nichts davon vernommen worden ist. Diese auffallende Erscheinung lässt sich kaum anders erklären, als durch Annahme einer Totalreflexion der Schallwellen, die nach V. D. BORNE in etwa 70 km Höhe über dem Erdboden, also an der Grenze von Stickstoff- und Wasserstoffatmosphäre erfolgt sein muss.

Die Annahme einer Wasserstoff-Sphäre in der Gashülle unserer Erde würde ein bemerkenswertes Gegenstück finden in der Sonnenatmosphäre, die ja in der Chromosphäre gleichfalls eine Wasserstoffhülle besitzt. Vielleicht wird man diese Analogie später noch weiter treiben und über der Wasserstoffzone noch eine Zone eines noch leichteren Gases, entsprechend dem Coronium der Sonnenkorona, annehmen können. In ihr würden sich die höchsten Polarlichter abspielen, die wie das Coronium eine grüne (freilich an etwas anderer Stelle liegende) Spektrallinie zeigen.

In seiner letzten Arbeit knüpfte WEGENER nun an die gelegentlich schon früher geäusserte Vermutung an, dass an der Zusammensetzung der obersten Schichten der Atmosphäre ein noch unbekanntes Gas beteiligt sei, das noch leichter als Wasserstoff ist. Dieses, chemisch allerdings noch nicht nachgewiesene Gas, das Geocoronium, würde etwa oberhalb 200 km der vorherrschende Bestandteil der Atmosphäre werden und die bekannte grüne Spektrallinie des Polarlichtes erzeugen. Auch dürfte die Zone dieses Gases der Schauplatz des Zodiakallichtes sein. Auf diese Weise würde eine vollkommene Analogie zwischen der Erdatmosphäre und der Sonnenatmosphäre geschaffen.

Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit der Erde als geologischer Faktor.

Von **F. Pockels.**

TAYLOR, W. B., On the Crumpling of the Earth's Crust. Sillimans Journal (3) **30**. S. 259—277. 1885.

BÖHM EDLER VON BÖHMERSHEIM, A., Abplattung und Gebirgsbildung. 83 S. Leipzig u. Wien, Fr. Deuticke, 1910.

Während bis vor zwei bis drei Dezennien die Geologen nach dem Vorgange ELIE DE BEAUMONT's die Kontraktion der Erde durch Abkühlung allgemein als ausreichende Ursache der Gebirgsbildung ansahen, wurden in neuerer Zeit mehrfach Einwände gegen diese Hypothese geltend gemacht, und man suchte nach anderen Erklärungsmöglichkeiten für die gewaltigen tangentialen Drucke in der äusseren Erdkruste, welche ohne Zweifel bei der Entstehung der Faltengebirge wirksam gewesen sind. Nachdem WILLIAM THOMSON (1867) und später namentlich G. H. DARWIN auf die wichtige Rolle hingewiesen hatten, welche die Reibung der Gezeitenwelle bei der Entwickelung der Planeten und Trabanten gespielt haben muss, lag es nahe, diesem Faktor auch einen indirekten Einfluss auf die Entwickelung der Oberflächengestalt der Erde zuzuschreiben. Entsprechend der durch die Gezeitenreibung notwendig bedingten allmählichen Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit der Erde musste auch deren Abplattung abnehmen, und die feste Erdrinde musste sich der so veränderten Erdgestalt anzupassen suchen. Da nun die Oberfläche eines Rotationsellipsoids von konstantem Volumen bei Verringerung der Abplattung abnimmt (— denn für die Kugel ist ja die Oberfläche ein Minimum —), und dies in noch weit beträchtlicherem Masse für den Umfang des Äquators gilt, so wäre hierin eine mögliche Ursache für ein Zusammenschieben der Erdrinde gegeben. Dieser Gedanke scheint zuerst von OSMOND FISHER (Physics of the Earth's Crust, London 1881, Chap. XIV, p. 183) ausgesprochen

worden zu sein, allerdings um ihn sogleich als zur Erklärung der Gebirgsbildung nicht anwendbar zu verwerfen. In positivem Sinne ist dann derselbe Gedanke wieder aufgenommen in der eingangs zitierten Abhandlung von TAYLOR; jedoch beschränkt sich dieser auf eine allgemein gehaltene, lediglich qualitative Erörterung der Frage, ohne den Versuch zu machen, die Grössenordnung der etwa aus der Rotationsänderung resultierenden Kontraktionen bezw. Tangentialdrucke auch nur abzuschätzen. Ohne eine quantitative Untersuchung der fraglichen Effekte lässt sich aber natürlich durchaus nicht beurteilen, ob diese eine zureichende Erklärung der Gebirgsbildung abgeben können. Eine solche quantitative Untersuchung ist nun neuerdings in der genannten Schrift von BÖHM VON BÖHMERSHEIM versucht worden, und diese wollen wir im folgenden einer näheren Betrachtung unterziehen.

Der Verf. behandelt das Problem des Überganges eines Rotationsellipsoids in ein weniger abgeplattetes, bezw. in eine Kugel von gleichem Rauminhalt zunächst rein geometrisch, d. h. er untersucht, welche Verschiebungen, Längen- und Flächenänderungen in der Oberfläche des Ellipsoids bei einer Abnahme der Abplattung von $10\,\alpha$ auf $9\,\alpha$, $8\,\alpha \ldots 2\,\alpha$, α, 0 (— unter α die jetzige Abplattung der Erde verstanden —) stattfinden, wenn sich das Ellipsoid wie eine inkompressible Flüssigkeit verhält, und wenn die Oberflächenschicht keine diskontinuierlichen Verschiebungen (Gleitungen) gegen das Innere erfahren kann. Letztere Voraussetzung wird vom Verf. stillschweigend gemacht; sie ist aber wesentlich für seine Rechnung.

Es ergibt sich, dass bei der Abnahme der Abplattung um den Betrag α sämtliche Breitenkreise sich nahe in gleichem Verhältnis — um etwa 1,1 Promille — verkürzen, ebenso die Meridianbögen in der Nähe des Poles, während sich letztere in der Nähe des Äquators um nahe den doppelten Betrag (also 2,2 ‰) dilatieren. Die Flächenzonen zwischen je zwei um 5^0 voneinander entfernten Breitenkreisen vergrössern sich in niederen Breiten (am Äquator um etwa 1,1 ‰), verkleinern sich in höheren Breiten (am Pol um 2,2 ‰); die Gesamtoberfläche der Erde würde sich beim Übergang in die inhaltsgleiche Kugel jetzt nur noch um 500 Quadratkilometer verkleinern, während diese Verkleinerung bei den früheren Stufen der Abplattungsabnahme beträchtlich grösser war.

Man sieht hieraus, dass die Längen- und Flächenänderungen, welche durch eine Abnahme der Abplattung vom doppelten auf den heutigen Wert bedingt würden, relativ sehr gering wären; beispielsweise würde sich der Äquatorumfang nur um etwa 44 km verkürzen, und Meridianbögen würden überhaupt erst in Breiten $> 55^0$ eine Verkürzung erfahren. Wollte man also die Erdkruste als eine feste Haut betrachten, die der Deformation eines flüssigen, inkrompressibeln Erd-Innern in der vom Verf. angenommenen Weise folgte, so wären doch jene Verkürzungen zur Erklärung der Gebirgsbildung wohl nicht

ausreichend (abgesehen davon, dass bis zur Breite 55^0 dadurch nur meridionale Falten entstehen könnten). Und dabei entspricht der Abnahme der Abplattung von 2α bis auf den heutigen Wert schon eine Zunahme der Umdrehungszeit von $6^h\ 54^m$ (Tabelle XI des Verf.); der Zeitraum, der erforderlich wäre, damit durch die heutige Gezeitenreibung eine solche Verlangsamung der Rotation bewirkt würde, wird aber nach einer Rechnung von J. C. ADAMS auf rund 2000 Millionen Jahre geschätzt. Wenngleich eine andere Rechnung (OPPENHEIM, Astr. Nachr. **113,** S. 208, 1886) auf einen Zeitraum von nur 400 Millionen Jahren führt, so kommt doch auch dieser noch der oberen Grenze nahe, welche die Geologie für das Alter der ältesten Sedimente überhaupt nach jetziger Kenntnis in Anspruch nehmen kann. (Vgl. J. KOENIGSBERGER, Geolog. Rundschau **1,** S. 241.) Damit entfällt aber die Möglichkeit, den Beginn der Gebirgsbildung bis zu vielmal grösseren Abplattungen zurückzuverlegen, wie man es tun müsste, um ein einigermassen genügendes Ausmass der Oberflächenkontraktionen herauszubekommen.

