

Vierteljahrsschrift
der
Naturforschenden Gesellschaft
in ZÜRICH.

Unter Mitwirkung der Herren
Prof. Dr. A. HEIM und Prof. Dr. A. LANG
herausgegeben von
Dr. FERDINAND RUDIO,
Professor am Eidgenössischen Polytechnikum.

Sonderabdruck aus Jahrgang 53, 1908.

Geologische Nachlese.

Von

Albert Heim.

Nr. 19

Nochmals über Tunnelbau und Gebirgsdruck und über die Gesteins-
umformung bei der Gebirgsbildung.



Geologische Nachlese.

Von
ALBERT HEIM.

Nr. 19.

Nochmals über Tunnelbau und Gebirgsdruck und über die Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung.

Bei Gelegenheit seiner publizierten Expertise „über die Standfestigkeit der Gesteine im Simplontunnel“, Gutachten, abgegeben an die Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Bern, bei Böhler & Co. 1907, tritt Prof. Dr. C. Schmidt (Basel) ziemlich eingehend auf eine Kritik meiner Arbeit „Tunnelbau und Gebirgsdruck“ (Nachlese Nr. 14, Vierteljahrsschrift der naturf. Ges. in Zürich 1905) und sodann allgemein auf die Frage der Plastizität der Gesteine durch Druck und meine Auffassung über dieselbe ein. Bei dieser Gelegenheit stellt er eine Menge von sehr wertvollen Beobachtungen von andern wie von sich selbst zusammen, die meine Darlegungen, mehr als ich es schon nach so kurzer Zeit erwarten konnte, bestätigen. Allein Schmidt sieht überall Widersprüche gegen meine Ansicht und sucht eine andere Deutung, ohne eine solche zu finden. Ich gebe zu, dass gewisse Erscheinungen verschieden interpretiert werden können und ich anerkenne vollauf die Berechtigung seines kritischen Versuches, sowohl als auch die Loyalität desselben. Freund Schmidt wird mir aber auch gestatten, die von ihm mir entgegengestellten Aussprüche zu prüfen und meine Anschauung zu verteidigen. Dies ist der Zweck der hier vorliegenden Nachlese Nr. 19. Vielleicht wäre ich ohne die Kritik von Schmidt nie mehr auf eine Verteidigung meiner Auffassung eingetreten, ich bin dafür dankbar, dass ich hierzu nun doch veranlasst worden bin.

1. Betreffend die „Bergschläge“.

Der Abschnitt von Schmidt „Bergschläge in Tunnel und Bergwerken“ bringt uns zunächst eine sehr willkommene Zusammenstellung einer Menge sonst zerstreuter Beobachtungen über die „Bergschläge“ oder das „knallende Gebirge“ oder wie wir es bisher ge-

nannt hatten, das „Abtrennen“. Es gehen daraus, in Übereinstimmung mit noch andern von Schmidt nicht erwähnten Fällen, wie zu erwarten war, folgende Tatsachen hervor:

Das plötzliche Abtrennen und Abwerfen von Gesteinsschalen von den Tunnelwänden unter Knall und Erschütterung kann bei ganz verschiedenen Gesteinsarten vorkommen. Es ist beobachtet bei Granit, Aplit, Porphy, Granitgneiss, Gneiss, Diabas, Sandstein, Quarzit, Kalkstein, Dolomit, Kohlen etc., aber immer unter der Bedingung, dass diese Gesteine vorher möglichst homogen, kompakt, fest und nicht klüftig waren. Die Schalen trennen sich parallel den Stollenwänden ab, oft nicht schon kurze Zeit nach Sprengungen, sondern oft erst nach Wochen und Monaten, oft im Laufe der Zeit zunehmend, und besonders zunehmend mit der Grösse des künstlichen Hohlraumes. Sie erscheinen am häufigsten und meistens zuerst an den Seitenwänden, dann aber auch an der Decke und in der Sohle (Wocheinertunnel, Tunnel der Cincinnati Southern Railroad, Wättinger, Pfaffensprungtunnel, Przibramer Bergwerke). In der Sohle unter Beschotterung und Schienen können sie sich nicht so auffällig äussern. Allein eine ganze Anzahl von Fällen sind konstatiert, wo Hand in Hand mit den Bergschlägen die Sohlenlockerung tief hinabreicht, so dass die Stollenwasser darin versiegen. Ferner wird stets dann, wenn unter sonst gleichen Gesteinsverhältnissen (Beschaffenheit und Lagerung des Gesteins) in verschiedenen Tiefen unter der Oberfläche abgebaut wird, festgestellt, dass die knallenden Abtrennungen des Gesteines erst in einer gewissen Tiefe beginnen und dann mit der Tiefe, d. h. mit der Überlastung stark zunehmen.

In letzterer Hinsicht konstatiert Schmidt (S. 51) selbst, dass im Antigoriogneiss des Simplontunnel sich die Bergschläge auf einer 2 $\frac{1}{2}$ km langen Tunnelstrecke eingestellt haben, „und zwar in immer grösserer Intensität mit der zunehmenden Ueberlastung unter dem Passo Poselté, 1500 m unter der Oberfläche erreichen sie ihr Maximum“; ferner, dass steil stehender Gneiss mit 700 m Überlastung noch keine, aber entsprechendes Gestein bei 1200 m Überlastung sehr kräftige „Bergschläge“ ergibt.

Aus den von Schmidt zusammengestellten Fällen ist ferner ersichtlich, dass bei kompaktem festem Gestein und genügender Überlastung die „Bergschläge“ eintreten, wie immer das Gestein gelagert sei. Sie sind von verschiedenen Orten aus flacher Schichtung bekannt, z. B. im Antigoriogneiss des Simplontunnels, an anderen treten sie ganz ebenso bei schiefer bis senkrechter Schieferung, Plattung oder Schichtung auf, wie z. B. im Protogin der Schöllenen im Gotthardtunnel, im Gneissgranit des Wättingertunnels, des Leggistein-

tunnels und des Pfaffensprungtunnels bei Wasen, im Gneiss bei Km. 6 ab NP Simplontunnel etc.

Von besonderer Bedeutung ist die vielfach und auch von mir persönlich konstatierte Tatsache, dass, wenn man versucht, eine durch „Bergschlag“ abgesprungene Gesteinsschale wieder an ihren Ort zurückzusetzen, sich dies als unmöglich erweist, indem die Platte in ihrer Flächenentwicklung gewachsen ist und auch in ihrer Krümmung sich oft etwas verändert hat. Das Gestein war eben zusammengedrückt und hat sich, nun aus dem Verbanne befreit, wieder erholt. Gleichzeitig lernen wir hieraus, dass die Flächen der maximalen Kompression, das sind die Flächen, in welche die Maximaldrucklinien fallen, lokal so verlaufen, wie die Flächen der Trennungsschalen, wie ich es längst dargelegt habe. Endlich wird auch konstatiert, dass die Ablösungen parallel den Stollenwänden unabhängig von der Richtung der Flaserung oder Schieferung gehen. In der Tat habe ich selbst aus dem Simplontunnel und aus dem Gotthardtunnel dünne Knallplatten gebracht, die senkrecht und solche, die unter verschiedenen Winkeln schief zur Glimmerlage gehen.

Aus alledem, was nun über die „Bergschläge“ zusammengestellt vorliegt, geht die vollständige Analogie dieser Abtrennungen in Stollenwänden und an Bergwerks Pfeilern mit denjenigen hervor, die man am Rande eines zu zerquetschenden Gesteinswürfels in der Festigkeitsmaschine erhalten kann.

Die Erscheinungen der Bergschläge waren für mich stets eine selbstverständliche Folge der Verteilung des Gebirgsdruckes, und Schmidts Zusammenstellung der Beobachtungen darüber bestätigt alles Erwartete vollauf: Es ist selbstverständlich, dass in nicht allzugrossen Tiefen die Abschälungen zuerst vorherrschend an den Seitenwänden stattfinden, und erst im Laufe längerer Zeit sich auch an Decke und Sohle einstellen. Es ist selbstverständlich, dass sie in grösserer Tiefe, bald auch an Decke und Sohle, kurz, ringsum an den entblössten Flächen auftreten. Es ist selbstverständlich, dass sie mehr oder weniger genau der Stollenwandfläche parallel sich trennen, denn das ist ja die Fläche, auf welcher der Gegendruck jetzt plötzlich weggenommen ist; nach dem Hohlraum hin entsteht Zug, senkrecht auf dem Zug liegt der maximale Druck, und alle Zerquetschungsklüfte laufen mit den Maximaldruckflächen, die neuen Bruchrisse zeichnen das System der Maximaldrucklinien, die hier den Gewölbedrucklinien sich annähern. Da ein schärfer gekrümmtes Gewölbe stärkeren Widerstand gegen Zerdrücken leistet, als eines mit grösserem Krümmungsradius, und da die Abschälungen nach der Ausbildung natürlicher allseitig geschlossener Gewölbeflächen tendieren, so ist es

auch selbstverständlich, dass sie mit der Weite der Aushöhlung zunehmen.

Endlich ist die nun wiederum allseitig konstatierte Tatsache höchst selbstverständlich, dass das ganze Phänomen des Abspringens in klüftigem oder weichem Gestein nicht auftreten kann, weil sich da alle Druckausgleichungen viel eher in Bewegungen auf den schon vorhandenen unfesten Flächen auslösen, sei es, dass früher geschlossene Risse sich öffnen, sei es, dass auf denselben sich Gleitbewegungen einstellen. Da fällt eben das Gestein nach den vorhandenen oder vorgezeichneten Trennungen auseinander, im allgemeinen ohne neu brechen zu müssen. Die Richtungen des maximalen Druckes oder Zuges in den im Gleichgewicht gestörten Gesteinsmassen zerlegen sich in Komponenten auf die sie kreuzenden schon vorhandenen Ablösungen, und Sprengungen, welche sich explosiv auslösen müssten, können deshalb nicht entstehen.

Im letzteren Falle wird die Bewegung des Gebirges nach dem geschaffenen Stollen hin gewöhnlich rascher bemerkbar, das Gebirge wird „druckhaft“ noch vor der Tunnelleinwölbung. Ist das Gestein so fest, dass es nicht ohne „Bergschlag“, d. h. neues Zerreißen, weichen kann, so kommt die Erscheinung nicht sofort in der Form der „Druckhaftigkeit“ zur Geltung. Allein die Sache ist doch die gleiche und wird im Laufe der Zeit immer ähnlicher. Die Differenz beruht nicht in der Art und Verteilung des Gebirgsdruckes und nicht in der Ursache, auch nicht in der Tendenz des Gebirges, den Stollen wieder zu schliessen, sondern einzig und allein in der Art, wie das Gestein je nach seiner physikalischen Beschaffenheit auf die Befehle des Gebirgsdruckes gehorcht — im einen Fall schneller und schiebend, oder gleitend, in den Tunnel hinein auseinanderfallend, im andern Fall langsamer und in Platten brechend und sich abschälend. Aber schliesslich im Endresultat gleich: der Stollen, sich selbst überlassen, füllt sich mit Trümmern, schliesst sich, die Lockerung verteilt sich ringsum im Gebirge.

Schmidt legt nun ein Hauptgewicht auf diese Differenz im Verhalten der Gesteine und sucht für beide Fälle verschiedene Ursachen. Mir scheint die Differenz die unwesentliche Folge verschiedener Gebirgscohäsion zu sein, auf der gleichen Ursache zu beruhen und zum gleichen Ende zu führen. Mittelformen sind häufig.