In der Tat will denn auch der Verf. schliesslich gar nicht diese geometrischen Verkürzungen zur Erklärung der Gebirgsbildung benutzen. Er stellt eine, allerdings sehr unsichere, Schätzung an, derzufolge die Zunahme des Druckes im Erdinnern, die mit der Abnahme der Abplattung von 2α auf α verbunden ist, eine vielmal grössere Kontraktion verursacht hätte, als die entsprechende maximale geometrische, und eine weitere Schätzung, derzufolge die Kontraktion durch die in derselben Zeit stattgehabte Abkühlung noch 3- bis 4mal grösser gewesen sein muss, als diejenige durch Druckänderung. Demgegenüber würde also die „geometrische" Kontraktion ganz belanglos sein.

Der Erklärungsversuch VON BÖHM's geht nun dahin, dass nicht die Verkleinerung der Oberfläche, sondern die längs der Meridiane polwärts gerichteten Massenverschiebungen (die übrigens für die Abplattungsverminderung α auch nur 10,7 km im Maximum betragen) die gebirgsbildenden Kräfte verursacht haben sollen. Dass hierdurch tangentiale Drucke entstehen, wäre nun aber nicht möglich, wenn die Verschiebungen der Oberflächenelemente in kontinuierlichem Zusammenhang mit denen der inneren Massen erfolgten, wie es der Verf. als Grundlage seiner oben besprochenen Rechnungen zunächst angenommen hat. Diese Vorstellung gibt er daher nun auf und ersetzt sie durch die ganz andere, dass die innere Erdmasse infolge ihrer Starrheit der Abplattungsverminderung nicht so schnell folgen könne, wie die oberflächliche Rinde, so dass die letztere, um sich der neuen Gleichgewichtsgestalt anzupassen, sich über den Kern hingleitend polwärts verschieben müsse; die hierbei auftretende Reibung soll dann die gebirgsbildende tangentiale Druckkraft liefern, am stärksten da, wo die Verschiebung am grössten ist, d. h. in mittleren Breiten. Hierdurch würden sich zunächst nur meridional gerichtete Drucke,

also die Entstehung ost-westlich verlaufender Faltengebirge, erklären lassen; der Anlass zur Bildung meridionaler Gebirge soll in der Verkürzung der einzelnen Breitenzonen bei ihrer Polwärtsverschiebung gegeben sein.

Diese Hypothese liefert dem Verf. zugleich eine Erklärung für die periodischen Transgressionen des Meeres über das feste Land, indem nämlich das Meer der Abplattungsabnahme sofort und kontinuierlich, die feste Kruste aber nur verzögert und „ruckweise" folgen soll: hieraus würde für mittlere Breiten ein stetiges und langsames relatives Ansteigen des Meeresspiegels, abwechselnd mit relativ schnellen Hebungen des Landes, resultieren. Wir wollen hier nicht erörtern, inwieweit ein derartiges Verhalten in der geologischen Vergangenheit nachgewiesen werden kann; nach E. Suess (Antlitz der Erde II S. 686 ff.), auf den sich der Verf. beruft, scheinen die Kenntnisse über den zeitlichen Verlauf der säkularen Senkungen und Hebungen doch noch höchst unsicher zu sein.

Von der ganzen vorstehend skizzierten Hypothese des Verf. aber muss gesagt werden, dass irgend eine mechanische Begründung derselben in dem Buche nicht enthalten ist, und dass auch die (wie oben betont, unter ganz anderen Voraussetzungen gültigen) Rechnungen der beiden ersten Abschnitte ihr nicht als Grundlage dienen können. Das Problem der durch die Änderung der Rotationsdauer verursachten Spannungen und Deformationen der Erdrinde kann eben nicht geometrisch, sondern nur mechanisch behandelt werden. Hierfür fehlen uns aber einstweilen die nötigen physikalischen Grundlagen, d. h. ausreichende Kenntnisse über den physikalischen Zustand des Erdinnern in verschiedenen Tiefen. Es würde beispielsweise einen grossen Unterschied machen, ob die ganze Erde als starr zu behandeln ist, oder ob unter einer dünnen festen Oberflächenschicht eine zähflüssige Magmaschicht anzunehmen ist. In ersterem Falle hätte man es mit einem Problem der Elastizitätstheorie zu tun, welches unter der — allerdings von der Wirklichkeit stark abweichenden — Annahme einer homogenen Erde von W. Thomson bereits gelöst ist; es ergab sich dabei, dass z. B. ein Erdkörper von der Starrheit des Glases sich der, seiner jeweiligen Rotationsgeschwindigkeit entsprechenden, flüssigen Gleichgewichtsgestalt bereits lediglich durch elastische Deformation bis etwa zur Hälfte anpassen würde — ein Resultat, welches auch in der Theorie von Böhm zu berücksichtigen gewesen wäre. Im zweiten Falle liegt das Problem wesentlich komplizierter; Zusammenschiebungen der äusseren Kruste, wie sie von Böhm annimmt, wären hier als Folge der Rotationsverminderung allenfalls denkbar, obwohl unwahrscheinlich. Ob aber auf diesem Wege eine Erklärung der Gebirgsbildung zu gewinnen ist, darüber vermögen, wie gesagt, die an sich immerhin interessanten Betrachtungen des Verf. noch keinen Aufschluss zu geben.

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.

Loewinson-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 Gesteinsverknetungen. 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 Aggregatszustandes. 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 forts 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 kristallinischen 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 kontaktmetamorphen 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 Entwickelung 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 Antimonglanzkristalle 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 Flussspat 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, Molybdänglanz, 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 Zerreissungen 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 Marmorkugeln 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 Grenzteile 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 anschmiegten, 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 20875 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 Auswalzung 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° 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° C) schon bei Temperaturen von 200° 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° 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 niederer Temperatur beanspruchten: der bei höherer Temperatur deformierte Versuchskörper besitzt nahezu die gleiche Druckfestigkeit wie eine gleiche ungepresste 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 ungepressten 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 lebhafte 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 Ergebnis stützen, 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 auf, 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 Vierteil 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 „Piëzokristallisation" 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.)

4. E. Howe, Landslides in the San Juan Mountains, Colorado, including a consideration of their causes and their classification. (United States Geological Survey, Professional Paper 67. 1909.)
5. A. Heim, Der Bergsturz von Elm. (Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 1882.)
6. Geol. Atlas of the United States, Folios: Telluride (57), Silverton (120), Rico (130), Engineer Mountain (171).