In Beziehung auf mangelnde Standfestigkeit der Gesteine im Simplontunnel unterscheidet Schmidt (S. 49) 4 Fälle. Die beiden ersten, „Glockenbildung“ in einfach brüchigem Gebirge auch bei geringer Überlagerung, und Aufquellen anhydritführender Gesteine beschäftigen uns hier nicht weiter. Dagegen die Fälle Nr. 3 und 4.

Als Nr. 3 wird bezeichnet das Gebirge, das „Bergschläge“ liefert. Es hält dasselbe auf 5,5 km Länge im Simplonstollen II an! Als Nr. 4: „Einbrechen, resp. Zusammengehen von First und Ulmen verbunden mit Sohlenauftrieb auf 4,5 km Gesamtlänge. (Treibendes Gebirge. P.)“ Das sind die beiden Typen des im ganzen auf 10 km, das ist die Hälfte der Tunnellänge, beginnenden Stollenschlusses, je nach dem das Gestein entweder ganz und kompakt oder brüchig, unganzz oder unfest, mehr oder weniger plastisch ist.

Schmidt leitet seine Besprechungen mit der Bemerkung ein, dass trotz der Einheitlichkeit der Erscheinung die „Bergschläge“ „noch nicht völlig aufgeklärt“ seien. Mir schiene es unbegreiflich, wenn sie nicht genau so eintreten würden. Sie sind einfach die Folge der allseitig fortgepflanzten, die Gesteinsfestigkeit überwindenden Überlastung, die sich nun im Abschälen annähernd parallel den Stollenwänden, d. h. nach der Richtung des plötzlichen Aufhebens des Gegendruckes hin, geltend macht. Seite 50 unter der Hälfte gibt Schmidt selbst klar und richtig die Erklärung ganz in Übereinstimmung mit meinen Darstellungen und ohne Rückhalt wieder. Dann aber folgt gleich darauf die Behauptung, dass die „primäre Konsistenz und die Art der Lagerung der Gesteine in weit höherem Masse als die Grösse der Gebirgsüberlastung bestimmend seien für das mechanische Verhalten der Stollenwände in grossen Erdtiefen“. Gewiss gilt dies für das momentane Verhalten der Gesteine, allein schliesslich, die Dinge einmal erkannt, ist es für das Endresultat und für das Verfahren beim Tunnelausbau nebensächlich, ob das Gestein brechend oder schiebend nachgibt. Man kann doch nicht mit Schmidt eine untergeordnete Form der Erscheinung höher stellen als die einheitliche Ursache und das einheitliche Resultat, das schliesslich alles besiegt. Die Haupt-Tatsache, dass auch die „Gebirgsschläge“ wie die „Druckhaftigkeit“ mit der Überlagerung zunehmen, konstatiert Schmidt immer aufs neue wieder (Seite 46, 51, 56 unten etc.). Allein dieses sein eigenes Resultat, kaum gewonnen, bestreitet er an anderer Stelle sofort wieder (S. 54 unten). Dies Spiel wiederholt sich noch öfter. Er widerspricht häufiger sich selbst, als mir.

Hie und da hörte man besonders von Unternehmern die Behauptung, die Steinschläge wären durch die Dynamitsprengungen veranlasst. Allein alle Gesteinszerteilungen, welche durch Explosionsdruck entstehen, müssen von der Ladung aus radial ins Gestein gehen und pyramidale Trennstücke geben. Man sieht diese Radialzertrennung rings um die abgeschossenen Bohrlöcher sehr gut. Niemals kann eine Teilung in dünne Platten parallel den Stollenwänden aus den Dynamitschüssen hervorgehen, das ist gerade das

Umgekehrte. Auch wenn Pulver oder ein anderes Sprengmittel angewendet wird, entstehen Steinschläge. Auch Schmidt ist der Ansicht, dass die Gebirgsschläge nicht direkte Folge der Dynamitsprengungen seien.

Um nun meiner Theorie des allgemeinen und mit der Tiefe mehr und mehr hydrostatisch sich verteilenden Druckes durch die Überlagerung ausweichen zu können, wirft Schmidt die interessante Frage auf, ob vielleicht noch Reste von Gebirgsspannungen aus der Zeit der Gebirgsfaltung als Ursache der Steinschläge vorhanden sein könnten. Er beantwortet die Frage aber nicht. Ich glaube sie muss mit nein beantwortet werden. Solche Gebirgsspannungen müssten sich in ganz anderer Art äussern, vor allem hätten diese keinen Grund, ihre allfälligen Abschälungen parallel den Stollenwandungen zu legen, dagegen könnte dadurch etwa ein Abscheeren in irgend einer Richtung entstehen. Etwas derartiges hat sich im Simplontunnel nicht eingestellt. Sodann kann ich mir nicht denken, dass aus der Zeit des Zusammenschubes zum Gebirge noch Spannungen geblieben wären, weil seither tausende von Metern der Überlastung abgetragen worden, hunderttausende von Jahren verstrichen sind, und auch, weil das vom Tunnel durchfahrene Gebirge beiderseits oder in weiterem Umfang ringsum durch Täler umschnitten und dadurch vom Horizontaldruck benachbarter Gebirgsmassen isoliert ist. Die Gebirgsbildungskräfte sind in diesen oberen Teilen des Gebirges über dem Thalniveau längst ausgeglichen — so wenigstens muss ich es für wahrscheinlich halten.

S. 58 oben sagt Schmidt in Beziehung auf die Gebirgsschläge: „eine Bewegung der dahinter befindlichen Massen wird ausdrücklich in Abrede gestellt“. Durch wen? Durch Schmidt? Aber wer hat gemessen? Niemand! Es wäre schwierig zu messen. Ich bin aber überzeugt, dass wenn man die Distanz von zwei einander gegenüberliegenden Punkten der Tunnelwände, z. B. im Antigoriogneisse, vor dem Abgehen der Bergschläge auf einen Bruchteil eines Millimeters genau gemessen hätte und dann nach dem Bergschlag nachmessen würde unter Abzug der Dicke der abgesprungenen Platte, dass man ein Zusammengehen der Tunnelwände konstatieren könnte. Hinter den Bergschlägen rückt langsam das Gebirge nach, vielleicht 1 Centimeter in der Woche, beim Anklopfen tönt es hohl, und es stösst neue Platten ab. In einigen Tunnels ohne Sohlengewölbe sind die Widerlager nicht nur millimeterweise, sondern um mehrere Centimeter zusammengegangen und hat sich der Boden um mehr als ein Dezimeter gehoben. Dass die Bewegungen zum Stollenschluss in der Rückwand des schlagenden Gebirges langsamer als in derjenigen des

brüchig-treibenden sind, versteht sich von selbst, weil hier die Gesteinsfestigkeit, dort nur die Gebirgsfestigkeit von den Bewegungen zu überwinden ist. Aber das „schlagende“ Gebirge wird nach längerer Zeit doch so gut „druckhaft“, wie das „treibende“!

S. 58 oben bei Schmidt lesen wir: „Schlagen einerseits, Drücken andererseits des Gesteines am Hohlraum schliessen sich aus; niemals wird in schlagendem Gestein kontinuierlicher Sohlenauftrieb beobachtet, auch das hangende bleibt durchweg unversehrt.“

Dieser Satz spricht nach meiner Erfahrung zwar eine ungefähr richtige Regel aus, wenn wir ihn auf grössere Häufigkeit und auf den Beginn der verschiedenen Erscheinungen beziehen. In dieser Form ausgesprochen ist er aber entschieden unrichtig. Tatsächlich kommen Bergschläge an der Decke wie in der Sohle vor. Schmidt erwähnt selbst nach Lusser die Sohlenschläge im Wocheinertunnel. Ich habe sie im Antigoriogneiss des Simplontunnels auch an der Decke und im Gotthardtunnel im Fundament des Widerlagers gesehen. Im Pfaffensprungtunnel erschienen die Abbrennungen im äusseren oberen Winkel zwischen Wand und Decke und diagonal gegenüber in der Sohle schon während dem Bau. Das zerquetschte Gestein rieselte oben heraus. Im Leggisteinkehrtunnel stellten sich Steinschläge in dünnen Schalen an der Decke mehrere Jahre nach der Betriebseröffnung ein; oft dauerte es ein bis zwei Monate, bis die gleiche Stelle wieder knallende Ablösung ergab. Im Wattingertunnel kamen heftige knallende Steinschläge in der Sohle aufspringend vor. Im Tauerntunnel an Wand, Decke und Sohle. Schmidt selbst bildet den Steinschlägen ganz entsprechende Abtrennungen von vielen Stellen aus dem Simplontunnel in der Decke ab (seine Figuren 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12 im Winkel gegen die Decke, 13, 14). Diese Abtrennungen sind zum grossen Teil nur deshalb, solange der Stollen mit Arbeitern befahren war, nicht mit Knall abgesprungen und deshalb auch nicht als Steinschläge notiert worden, weil beständiges künstliches „Abputzen“ der Decke den Gebirgsschlägen zuvorgekommen ist, und in der Sohle sind weniger heftige „Bergschläge“ unter dem aufliegenden Steinschutt nicht bemerkbar geworden. Dazu kommt, dass überall die Steinschläge an den Stollenwänden und in Bergwerken an den Pfeilern früher auftreten, als an Decke und Sohle, weil an den senkrechten Wänden die lokale Überpressung viel schneller sich geltend macht, als an Decke oder Sohle, wohin der Druck sich erst übertragen und umsetzen muss. Wir stehen hier wiederum vor dem naheliegenden Fehler, dass die am schnellsten auftretende Erscheinung notiert, das mehr und mehr Nachfolgende übersehen wird. Sodann haben wir es im Antigoriogneiss des Simplontunnels meist mit flacher Schicht-

lage zu tun. Das Stollenprofil ist oben nicht rund, sondern es ist scharf viereckig. Während an den quer gebrochenen gepressten Wänden die Bergschläge weitergehen, kann die Decke als Schichtfläche erst etwas einbiegen, bevor der Druck sich dort horizontal geltend macht. Da bedingt die Schichtlage das vorläufige Ausbleiben von Steinschlägen an Decke und Sohle, wo dafür eher Einbiegungsrisse auftreten. Aber gerade der Umstand, dass die Steinschläge besonders am Anfang an den Wänden vertikale Platten und Schalen ablösen und da viel häufiger sind, als an Decke und Sohle, zeigt, dass sie einfach die Folge der Vertikallast sind, die sich nun endlich in seitlichen Abtrennungen geltend machen kann, weil der Gegenhalt weggenommen ist. Die ersten Abtrennungsebenen müssen Flächen der raschen Ausbreitung des maximalen Druckes sein und diese stehen eben den Wänden parallel. Wie kann man da noch nach anderen Ursachen suchen? Die Meinung, dass „Schlagen“ und „Drücken“ sich ausschliessen sollen, beruht auf dem Mangel an messender Beobachtung und an Dauer der Beobachtung. Wir dürfen nur sagen: Im schlagenden Gebirge haben wir es meistens mit so hoher Gesteins- und Gebirgsfestigkeit zu tun, dass die Druckhaftigkeit nur sehr langsam zur Geltung kommt, so dass man mit dem vollendeten nun widerstehenden Einbau fertig ist, bevor das Zusammengehen des Stollens ohne Messungen bemerkbar wird.