Durch Einwirkung chemischer und mechanischer Agentien verwittert im Laufe der Zeit jedes anstehende Gestein. Haben die Verwitterungskräfte längere Zeit ungestört wirken können, so entsteht ein Normalprofil der Verwitterung, das durch folgende Zonen charakterisiert wird: 1. Gestein, 2. Übergangszone, 3. eigentlicher Verwitterungsschutt und -boden, 4. Humusschicht. Je nach der Gesteinsbeschaffenheit ändert sich die Korngrösse des Verwitterungsschuttes; danach kann man unterscheiden Trümmer-, Block-, Brocken-, Scherben-, Splitter- und Grusschutt. Dieses Normalprofil trifft man aber nicht immer an. An manchen Stellen folgen auf die drei oder vier regulär entwickelten Zonen von neuem Trümmer- oder Brockenmassen, die dann natürlich sich an sekundärer Lagerstätte befinden. Abgesehen von tektonischem und Gletscherschub, zwei Bewegungskräften, die an den meisten Stellen ohne weiteres ausscheiden, könnte die Umlagerung verursacht sein durch Einwirkung des Wassers, wie bei den Verschwemmungshalden, oder durch Einwirkung der Schwerkraft, wie bei den Schutthalden. Gegen die erste Annahme spricht das Fehlen jeder Schichtung, abgesehen davon, dass grober Schutt nicht verschwemmt werden kann, gegen die zweite der vielfach geringe Böschungswinkel von wenigen Graden. Da also Wasser und Schwerkraft allein die Verfrachtung nicht haben verursachen können, muss man eine kombinierte Einwirkung dieser beiden Kräfte heranziehen, d. h. man muss eine Rutschung annehmen. Aber nicht eine Rutschung im gewöhnlichen Sinne, denn diese hat, solange sie frisch ist, ein ganz charakteristisches Profil: im oberen Teile, von wo die abrutschenden Massen ausgegangen sind, ist das Profil konkav, im unteren, wo sich die abgerutschten Massen angehäuft haben, konvex. Dieses Profil fehlt bei unserer Verwitterungsdecke. Man könnte also an eine alte, vernarbte Rutschung denken. Denn mit der Zeit stürzt oder rutscht die Rückwand der Ausbruchsnische ein, die Schuttanhäufung im unteren Teile der Rutschung, die infolge Durchtränkung mit Wasser in eine breiige Masse verwandelt wird, verflacht sich, und das Profil nähert sich wieder dem ursprünglichen Profil der geraden Böschung. Aber auch diese Annahme reicht nicht aus, denn selbst kleine Rutschungen verrücken das Material um ein beträchtliches Stück von der Stelle, wo es ansteht, während man, wenn die oberste Lage unseres Verwitterungsprofils aus ortsfremdem Material besteht, vielfach feststellen kann, dass dieses ganz in der Nähe ansteht, und zwar gehängeaufwärts. Man kann sogar oft die Gesteinsbrocken bis zum Anstehenden verfolgen und bemerkt dann, dass

auch schon das Gestein in der Übergangszone von der im Sinne des Gehänges erfolgten Verschiebung betroffen wurde, allerdings in geringerem Masse als der hangende Schutt. Das tritt besonders deutlich hervor, wenn harte Schichten mit weichen wechsellagern, z. B. Sandsteine mit Mergeln. Die weichen Schichten sind dann stark geschleppt, eine Folge der Druckwirkung des von seinem Muttergestein sich etwas verschiebenden, gehängeaufwärts anstehenden harten Schutts. Ebenfalls Druckwirkungen schreibt GÖTZINGER die Fältelung einer weichen Unterlage zu, die von Schutt überlagert wird. Da diese vielfach unregelmässig, ganz unabhängig von der Richtung des Gehänges verläuft, kann sie nicht durch seitlichen Druck, sondern nur durch Druck von oben erklärt werden. Durch sein Gewicht verdrückt der Schutt seine weiche Unterlage; da diese nicht seitlich entweichen kann, wird sie zusammengestaucht und der Schutt kann in Richtung der Vertikalen nachsinken. Eine solche Bewegung des Schuttes nennt GÖTZINGER Sackung.

Im allgemeinen ist diese Form der Schuttbewegung selten. Sie ist um so häufiger, je flacher die Gehänge sind. Wird der Gehängewinkel grösser, so überwiegt die Erscheinung des wandernden Schuttes, d. h. der Verwitterungsschutt wandert von seiner ursprünglichen Lagerstätte gehängeabwärts. Da hierdurch ein mehr seitlicher Druck auf die liegenden Schichten ausgeübt wird, werden diese in Richtung des Gehänges verbogen. Man kann hierbei zwei Fälle unterscheiden, je nachdem das Fallen der Schichten steiler ist als der Gehängewinkel oder weniger steil. Im ersten Falle werden die Schichtköpfe zu Haken umgebogen, die gegenüber den ursprünglichen Schichten ein widersinniges Fallen aufweisen, im zweiten Falle behält das Fallen dieselbe Richtung, die Schichten erleiden nur eine Schleppung. Im allgemeinen wird die Hakenform um so besser ausgebildet sein, je mächtiger der Schutt, je plastischer und zäher das Gestein und je steiler die Böschung ist. Sind die liegenden Schichten sehr weich, so kann eine derartige Verbiegung schon durch eine sehr wenig mächtige Bedeckung feiner Humuserde stattfinden, ja sie tritt unter günstigen Verhältnissen in geringem Masse auch ohne Schuttbedeckung ein, wenn sich gehängeabwärts den Schichten ein Hohlraum vorlagert, z. B. bei Steinbrüchen, an Prallstellen der Flüsse usw. Das sind dann Erscheinungen des Gehängedrucks, nicht Schuttdrucks. GÖTZINGER unterscheidet danach zwei Typen von Bewegungen der Schichtköpfe, 1. eine passive: die Schichten werden durch Einwirkung des hangenden Schutts verbogen, 2. eine aktive: durch irgend welche Vorgänge gelockerte Schichten verbiegen sich durch eigenmächtiges Vorrücken.

Da der Wanderschutt also die Fähigkeit besitzt, auf den Untergrund zerstörend einzuwirken, so muss man ihm, ebenso wie fliessendem Wasser, Rutschungen, Bergstürzen, Gletschern und Lavaströmen eine Art Erosionskraft zuschreiben. Da weichere Gesteine viel stärker

beeinflusst werden als harte, so ist die Erosion eine selektive. Sie ist natürlich auf die Partieen nahe der Oberfläche beschränkt. GÖTZINGER konnte im Wiener Wald einige Fälle beobachten, wo die liegenden weichen Schichten entgegen der Richtung des Abhanges gestaucht wurden. Hier lagen weiche Mergelschiefer zwischen zwei harten Sandsteinbänken; infolge der selektiven Erosion der darüber hinwegwandernden Schuttmasse wurden die weichen Schichten stärker erodiert als die harten, es bildete sich hier ein Schuttsack, der durch den von oben nachdrückenden Schutt von neuem ausgequetscht wurde und nach allen Seiten, auch gehängeaufwärts, auswich. Dadurch wurde auch der weiche Untergrund in Mitleidenschaft gezogen. Diese Bewegungsform bildet also ein Analogon zu dem „Aufbranden" eines Bergsturzes an dem gegenüberliegenden Gehänge (5).

Nach dem Prinzip von actio und reactio muss aber auch das Material, das die Erosion ausübt, in unserem Falle also die Steine des Wanderschuttes, von einer Abnutzung betroffen werden. In der Tat können die anfangs eckigen Verwitterungsbrocken nach genügend langer Bewegung eine Zurundung erfahren, vorausgesetzt, dass ihre Widerstandsfähigkeit gegen die Verwitterung so gross ist, dass sie nicht, bevor diese Zurundung erreicht werden kann, in feines Material zerfallen. Parallel zum Gehänge gestellte Steine zeigen oft auf ihrer Unterseite eine stärkere Abnutzung, bisweilen förmliche Glättung, und es entstehen so Formen, die Flussgeschieben gleichen.