2. Weitere Erscheinungen des Gebirgsdruckes im Tunnel.

Schmidt nimmt den von mir zur Unterscheidung von der Gesteinsfestigkeit (geprüft in der Festigkeitsmaschine) aufgestellten Begriff der Gebirgsfestigkeit an und bestimmt, nach meinem Dafürhalten nicht einwandfrei, aus der Überlagerungshöhe, bei welcher der Antigoritgneiss Bergschläge ergibt, dass dessen Gebirgsfestigkeit, ganz meiner früheren Schätzung entsprechend, kein Viertel der Gesteinsfestigkeit sei. Im gleichen Satze aber meint Schmidt, „die rückwirkende Festigkeit der Gebirgsmasse ist durchaus nicht immer geringer, als die rückwirkende Festigkeit des Gesteines“. Er hält sie für unter Umständen grösser. Das ist unmöglich! Das Ganze kann nicht fester sein als seine Teile. Die Gebirgsfestigkeit kann nur kleiner sein als die Gesteinsfestigkeit, denn sie wird von letzterer nur durch die Klüftung und Unganzheit der grossen Gesteinsmassen verschieden. Schmidt will seine Aussage durch eine Beobachtung beweisen: „Bei den steilstehenden Kalkphylliten im Simplon unter Rosswald, bei 1000 m Überlastung ist die Gebirgsfestigkeit entschieden grösser als man es nach der Beschaffenheit des Gesteins

an der Oberfläche erwarten würde.“ „Im Weissensteintunnel haben sich bei 500 m Gebirgsüberlastung die Schiefertone der Opalinuschichten in prachtvollster Weise standfest erwiesen. Bei 500 m Überlastung und 2,5 spezifischem Gewicht der Mergel erhalten wir für die Gebirgsfestigkeit mindestens 125 kg, während die Gesteinsfestigkeit nicht 20 kg beträgt. Ähnliches Verhalten begegnen wir im Rickentunnel“

Diese Argumentation ist falsch, weil dabei das Verhalten des Gesteines vom Momente des Ausbruches bis zum Einsetzen des Gewölbes — länger als diese paar Wochen, höchstens Monate, konnte er es nicht beobachten — für endgültig massgebend gehalten wird. Ich habe dagegen stets auf die enorme Bedeutung der Zeit hingewiesen und stets betont, dass man sich irrt, wenn man das dauernde Verhalten nach dem momentanen zu beurteilen sich vermisst. Man überlege sich doch einen Moment, dass in einem Gebirge sich im Laufe der Jahrtausende eine immer genauere Anpassung der Verteilung aller inneren Druck- und Zugspannungen an eine Gleichgewichtslage ergeben hat, und dass durch Abwitterung, Schluchtenbildung, Aufschüttung von Gehängeschutt stetige langsame Änderungen in der innern Druckverteilung, strebend nach Gleichgewichtslage, eintreten müssen. Jetzt kommt plötzlich, in furchtbarer Hast ausgeführt, der gewaltige operative Eingriff des Tunnelbaues. Auf einem Stich durch den Berg ist plötzlich aller Gesteinsgegendruck aufgehoben. Eine Menge der früheren Kräftekurven sind unterbrochen, benachbarte nicht. Nun muss sich zunächst in der Umgebung des Tunnels die Verteilung der Druckspannungen im Gebirge ändern, dann wird langsam die Änderung von einer Stelle zur andern sich fortpflanzen und weiter greifen. Es wäre ein schönes Problem der graphischen Statik oder der analytischen Mechanik, diese Ablenkungen der Spannungskurven (Druck und Zug) genauer theoretisch zu prüfen. Die innern Spannungen werden nicht plötzlich der neuen Situation sich anpassen können, sondern sehr allmählich werden die Ablenkungen sich ergeben. Auf das zunächst um den Tunnel liegende Gestein presst nicht sofort das ganze Gebirge. Ein Scheiteleinbruch gewöhnlicher Art verlängert sich ja auch erst nach Jahren an die Oberfläche hinaus und erst dann ruht wieder die normale Überlastung auf dem Tunnel. Es ist für den Tunnelbau ein grosses Glück, dass der Gebirgsdruck gewissermassen überrascht und das Gewölbe eingesetzt werden kann, bevor er zur normalen endgültigen Besinnung und Wirkung kommt, sonst hätten wir wahrscheinlich keinen einzigen der grossen Tunnels zu Stande gebracht. Sogar der völlig plastisch kaolinisierte Urserengneiss des Gotthard-

tunnels an der berühmt gewordenen „druckhaften Stelle“ gelangte erst etwa ein halbes Jahr nach dem Tunnelausbruch in gefährliche druckhafte Beweglichkeit, und doch war hier die Gesteinsbeschaffenheit von vorneherein dazu angetan. Die Gebirgsfestigkeit wird auf die Dauer immer kleiner sein, als die Gesteinsfestigkeit, und niemals darf aus dem Verhalten eines Gesteines in der kurzen Zeit zwischen Tunnelaushub und Gewölbeeinbau ein rechnender Schluss auf die Gebirgsfestigkeit gezogen werden! Wenn die Gebirgsfestigkeit so leicht aus kurzatmiger Beobachtung sich ableiten liesse, wie Schmidt es meinte (S. 54 seiner Arbeit), dann hätte ich sie nicht als der „ungemessene Hauptfaktor“ bezeichnet.

Schmidt spricht von den „Druck- und Wärmezentren“ bei Km. 9 vom NP und 8 vom SP im Simplontunnel, welche am einen Ort mehr „treibend“, am andern „brechend“ druckhaft geworden sind und knüpft daran die Bemerkung (S. 57): „Trotzdem finden wir keine latente Plastizität der Gesteine und in der Art der Druckhaftigkeit erscheint noch jede petrographische Differenz zum Ausdruck gelangend“. Wie kann man aber „latente Plastizität“ wahrnehmen wollen an den Wänden eines Tiefbaues? Die kann und muss ja nur im allseitig geschlossenen Gebirge vorhanden sein, in einer Tiefe, wo der Druck die Gesteinsfestigkeit bedeutend übertrifft. Jeder Stollen befreit das Gestein in seiner Umgebung aus diesem Zustande durch einseitige Aufhebung des Gegendruckes und macht es dadurch relativ spröde und gibt ihm alle seine ursprünglichen Kohäsionseigentümlichkeiten zurück.

Einen Satz weiter hat sich Schmidt offenbar über die Unmöglichkeit plastischer Bewegungen an den Stollenwänden selbst besonnen und fragt nun: „Wie weit bergewärts erstreckt sich diese steife Randzone um den Tunnel, wo beginnt der plastisch gedrückte Kern? Nach Heim kann diese Schutzzone nicht allzu dick sein, denn der Hohlraum des Stollens muss ja noch ansaugend auf den plastischen Kern wirken können“. Auf den ersten Satz antworte ich, dass wir überhaupt mit unsern Gebirgstunnels noch nirgends in die wirklich für alle Gesteine latent plastische Zone gegriffen haben, dass übrigens, wenn dies der Fall wäre, nach meiner Meinung die Versprödung des vorher in plastischerem Zustande befindlichen Gesteines vom Stollen aus weit und im Laufe der Zeit mit der Lockerung immer weiter hinein greifen wird, jedenfalls hunderte, wahrscheinlich tausende von Metern. Und auf den zweiten Satz: Damit ein (bildlich gesprochen) „Ansaugen des Gesteins“ vom Stollenhohlraum aus, richtiger gesagt: ein Drängen des Gesteines durch Überdruck nach der gegendruckfreien Stelle sich geltend mache, ist es

gar nicht notwendig, dass das Gestein plastisch sei, es genügt Klüftung, Gebirgsschlagigkeit. Das von Schmidt S. 57 supponierte Experiment würde nach meiner Überzeugung zu Gunsten meiner Auffassung ausfallen: In ein klares, allseitig über die Druckfestigkeit gepresstes Stück Steinsalz wird ein Bohrloch hergestellt. Nach dem Herausziehen des Bohrers splintern sofort Stücke an den Bohrflächen ab (Bergschläge), das Bohrloch füllt sich mit solchen und es entsteht ringsum eine wolkige Trübung durch feine Risschen, die sich auslaufend verbreitert. Wenn der Druck lange Zeit noch anhält, wird die Masse allmählich wieder einheitlich und klar und das Bohrloch ist geschlossen. Stünde mir ein Laboratorium zu Gebote, so würde ich das Experiment ausführen.

Es ist allgemein bekannt und ist sehr begreiflich, dass die Unternehmung des Simplon-Tunnelbaues gerne ihrer vertraglichen Pflicht, den Stollen II auch zum Tunnel auszubauen, sich enthoben gesehen hätte. Bei den Bemühungen dafür hat sie sich auch hinreissen lassen, zu behaupten, die Gebirgsbewegungen seien „nun zum Stillstand gekommen“. Die Experten der Bundesbahnen haben umgekehrt festgestellt, dass die Bewegungen (Zusammengehen der Seiten, Sohlenauftrieb, Steinschläge, Gesteinseinbrüche) noch fortdauern. Nach meiner Überzeugung könnte vorübergehend durch Klemmerscheinungen da oder dort ein Stillstand eintreten, allein im Ganzen muss das Tempo der Bewegungen sich im Laufe der Zeit eher stets beschleunigen, denn durch die Ablösungen wird das Hohlprofil immer weiter und mit der Zeit das Streben des Gebirges gegen den offenen Stollen immer stärker ausgelöst. Verwechseln wir nicht das hier zu Erwartende mit dem, was durch gewöhnlichen Schwerebruch auch bei geringer Tunneltiefe vorkommt.

S. 58 lesen wir bei Schmidt: „Irgendwelche Erscheinungen, die auf latent plastischen Zustand des Gesteines, auf in demselben herrschenden hydrostatischen Druck hinweisen, wurden tatsächlich nicht beobachtet“. Ich habe schon darauf hingewiesen, dass latent plastischer Zustand des Gesteines selbstverständlich in einem Tunnel niemals beobachtet werden kann, es sei denn, dass die Gesteine schon in gewöhnlichem Zustande plastisch sind. Die Plastizität durch Druck ist nie direkt, sondern nur in ihren Folgen an bruchlos gebogenen Schichten, bruchlos gestreckten Gesteinen etc., zu erkennen. Allein dass eine dem hydrostatischen Druck vergleichbare Verteilung des Gebirgsdruckes vorhanden ist, hat Schmidt zwei Zeilen weiter oben selbst kursiv gedruckt, indem er von „**allseitiger Druckhaftigkeit**“ spricht. Das ist's eben! Das hat er selbst konstatiert im Sohlenauftrieb und in der Verengerung der Widerlagerdistanz. Warum läugnet er es zwei