Nach GÖTZINGER sollen auf diesen Geschieben auch Kritzen erzeugt werden können, allerdings nur unter besonders günstigen Verhältnissen, wenn weichere Gesteine z. B. in Quarzsand eingebettet sind. Allerdings fand GÖTZINGER nur Spuren breiterer Schrammen im Sandstein.

Die Wanderung des Schutts erfolgt heute noch; sie kann allerdings nur äusserst langsam vor sich gehen, da die wandernden Massen von Vegetation überspannt werden, und Vegetation nur möglich ist auf einem Boden, der eine gewisse Stabilität besitzt. Auch zeigen sich nirgends Lücken in der Vegetationsdecke, wie sie durch eine rasche Bewegung unbedingt erzeugt werden müssten. Andererseits wird durch die Vegetationsdecke ein hemmender Einfluss auf die Bewegung ausgeübt; infolgedessen ist die Schnelligkeit der Bewegung nicht an der Oberfläche am grössten, wie man eigentlich erwarten sollte, sondern unterhalb der Vegetationsdecke. Die Schuttmassen bewegen sich also wie in einem Schlauch vorwärts. GÖTZINGER konnte diese Annahme experimentell bestätigen: Pflöcke, die unter einem genau gemessenen Winkel in den Erdboden geschlagen worden waren, zeigten in einigen Fällen bei Wiederholung der Messung eine Versteilerung des Fallens, die daher rührte, dass der in die tieferen Partieen des Schutts hinabreichende Teil des Pflocks durch die dort herrschende stärkere Bewegung schneller fortgeführt wurde.

Noch mehr verzögernd wirkt auf die Schuttbewegung eine Wald-

decke. Die Bäume werden von der Bewegung nicht mit ergriffen, insbesondere konnte man nie feststellen, dass durch die langsame Schuttbewegung Bäume schief gestellt oder entwurzelt wurden. Das ist also ein Unterschied gegenüber schnelleren Schuttbewegungen, Rutschungen usw.

GÖTZINGER schlägt für diese langsame Schuttbewegung den Ausdruck „Kriechen" vor, analog dem englischen „creep", ein Ausdruck, der durch PENCK [1]) aus DAVIS [2]) in die deutsche Literatur eingeführt wurde. Dementsprechend wird dann der Kriechschutt mit „Gekriech" bezeichnet, wie man auch von Geröll und Geschieben spricht.

Nach GÖTZINGER ist das Gekriech überall verbreitet. Als Ursache für die Kriechbewegung kommt ebenso wie für die Rutschung vornehmlich die Durchtränkung von Boden, Schutt und Gestein mit meteorischem Wasser in Betracht. Diese kommt in erster Linie dadurch zustande, dass durch die Vegetationsbedeckung das fallende Regenwasser zu einem grossen Teil zurückgehalten wird, und durch die oberen Bodenlagen in die Tiefe dringt. Fördernd wirken hierbei Risse, die durch Insolation entstanden sind. Die Durchtränkung variiert nach der Jahreszeit, sie ist wahrscheinlich am grössten im Frühling während der Schneeschmelze. Sie ist grösser in Wiesengebieten als im Walde, während andererseits im Sommer die Verdunstung auf Wiesen grösser ist als im Walde. Die Wasseraufsaugung ist ferner abhängig von dem petrographischen Charakter des Untergrundes, da sandig-toniger Schutt (d. h. Lehm) das Wasser rasch aufschluckt (passive Wasseraufsaugung), während reiner Ton erst allmählich aus der Umgebung die Feuchtigkeit an sich zieht (aktive Wasseraufsaugung). Im allgemeinen wird Lehm am stärksten durchtränkt werden, da Ton von einem gewissen Punkte an kein Wasser mehr aufnehmen kann.

Im homogenen Schutt scheint in ca $^1/_2$ m Tiefe die Zone der grössten Durchtränkung zu liegen, da weiter oberhalb ziemlich viel Feuchtigkeit von der Vegetation verbraucht wird. In dieser Zone liegt auch die Linie der grössten Bewegung des Gekriechs.

Nach GÖTZINGER's Ansicht wird nun die Kriechbewegung folgendermassen veranlasst: Die Durchtränkung verursacht eine Volumvermehrung der Schutt- und Erdmassen. Dadurch werden die einzelnen Teilchen nach oben und nach den Seiten gedrängt. In der vertikalen Richtung erfolgt ein Aufblähen, nach den Seiten ein Abschieben in der Richtung des geringsten Widerstandes, also gehängeabwärts. Durch das Gewicht der lastenden Schuttmasse werden gleichzeitig die anstehenden Gesteinsschichten verquetscht. Daneben wird das

[1]) Geomorphologische Studien a. d. Herzegowina Zeitschr. d. D. u. Ö. A.-V 1900, S. 30.

[2]) The geographical cycle. Geogr. Journ. XIV, 1899, p. 495.

Herabwandern des Schutts befördert durch die Wirkung des Frostes, das wiederholte Gefrieren und Auftauen. Beim Gefrieren findet Volumvermehrung statt; einzelne Teilchen werden bergab gedrängt. Die beim Auftauen erfolgende Kontraktion ist nicht imstande, den entgegengesetzten Effekt hervorzurufen und so etwa die erste Wirkung auszugleichen. Doch kommt die Frostwirkung nur für die oberen Lagen der Schuttdecke in Betracht, da im allgemeinen in unseren Breiten der Frost nicht stark genug ist, um auch in die tieferen Lagen einzudringen.

Untergeordnete Bedeutung für die Fortbewegung des Schutts haben wachsende Pflanzenwurzeln und grabende Tiere, wie Maulwürfe und Regenwürmer.

Wird die Durchtränkung der Schuttdecke stark gesteigert, so nimmt die Schnelligkeit der Bewegung erheblich zu, und es entsteht die Erscheinung, die ANDERSSON unter dem Namen „Solifluktion" von der Bären-Insel beschrieben hat (2). Die Bären-Insel liegt im nördlichen Teil des Atlantischen Ozeans unter einer Breite von $74^1/_2{}^0$. Infolge dieser Lage herrschen hier ziemlich strenge Winter, die eine starke mechanische Verwitterung des Gesteins hervorrufen. Zudem können sich besonders auf den höher gelegenen Teilen gewaltige Schneemengen anhäufen. Wenn dann im Sommer die Schneeschmelze eintritt, werden grosse Wassermengen auf einmal frei, die den aus grobem und feinem Material bestehenden Verwitterungsschutt völlig durchtränken und in eine halbflüssige, schlammige Masse verwandeln. Diese bewegt sich langsam, jedoch rasch im Vergleich zum Gekriech der gemässigten Zonen, das Gehänge hinab, und es bilden sich im Tale Schlammströme, die man in gewissem Sinne mit Gletschern vergleichen kann. ANDERSSON spricht auch direkt von „Schlammgletschern" (mud-glaciers). Die Firnregion der wirklichen Gletscher wird bei den Schlammgletschern vertreten durch das mit Wasser durchsättigte Schuttfeld am unteren Rande des abschmelzenden Schnees, der Gletscher selbst durch den Schlammstrom. Auch moränenartige Gebilde können auftreten, wenn sich nämlich an einer Stelle besonders zahlreich grosse Blöcke vorfinden.

Die Schlammströme setzen sich zusammen aus Material jeglicher Grösse, von ganz feinem Sand bis zu grossen eckigen Blöcken.

Dass diese Schlammströme sich noch heute bewegen, geht einmal hervor aus ihrer ganzen Form, dass sie sich verhältnismässig rasch bewegen, kann man daraus schliessen, dass sich auf ihrer Oberfläche keine Vegetation hat ansiedeln können. Nur auf den über die Gesamtmasse hervorragenden Felsblöcken findet man bisweilen einige kümmerliche Pflanzen. In einigen seltenen Fällen wurden auch auf dem Schlammstrom selbst Pflanzen angetroffen, und da zeigte es sich, dass deren Wurzelwerk ausserordentlich stark entwickelt war, wie das nötig ist, um der Pflanze in diesem halbflüssigen Medium einige Stabilität zu verleihen. Bei ziemlich steilen

Gehängen konnte sogar beobachtet werden, dass der obere Teil des Wurzelstockes tiefer lag als die äussersten Wurzelfasern; das lässt sich nur dadurch erklären, dass sich die oberflächliche Partie schneller bewegte als die tiefer gelegenen Teile. Hier besteht also ein Unterschied gegen das Gekriech, das von einer zusammenhängenden Vegetationsdecke überkleidet wird.

Über die Grössenverhältnisse der Schlammströme sei mitgeteilt, dass bei einem der grössten die Breite 35 m betrug bei einer Mächtigkeit von ca. 2 m.

Weiter berichtet ANDERSSON über ein ähnliches Vorkommen auf der Südhalbkugel. Es sind das die berühmten stone rivers der Falklands-Inseln, die schon DARWIN erwähnt und später WYWILLE THOMSON[1]) näher beschreibt. Dies Phänomen ist besonders gut auf der östlichen Insel ausgebildet. Es werden hier die Täler von grauen Massen erfüllt, die eine Breite von mehreren hundert Metern bis zu mehreren Kilometern erreichen und aus einiger Entfernung betrachtet ein gletscherähnliches Aussehen besitzen. Sie kommen von Höhenrücken herab, empfangen unterwegs Zuflüsse, wobei sich ihr Volumen immer mehr vergrössert, und münden schliesslich ins Meer. Bei näherer Prüfung findet man, dass diese Massen aus gewaltigen Anhäufungen grosser Quarzitblöcke bestehen, die im allgemeinen unregelmässige Form besitzen. Doch ist das Vorherrschen einer parallelepipedischen Gestalt unverkennbar. Ihre Länge beträgt ½ bis 7 m, ihre Breite ist etwa halb so gross, und ihre Dicke entspricht der Mächtigkeit der weiter oberhalb anstehenden Quarzitbänke. Die Blöcke sind eckig, sie liegen unregelmässig übereinander.

Die Struktur dieser „Steinflüsse" ist nur dort erkennbar, wo fliessendes Wasser das feinere Material, das ursprünglich die Zwischenräume zwischen den grossen Blöcken ausfüllte, weggeführt hat. Wo das nicht der Fall ist, sind die Steinflüsse mit einer dichten Vegetationsdecke überzogen.

THOMSON gab für die Erscheinung folgende Erklärung: Der Untergrund besteht, besonders in den höheren Teilen, aus Quarzitbänken mit Zwischenlagen weicherer Schichten. Die letzteren sind der Verwitterung viel stärker unterworfen als die widerstandsfähigen Quarzite. Infolgedessen mussten die Quarzitbänke allmählich freigelegt werden und, ihres Haltes beraubt, in einzelne Blöcke zerbrechen. Wenn die Blöcke auf der Erde lagen, wurden sie schnell mit Vegetation überzogen, die Zwischenräume wurden im Laufe der Zeit mit feinerem Material ausgefüllt und es fand ein langsames Herabkriechen (creep down) der ganzen Schuttmasse infolge Durchtränkung mit Wasser und infolge Frostwirkung statt. Durch den Fluss wurde dann später von einigen Stellen das feinere Material zwischen den grossen Blöcken weggewaschen.

[1]) The Atlantic, p. 245.

ANDERSSON ist mit dieser Erklärungsweise einverstanden, bestreitet aber die Entstehung der Steinflüsse durch Solifluktion unter dem jetzigen Klima. Erscheinungen einer noch jetzt tätigen Solifluktion konnte ANDERSSON auch auf den Falklands-Inseln an günstigen Stellen beobachten, besonders in den höheren Teilen, wo die Gehänge relativ steil sind, wo die Vegetation spärlich ist und eine intensive Durchtränkung des Bodens stattfindet. Doch sind die dadurch entstehenden Schlammströme recht unbedeutend gegenüber den gigantischen Steinflüssen. Die grösste Breite eines solchen betrug 32 m, auf seiner Oberfläche lagen zahlreiche Blöcke mit einem Durchmesser bis zu 1,5 m. Diese Blöcke waren in Ton eingebettet, lagen nicht etwa auf anderen Felsbrocken.

Die Steinströme bilden, wie schon THOMSON und DARWIN hervorhoben, ein reguläres Flusssystem: ein Hauptstrom ist vorhanden, der mehr oder weniger zahlreiche Nebenflüsse empfängt und nach unten an Volumen zunimmt. Dort, wo nur die Anhäufungen grosser Blöcke zurückgeblieben sind, hört man das Murmeln eines unter dem Schutt hinfliessenden Wasserlaufes, der das feinere Material weggespült und so die grossen Blöcke frei gelegt hat. Wo das nicht geschehen ist, bilden die Steinflüsse kein auffallendes Bild, da sie von einer dichten Vegetationsbedeckung überkleidet werden. Gelegentliche natürliche Aufschlüsse zeigen aber auch hier eine Zusammensetzung, die genau analog der der Schlammströme ist: grosse eckige Blöcke in einer Grundmasse aus feinerem Material.

ANDERSSON verlegt die Entstehung der Steinflüsse in eine Zeit, als das Klima erheblich rauher war als heute, als im Winter bedeutend mehr Schnee fiel, während aber andererseits die Sommerwärme noch ausreichte, diesen Schnee völlig zu schmelzen, und dadurch eine starke Solifluktion zu verursachen, kurz, in eine Zeit, als das Klima der Falklands-Inseln dem heutigen der Bären-Insel ähnelte. Von selbst drängt sich da der Gedanke auf, diese Zeit der klimatischen Depression zusammenfallen zu lassen mit den Eiszeiten der Diluvialzeit.

Zu diesem Resultat führt auch noch eine andere Überlegung. In Tierra del Fuego und im Süden von Patagonien finden sich Moränen eines grossen Inlandeises, Süd Georgien I zeigt die Spuren einer vollständigen Vergletscherung und auch auf Graham-Land besass das Eis eine viel grössere Ausdehnung. Im Westen, Osten und Süden sind also die Falklands-Inseln von Ländern umgeben, die zur Diluvialzeit stark vergletschert waren, nur die Inseln selbst zeigen keine Anzeichen einer ehemaligen Eisbedeckung. Da es aber recht unwahrscheinlich ist, dass die Kältewelle über die Falklands-Inseln hinwegging, ohne irgendwelche Spuren zu hinterlassen, so nimmt ANDERSSON an, dass die grossen Steinflüsse eine „besondere Fazies der Eiszeit" sind. Die klimatische Depression war nicht stark genug, eine Vergletscherung hervorzurufen: sie bewirkte nur eine intensive

Verwitterung und „fliessende Hänge". Man könnte also danach die Steinflüsse als fossile Schlammströme bezeichnen oder im weitesten Sinne als fossiles Gekriech.

Wichtige Vorbedingung für die grossartige Ausbildung der Solifluktion war die Beschaffenheit des Untergrundes, der Wechsel harter, widerstandsfähiger Quarzitbänke mit Schichten weicheren Materials, wie auch auf der Bären-Insel die Solifluktion hauptsächlich gebunden ist an Stellen, wo der Ursa-Sandstein ansteht, ein Gestein, das auch harte Quarzitbänke in einem weicheren Zwischenmittel enthält.