Zeilen später wieder ab? Die allseitige Druckverteilung, der Art, dass das Überlagerungsgewicht sich nicht nur von oben auf den Gewölbescheitel, sondern ebenso von der Seite und **von unten** als Druck mit Tendenz zum Stollenschluss äussert, ist eben die mit einer Flüssigkeit zu vergleichende Erscheinung, die ich gewagt habe, „hydrostatische Druckverteilung“ zu nennen. Selbstverständlich — ich habe das auch stets so ausgedrückt — handelt es sich nicht um eine Gleichheit, sondern nur um eine Annäherung an den Zustand in einer Flüssigkeit. Die Differenz in der inneren Reibung bleibt bestehen. Was man sehr gut im Stollen und schon in diesen Tiefen wahrnehmen kann, das ist diese allseitige Fortpflanzung des Gebirgsdruckes. So wie die Gebirgsfestigkeit viel geringer ist, als die Gesteinsfestigkeit, so macht sich auch die allseitige Fortpflanzung des Druckes im Gebirge schon in viel geringeren Tiefen bemerkbar, als die plastische Umformung. Diese allseitige, der hydrostatischen vergleichbare Fortpflanzung des Druckes, ist nicht nur durch das Zusammengehen der Widerlager, sondern ganz besonders durch den Sohlenauftrieb bewiesen, der im Simplontunnelstollen II schon jetzt sich auf viele Kilometer Länge geltend macht, und der in hunderten von Bergwerken und tiefen Tunnels sich eingestellt hat. Der hydrostatische Auftrieb einer Flüssigkeit wirkt annähernd sofort, der Auftrieb im Gebirge kann nur langsam zur Geltung kommen, weil alle Bewegungen im Gebirge die innere Reibung der Masse und die Gebirgsfestigkeit erst zu überwinden haben. Das gibt aber in grossen Tiefen kein Aufheben, nur eine Verzögerung der Wirkung. Selbst Schmidt hat für den Sohlenauftrieb, für die „allseitige Druckhaftigkeit“ im „treibenden“ Gebirge keine andere Erklärung versucht. Er nimmt meine Erklärung an (Seite 50, unterer Teil), nur hat er dafür andere Worte benutzt. Und hier muss noch besonders betont werden, dass Schmidt nicht nur für die Bergschläge den Nachweis der Zunahme mit der Überlagerung gegeben hat, sondern dass er dies auch ausdrücklich im Simplontunnel für die „Druckhaftigkeit“, das „treibende“ Gebirge dartut, das (S. 56, Mitte) bei der grössten Überlastung von 2200 m am treibendsten wird!

Bei dieser Gelegenheit sei ferner erwähnt, dass auch Herr Ingenieur C. J. Wagner in seinen Aufsätzen in der Schweizerischen Bauzeitung (Juli 1905 Nr. 1—4) ausdrücklich konstatiert, dass im allgemeinen der Gebirgsdruck, wie er sich beim Tunnelbau manifestiert, mit der Tiefe unter der Oberfläche zunimmt. Wie der Gebirgsdruck zu Stande kommt, darüber freilich macht sich Wagner keine Gedanken. Er redet nur von den „inneren Kräften, welche in den Gebirgsmassen angesammelt sind“ und von dem Gebirge, „wo mit den sogenannten

inneren Kräften zu rechnen ist“. Ich habe im übrigen keine Veranlassung, weiter auf jene Artikel einzutreten.

Alle die Gegner der „hydrostatischen Druckverteilung“ konstatieren also, dass der „allseitige Gebirgsdruck“ mit der Überlastung zunimmt. Überlastung ist also die Ursache des Gebirgsdruckes und die flüssigkeitsartige Druckverteilung ist daran Schuld, dass die Überlastung nicht nur den Gewölbescheitel eindrückt, sondern auch die Seiten eintreibt und die Sohle auftreibt! Von der Gesteinsbeschaffenheit hängt nur ab, ob er sofort oder erst im Laufe der Zeit sichtbare Wirkungen erzeugt und in welcher Art das in den Tunnelhohlraum getriebene Gestein sich löst.

Seite 58 meint Schmidt, dass die Auffassung einer allseitigen (= hydrostatischen) Druckverteilung deshalb unrichtig sei, weil der Gotthardtunnel 1550 m und sogar 1646 m unter der Oberfläche, der Simplontunnel bei 1800 m mittlerer Überlastung noch klaffende Wasserspalten angetroffen habe. S. 62 kommt er mit der gleichen Beobachtung nochmals, setzt dann aber im Widerspruch mit dem vorher gesagten die Zahlen um 1000 m höher, auf 2700 bis 3000 m Tiefe unter der Oberfläche.

Zunächst ist zu beachten, dass, nachdem die Auflagerungsflächen der zur Festigkeitsprobe benutzten Steinwürfel ganz anders als früher bearbeitet werden, auch durchweg sich höhere Druckfestigkeiten ergeben haben. Kalksteine, Gneisse, Granite, Porphyre etc. ertragen Säulenhöhen von 2000 bis 6000 m, bevor die Säulenlast den Säulenfuß zerquetscht. Schmidt hat also recht, wenn er sagt, die von mir früher, d. h. vor 30 Jahren, angenommenen Tiefen für das Eintreten der latenten Plastizität in verschiedenen Gesteinen seien zu gering. Die Tiefen, in denen bis jetzt Wasserspalten gefunden worden sind, sind aber alle noch viel viel geringer. In der Tiefenzone, in welcher sich unsere grossen Alpentunnels befinden, ist durchschnittlich schon vielfach die Gebirgsfestigkeit überwunden, aber nur stellenweise die Gesteinsfestigkeit. Allseitige Druckverteilung ist schon lange wirksam, Gesteinszermalmung oder Plastizität tritt dagegen erst stellenweise ein. Da wird ein Tunnel notwendig allmählich druckhaft, obschon noch klaffende Spalten vorkommen und zum Teile neu sich öffnen. Wenn klaffende Spalten in der Richtung der Maximaldrucklinien des Gebirges, also ziemlich steil, nicht zu flach liegen, so können sie von längster Dauer sein, noch mehr, wenn sie zugleich mit Druckwasser gefüllt sind. Aber der Tunnelbau konzentriert dann den Gebirgsdruck auf die nächste Umgebung des Tunnels, so dass er hier bis zum Zersprengen spröder kompakter Gesteine sich steigert. In der Zone, wo die Überlastung im allgemeinen zwar die Gebirgsfestigkeit aber noch nicht allseitig die Gesteinsfestigkeit übersteigt, sind

dauernde Spalten möglich, während an gleicher Stelle ein Tunnel sich — unausgewölbt — schon schliessen muss. Das stimmt vollständig überein mit allen Erfahrungen im Hauenstein-, Bötzbberg-, Gotthard-, Simplontunnel etc. Die paar wenigen offenen oder mit Druckwasser gefüllten Spalten im Gotthard- und Simplontunnel widersprechen meiner Auffassung wahrlich nicht!