Noch heute wirksame Solifluktion ist weit über die Erde verbreitet, aber es finden sich auch Beispiele einer fossilen Solifluktion, auf die schon GEIKIE [1]) hinweist. Als solche wären aufzufassen die „rubble drift" Südenglands, die beiden Kalkbreccien Gibraltars, die verschiedenen Horizonten angehören und daher zwei getrennte Epochen einer Klimaverschlechterung andeuten, und die Steinflüsse des Ural, die TSCHERNYSCHEW erwähnt im „Guide des excursions du VII. Congrès géologique international" Vol. III, pp. 28, 29, aus der Umgegend der Minen von Bakalsk.

Dass man aber nicht alle Gebilde, die äusserlich den Steinflüssen der Falklands-Inseln zu gleichen scheinen, durch Solifluktion erklären kann, zeigen die Arbeiten von CAPPS (3) und HOWE (4).

CAPPS beobachtete in dem Nizina Special Quadrangle in Alaska, 61° 20′ nördlicher Breite, Gebilde, die er „rock glaciers", „Steingletscher", nannte. Es sind das stromartige Schuttanhäufungen, die in breiten Tälern liegen. Die Täler gehen gewöhnlich oben in einen karartigen Felsenzirkus über. Das Material, das den Steingletscher zusammensetzt, ist eckiger Schutt, ähnlich dem gewöhnlichen Gehängeschutt; seiner Beschaffenheit nach ist es identisch mit dem der Zirkuswände, Porphyr, Kalk, Diorit oder Schiefer. Die Kare, in denen die Steingletscher entspringen, stammen aus der Eiszeit. Jetzt sind sie gewöhnlich im Sommer schneefrei, doch konnten einige Fälle beobachtet werden, wo die Steingletscher nach oben zu in wirkliche Gletscher ohne scharfe Grenze übergehen.

Die Grösse der Steingletscher variiert, doch sind sie gewöhnlich mehrere Male länger als breit. Die Breite beträgt 100 bis 500 m, die Länge 1 bis 5 km. Die oberflächliche Neigung beträgt 9° bis 18°. Der Durchmesser der Felsbrocken beträgt im allgemeinen 20 cm bei Porphyr, er ist grösser bei Diorit und Kalk, kleiner bei Schiefer. Doch kommen auch Blöcke vor, deren Durchmesser mehrere Fuss beträgt.

Die Steingletscher gleichen in ihrer Form auffällig wirklichen Gletschern. Sie entspringen wie diese in einem karartigen Felsenzirkus. Im Querschnitt sind sie in der Mitte am höchsten, scharf setzen sie gegen die seitlichen Gehänge ab. Die Oberfläche weist Längsstreifen auf, die bisweilen in konzentrische Querwälle über-

[1]) The Great Ice Age.

gehen. Am unteren Ende endigt der Steingletscher mit einer Böschung, die den für das betreffende Material maximalen Böschungswinkel aufweist. Die ganze Erscheinung macht den Eindruck einer langsamen Bewegung.

Da CAPPS vermutete, dass Eis irgendwie bei der Bildung und Bewegung dieser Steingletscher mitwirkte, liess er an einigen Stellen Nachgrabungen ausführen, und in der Tat wurde in einiger Tiefe Eis gefunden, allerdings kein eigentliches Gletschereis, sondern Eis, das die Zwischenräume zwischen den Steinbrocken ausfüllte.

Trotzdem besteht aber ein scharfer Unterschied zwischen den Steingletschern und eigentlichen Gletschern. Für die Bildung eines wirklichen Gletschers ist ein Firnfeld unbedingt erforderlich, das auch im Sommer nicht abschmilzt. Die meisten Steingletscher entspringen dagegen in Karen, die im Sommer vollkommen oder wenigstens praktisch vollkommen schneefrei werden. Ein wirklicher Gletscher hat immer das Bestreben, wie mächtig auch seine Schuttbedeckung sein mag, zu bersten, wenn er über eine Unebenheit des Untergrundes hinweggeht; ein Abschmelzen des Eises bewirkt eine beträchtliche Formveränderung. Beides trifft für den Steingletscher nicht zu, da die Schuttblöcke sich gegenseitig Halt gewähren und das Eis nur die Zwischenräume ausfüllt. Ausserdem können Steingletscher niemals zurückgehen wie eigentliche Gletscher.

CAPPS denkt sich die Steingletscher auf folgende Weise entstanden: Da das Gebiet, in dem die Steingletscher auftreten, sehr nahe der heutigen Schneegrenze liegt, wurden alle Täler, die heute von den Steingletschern eingenommen werden, während der letzten Eiszeit von Gletschern erfüllt. Darauf deutet auch das U-förmige Profil der Täler, die zahlreichen Hängetäler, die karartigen Felszirkusse usw. Als dann das Klima milder wurde, zogen sich viele kleine Gletscher zurück. Die Talgehänge, die durch Glazialerosion vielfach übersteil geworden waren, wurden schneefrei und sofort begann die in diesen hochgelegenen Gegenden äusserst intensive Verwitterung ihr Zerstörungswerk. Grosse Schuttmengen stürzten auf die noch im Tale vorhandenen Gletscher und wurden von diesen weiter transportiert. Dieses Schuttmaterial würde unter normalen Verhältnissen am Gletscherende als Endmoräne aufgetürmt worden sein. Dazu hatte aber der kleine Gletscher infolge der kolossalen Schuttmengen, die ihm immer von neuem von oben zugeführt wurden, nicht mehr die Kraft. Er schmolz ab, und die Schneewässer drangen in die Schuttanhäufungen ein und froren dort wieder in einer Tiefe, in der die Wärmewirkung von der Oberfläche her gleich Null war, zu Eis, das nun die Zwischenräume zwischen den einzelnen Felsblöcken ausfüllte. Die dabei auftretende Volumvermehrung mag dann den Anstoss zu einer langsamen Bewegung der ganzen eiszementierten Masse gegeben haben. Als schliesslich bei weiterer Verbesserung des Klimas die Gletscher ganz abschmolzen, blieben nur die Steingletscher zurück.

Eine Stütze erhält die Theorie durch die Tatsache, dass hier in Alaska Gletscher vorhanden sind, die nach unten zu ohne scharfe Grenze in Steingletscher übergehen.

Für die Annahme einer noch jetzt vorhandenen langsamen Bewegung der Steingletscher sprechen folgende Gründe:

1. Die bemerkenswerte Ähnlichkeit in Lage und Form mit Gletschern der unmittelbaren Umgebung.

2. Der innige Zusammenhang einiger Steingletscher mit wirklichen Gletschern.

3. Das Vorhandensein von Eis in den Zwischenräumen zwischen den Felsbrocken in geringer Tiefe unter der Oberfläche.

4. Die Längsstreifen auf der Oberfläche der Steingletscher können bisweilen bis in das Innere des karartigen Zirkus verfolgt werden, wo sie in noch heute tätige Schuttkegel übergehen. Jedoch findet sich am unteren Ende dieser Schuttkegel keine irgendwie bemerkenswerte Anhäufung von Schutt, wie es doch der Fall sein müsste, wenn der Schutt nicht weggeführt würde.

5. Viele Steingletscher endigen mit einer steilen (bis 30 m hohen) Böschung. Der Böschungswinkel beträgt 35°, und das ist der Maximalböschungswinkel für derartiges Material. An dieser Abbruchstelle ist das Material immer frisch, während weiter oberhalb die Oberfläche des Steingletschers mit Vegetation, gewöhnlich Flechten, bedeckt ist. In einem Falle hat ein Steingletscher einen Fluss ganz an die gegenüber liegende Talwand gedrängt. Zwischen Talwand und Steingletscherende ist gerade nur Platz für den Fluss. Trotz der stetig wirkenden Flusserosion ist der enge Kanal noch nicht erweitert worden. Und auch hier beträgt der Böschungswinkel der Abrissstelle 35°.

Ganz ähnliche Gebilde beschreibt Howe (4) unter dem Namen „rock streams", „Steinströme", aus den San Juan Mountains in Colorado. Diese Steinströme sind zungenförmige Schuttanhäufungen von einer Länge bis zu 1 km, einer Breite bis zu 600 m, und einer Mächtigkeit von 20 bis 40 m. Das Material, das die Steinströme zusammensetzt, besteht aus einem bunten Gemisch von feinerem und grobem eckigen Schutt. Die grössten Blöcke, die Howe beobachten konnte, hatten einen Durchmesser von 5 m. Die Steinströme sind scharf abgegrenzt gegen den Gehängeschutt. Sie entspringen bisweilen in einem karartigen Zirkus, manchmal unter vorspringenden Felsen. Das Material stammt immer von den Felswänden an der Ursprungsstelle des Steinstromes. Auf der Oberfläche des Steinstromes zeigen sich oft unregelmässige Höcker, manchmal Längsstreifen, die am unteren Ende in konzentrisch zum Rande verlaufende Querwälle übergehen. Die ganze Erscheinung macht den Eindruck, als ob jetzt noch eine langsame gletscherähnliche Bewegung stattfände, die aber nicht festgestellt werden konnte. Einzelne Steinströme könnte man

aus einiger Entfernung für Gletscher halten, die über und über mit Schutt bedeckt sind.

Sämtliche von Howe beobachteten Steinströme liegen über bezw. an der heutigen Baumgrenze, innerhalb des Gebietes, das zur Diluvialzeit vergletschert war.

Für die Entstehung der Steinströme kommen nach Howe verschiedene Möglichkeiten in Betracht, und danach kann man die Steinströme in verschiedene Gruppen einteilen. In die erste Gruppe gehören diejenigen, die in einem karartigen Zirkus entspringen; diese sind im übrigen genau so ausgebildet, wie Capps' Steingletscher in Alaska. Auch Howe nimmt an, dass bei der Bildung dieser Steinströme Gletscher der Diluvialzeit in erster Linie beteiligt waren. Er stellt sich den Vorgang so vor, dass gegen Ende der Eiszeit eine grössere Anzahl kleinerer Bergstürze von den Zirkuswänden herabkamen und sehr viel Schutt auf die Oberfläche des Gletschers beförderten. Dieser transportierte das Schuttmaterial weiter nach unten und lagerte es, als das Klima milder wurde und der Gletscher allmählich abschmolz, in der Form eines Steinstromes ab.

Die zweite Gruppe wird von Steinströmen gebildet, die auf der Nordseite steiler Felswände liegen. Sie sind dadurch charakterisiert, dass sie im Längsprofil in der Mitte eine Einsenkung besitzen, dass also ihr äusserer Rand einen nach zwei Seiten abfallenden Wall darstellt. Für diese Art von Steinströmen gibt Howe folgende Erklärung. Auf der Nordseite steiler Gehänge können sich infolge der starken Beschattung bis in den Sommer hinein ausgedehnte Schneefelder erhalten. Der Verwitterungsschutt, der während des Vorhandenseins eines solchen Schneefeldes von den Wänden abbröckelt, fällt auf die ziemlich steil geneigte Schneefläche, gleitet auf dieser herab und wird an ihrem unteren Ende abgelagert. Da die Grösse des Schneefeldes während eines grossen Teils des Jahres ziemlich konstant bleibt, werden sich an einer Stelle ziemlich erhebliche Mengen Schutt ansammeln. Wenn dann im Laufe des Sommers das Schneefeld allmählich abschmilzt, rückt auch die Ablagerungsstelle des Gehängeschuttes sukzessive näher an die Ausgangsstelle, die Felswand, heran. Da aber während des Abschmelzens das Schneefeld nie *längere* Zeit gleiche Ausdehnung besitzt, können sich auch nicht *grössere* Schuttmengen an einer Stelle anhäufen, und so entsteht das charakteristische Längsprofil dieser Art von Steinströmen: vorne eine wallartige Anhäufung von Gesteinsschutt, weiter rückwärts eine weniger grosse Mächtigkeit des Schutts. Einige kleine Schuttwälle, die innerhalb des vorderen grossen auftreten und konzentrisch zu ihm verlaufen, deuten auf Jahre, wo das Schneefeld eine geringere Ausdehnung besass.

Keine der angegebenen Erklärungsweisen ist für die dritte Gruppe von Steinströmen verwendbar. Diese entspringen nicht in Karen, liegen auch nicht, nach Norden exponiert, vor steilen Felswänden,

sondern finden sich vielfach unter vorspringenden Felsklippen. Sie können nur durch Bergstürze entstanden sein, wenngleich die ganze Anlage, die eigentümliche Form der Schuttablagerung und die in vielen Fällen recht geringe Neigung des Untergrundes gegen diese Entstehungsart zu sprechen scheinen. Bergstürze (landslides) finden sich auch sonst in den San Juan Mountains ziemlich häufig. HOWE gibt in dem ersten Teil seines Werkes eine anschauliche Schilderung davon und untersucht namentlich die Ursachen, die den Bergsturz auslösten, genauer. Die meisten Bergstürze finden sich in dem Gebiet der diluvialen Vergletscherung, was wohl dadurch zu erklären ist, dass die Gletscher vielfach übersteile Gehänge schafften. Doch mussten für die eigentliche Auslösung des Bergsturzes noch andere Bedingungen hinzutreten, denn in hinreichend widerstandsfähigem Gestein ist das übersteile glaziale Relief noch heute erhalten. Begünstigt wird das Eintreten eines Bergsturzes dadurch, dass weiche oder stark zersetzte Schichten (bröckelige Schiefer und Tuffe) überlagert werden von harten Gesteinen (Quarziten, Kalken, Andesiten usw.). Daneben spielt auch die Zerklüftung eine gewisse Rolle. Nach HOWE's Ansicht ging aber der Bergsturz erst dann nieder, wenn der Untergrund infolge ausgiebiger Niederschläge stark durchweicht worden war. Das gilt auch für jene Bergstürze, die durch den tektonischen Aufbau bedingt sind und besser als Bergrutsche bezeichnet werden, wenn weiche Schichten, die von harten überlagert werden, in Richtung des Abhanges einfallen. Das klassische Beispiel hierfür ist der bekannte Bergrutsch von Goldau, wo harte Nagelfluhbänke auf den Schichtflächen weicher Flyschmergel abrutschten.

Das Profil aller dieser Bergstürze und -rutsche ist, wie auch GÖTZINGER hervorhebt, im oberen Teile konkav, im untern konvex. Die Schuttmassen sind im allgemeinen über weite Strecken regellos verstreut. Der Neigungswinkel des Untergrundes ist ziemlich gross.

Nun ereigneten sich aber gerade in den letzten Jahrzehnten zwei Bergstürze, die dadurch besonders bemerkenswert sind, dass ihre Ablagerungen eine ganz bestimmte Form annahmen, nämlich die eines Steinstromes. Es sind dies der Bergsturz von Elm und der von Frank, einem durch seine Kohlenbergwerke bekannten Städtchen an einer Zweigstrecke der kanadischen Pazifikbahn.

Der Bergsturz von Elm, der von HEIM[1]) eingehend beschrieben wurde, ereignete sich im Jahre 1881. Durch unvorsichtigen Abbau eines Schieferbruches wurde eine grössere Felspartie unterhöhlt, die dann 1881 herunter brach, nachdem schon längere Zeit vorher der Bergsturz durch mehrere, z. T. recht beträchtliche Spalten sich angekündigt hatte. Bei dem eigentlichen Hauptsturz unterscheidet HEIM drei Phasen. In der ersten Phase riss die Felsmasse ab und stürzte auf das bei dem Schieferbruch gelegene Plateau; diese Phase

[1]) Der Bergsturz von Elm und (5).

kann man mit dem Herabströmen eines Sturzbaches vergleichen. Von diesem Plateau flogen oder spritzten die Felsmassen horizontal frei durch die Luft in einem Bogen in das Tal hinunter, ähnlich einem Wasserfall; die Tropfen des Wasserfalles werden hier durch die Felstrümmer repräsentiert. In der letzten Phase glitten die Schuttmassen infolge der grossen kinetischen Energie, die sie noch besassen, auf dem wenig geneigten Untergrund (das Gefälle betrug 3 bis 3 1/2 %) vor und bildeten einen Schuttstrom von ca. 1 1/2 km Länge und 4 bis 500 m Breite.

Wesentlich für das Zustandekommen des Steinstromes war die grosse Geschwindigkeit der herabfallenden Trümmer und die Grösse der ganzen Masse im Vergleich zu den einzelnen Trümmern. Je grösser diese beiden Faktoren sind, desto mehr nähert sich die Bewegung einer Trümmermasse der einer Flüssigkeit. Die kinetische Energie muss so gross sein, dass dagegen die innere Reibung und die Reibung gegen den Untergrund verschwindend klein werden. Sobald die Reibungskräfte ein merkliches Übergewicht bekommen, hört die Bewegung des Schuttstromes plötzlich auf. Da aber an und für sich die innere Reibung in einer Schuttmasse erheblich grösser ist als in einer Flüssigkeit, müssen die Böschungen, die die Schuttmassen zum Fliessen veranlassen sollen, schon recht bedeutend sein.

Der Schuttstrom von Elm „liegt im Tale, wie ein grosser, ganz mit Moränenschutt bedeckter Gletscher". Er ist in der Mittelzone höher aufgewölbt als an den Seiten. Das Material, das ihn zusammensetzt, besteht aus Felsblöcken aller Dimensionen herab bis zu feinem Sand. Auf der Oberfläche zeigen sich Längsstreifen, die am Ende in konzentrisch zum Rande verlaufende Wälle übergehen. Kurz, es finden sich fast alle Merkmale der Steingletscher von Alaska und der Steinströme der San Juan Mountains wieder, wie denn auch Heim ausdrücklich hervorhebt, dass man nach der äusseren Gestalt des Schuttstromes glauben könnte, er sei durch eine sehr langsame Bewegung zustande gekommen.

Der Bergsturz von Frank ereignete sich im Jahre 1903 und wurde von Mc. Connel und Brock[1]) beschrieben. Er ging aus vom Turtle Mountain, wo kretazische Sandsteine und Schiefer von z. T. devonischen Kalken überlagert wurden. Auch hier brach eine grosse Felsmasse ziemlich hoch über dem Talboden ab, stürzte herunter, glitt über das Tal hinweg und bildete einen Schuttstrom, der ganz dem von Elm gleicht.

Entsprechend diesen beiden Beispielen führt Howe die dritte Gruppe seiner Steinströme auf Bergstürze zurück, bei denen ähnliche Bedingungen, wie bei den Bergstürzen von Elm und Frank, einer grossen Trümmermasse eine bedeutende kinetische Energie verliehen.

---

[1]) Report of the great landslide at Frank, Alta., 1903. Ann. Rept. Dept. Interior, Canada 1903.

Dass sich aber nicht alle Steingletscher oder Steinströme durch diese Hypothese erklären lassen, zeigen CAPPS' Beobachtungen in Alaska. Es kommt hier nämlich an einigen Stellen vor, dass sich zwei Steingletscher, die in nahe beieinander gelegenen Karen entspringen, sich weiter unterhalb zu einem Steingletscher vereinigen. An der Vereinigungsstelle sieht man, dass die beiden Steingletscher gleichzeitig und zwar langsam angekommen sein müssen. Nie konnte CAPPS beobachten, dass der eine Steingletscher mit grosser Geschwindigkeit über den anderen hergestürzt war. Die Langsamkeit der Bewegung wird auch noch durch ein anderes Beispiel gut illustriert. In einem Nebental des Mc Carthy Creek, einem Hängetal, liegt ein Steingletscher, der alle charakteristischen Merkmale der Steingletscher aufweist. An der Mündung des Hängetals bricht er ab und findet seine Fortsetzung in dem Haupttal in einem gut ausgebildeten Schuttkegel. Das deutet auf einen langsamen Transport des Materials, das den Schuttkegel aufbaut, denn andernfalls wäre eine so vollkommene Schuttkegelbildung unmöglich gewesen. Übrigens macht auch gerade dieses Beispiel die Annahme wahrscheinlich, dass die langsame Bewegung der Steingletscher heute noch fortdauert, denn Erlenbüsche, die auf dem Schuttkegel wachsen, sind halb verschüttet, ein Zeichen, dass auch heute noch dem Schuttkegel fortwährend neues Material zugeführt wird.

Die Schuttanhäufungen, die, wie im vorhergehenden gezeigt wurde, durch ganz verschiedene Ursachen entstanden sein können, zeigen in vielen Punkten überraschende Ähnlichkeit. Infolgedessen ist es leicht erklärlich, dass derartige Schuttmassen bisweilen falsch gedeutet wurden, und besonders das Gekriech hat nach GÖTZINGER an vielen Stellen Anlass gegeben zur Aufstellung einer Glazialhypothese, da man das Gekriech für Moränenpackung hielt. Wenn es auch nun Übergänge zwischen diesen beiden, ganz verschiedenen Arten von Ablagerungen geben mag, so wird doch im allgemeinen eine Trennung möglich sein, wenn man ausser dem geologischen Moment noch das geographische berücksichtigt, d. h. insbesondere die orographischen und morphologischen Verhältnisse. Daneben dürfen bei der Glazialforschung auch die klimatologischen Verhältnisse nie unbeachtet gelassen werden.

Andererseits darf man aber auch das Gekriech nicht überschätzen. Wenn man z. B. ANDERSSON's Schilderungen der Steinflüsse auf den Falklands-Inseln liest, so scheint eine Entstehung dieser nur durch Kriechwirkung nicht ganz verständlich. Denn damit die von den Bergen herabkommenden Schuttmassen sich in so regelmässiger Stromform auf ganz sanft geneigtem Untergrund anordneten (die „stone rivers" bilden, wie hervorgehoben, reguläre Flusssysteme mit einem Hauptfluss und mehreren Nebenflüssen), musste die ganze Schlammmasse schon recht dünnflüssig sein. Dann wird aber der Transport der grossen Blöcke von 7 m Durchmesser unwahrscheinlich, denn

diese Blöcke mussten in dem Schlammbrei einfach zu Boden sinken. Hier hätten sie durch rollende Bewegung weiter transportiert werden können, aber die Blöcke der Steinflüsse sind eckig, zeigen keine Spur einer Abrollung. Vielleicht war doch Gletschereis bei der Bildung der Steinflüsse irgendwie beteiligt, wie bei den „rock glaciers" in Alaska und den „rock streams" in Colorado, in der Weise etwa, dass sich das Gekriech auf der Oberfläche des Gletschers ansammelte, forttransportiert und beim Abschmelzen als stone river abgelagert wurde. Allerdings könnte diese Annahme einer Vergletscherung bis jetzt nur gestützt werden durch die zentrale Lage der Falklands-Inseln inmitten anderer Gebiete, die zur Diluvialzeit stark vergletschert waren.