Seite 61 folgt Schmidts Generalverdikt in den Worten:

„muss ich besonders darauf hindeuten, dass A. Heim nicht berechtigt war, unter Hinweis auf die nicht genügende Vertiefung seiner Fachgenossen in die Mechanik der festen Körper, in autoritativer Weise seine Lehren von vor bald 30 Jahren unverändert zu wiederholen und denselben die weitgehendste Bedeutung in Fragen des Tunnelbaues beizumessen“.

In erster Linie muss ich fragen, ob dreissigjähriges Alter einer Theorie ein Beweis für ihre Unrichtigkeit sei. Ich kenne andere Theorien, die noch viel langlebiger sind. Und wenn Wahrheit darin ist, nach wie viel Jahren muss sie dann abtreten? Sie muss abtreten, wenn etwas besseres an ihre Stelle gesetzt werden kann!

Bei obigem Urteilsspruch von Schmidt muss ich notgedrungen etwas länger verweilen, und will dabei erst noch einige Worte über die tunneltechnische Seite der Frage hinzusetzen, sodann die Stellung prüfen, welche ich heute zu den „Lehren von vor bald 30 Jahren“ als Geologe einnehmen muss.

3. Meine Auffassung über den Gebirgsdruck in seinem Verhältnis zum Tunnelbau ist bestätigt.

Seit wann ist es „unberechtigt“, mittelst wissenschaftlicher Theorien praktische Fragen zu beleuchten? Man hat jahrelang Tunnelbau auf Grundlage einer falschen Gewölbetheorie getrieben, indem man vom architektonischen Gewölbe ausgegangen ist. Und jetzt, da sich der fortschreitende Zusammenbruch dieser Tunnels eingestellt hat und alle in beständigen Rekonstruktionen stehen, sollte mein Versuch, von einem anderen, diese bösen Erfahrungen würdigenden theoretischen Gesichtspunkte aus, die Dinge zu erörtern, unberechtigt sein? Meine Theorie über Gebirgsdruck und dessen Verhältnis zum Tunnelbau hatte ich Schritt für Schritt aus den Beobachtungen abgeleitet. Ich bin dann vor Beginn des Baues des Simplontunnels zum wissenschaftlich technisch tüchtigsten unter den mir damals schon bekannten Gliedern der Unternehmung, Herrn Oberst Dr. Eduard Locher gegangen, und habe ihm vorgestellt, dass ich grosse Gefahren in einem nicht ausgewölbten zweiten Stollen, unfern neben dem Haupttunnel sehe. Er suchte meine Bedenken damit zu heben, dass

er mich versicherte, der zweite Stollen werde sofort nach Vollendung des ersten ausgemauert. Ich setzte hinzu, „dann muss das aber sehr rasch geschehen“. Heute anerkennt die Unternehmung des Simplontunnels, dass die 17 m Distanz des Zwillingstunnels zu gering gewählt worden sei, sie schiebt aber allerneuestens wiederum die Schuld dafür auf die Geologen, als ob die Geologen hierüber überhaupt gefragt worden wären. Tatsächlich haben die vorläufigen geologischen Begutachtungen vor Beginn des Tunnelbaues alle auf die besonderen Schwierigkeiten hingewiesen, welche am Simplon der Beurteilung des Gebirgsbaues entgegenstehen und haben alle die Forderung aufgestellt, dass man Zeit und Auftrag zu einer gründlicheren Untersuchung vor Beginn des Tunnelbaues gebe. Eine solche ist dann aber leider unterblieben, weil die Unternehmung zum vornherein erklärte, dass sie darauf gar nichts gebe und den Bau unternehme, es möge im Berge kommen was da wolle, sie sei auf alles gerüstet. Um so sonderbarer nimmt es sich nun aus, wenn nächher immer wieder die Geologen der Unternehmung als Sündenbock dienen müssen, und sie alle Schwierigkeiten, die sich bei dem ungeheuren Werke eingestellt haben, als unvorhergesehen bezeichnet und dafür die Geologen verantwortlich machen will¹⁾. Vor Beginn des Baues war es aber tatsächlich der Geologe, der erklärt hat, dass auch im festesten Gestein der Stollen II eine Gefahr für Deformation des Tunnels I sei. Und wenn Herr Ing. C. Wagner als Experte diese Distanz von 17 m als genügend bezeichnet hatte, so beruhte diese seine Behauptung auf blossem grundlosem Gefühl ohne jede Überlegung, was Gebirgsdruck und Gebirgsfestigkeit in dieser Tiefe bedeuten.

Ohne mein Zutun, bloss durch das Gewicht der Tatsachen, die sich seither gezeigt haben, ist mein damaliges Postulat nun bestätigt und von den Räten angenommen worden, das heisst: der zweite Simplonstollen wird jetzt zum Tunnel ausgebaut. Auf Grundlage meiner Theorie von Tunnelbau und Gebirgsdruck habe ich vorausgesagt, dass das Gestein vom Stollen II aus an Brüchigkeit zunehmen und schliesslich auch Tunnel I gefährden werde, dass nach einiger Zeit Sohlenauftrieb eintreten, dass ursprünglich nicht druckhafte Stellen druckhaft werden, dass die Absplitterungen („Bergschläge“) zunehmen werden. Nun haben sich tatsächlich schon jetzt alle diese Erschei-

¹⁾ Verglichen:

Über die geologische Voraussicht beim Simplontunnel, Antwort auf die Angriffe des Herrn Nationalrat Ed. Sulzer-Ziegler, verfasst von Dr. Albert Heim im Auftrage der geologischen Simplon-Kommission. *Eclogae geologicae Helvetiae*. Vol. VIII, Nr. 4, S. 365 bis 384, Oktober 1904.

nungen im Simplonstollen II in einer geradezu erschreckenden Weise und noch viel rascher als ich es erwartet hatte, eingestellt, und man erkennt die daraus sich vorbereitende Gefahr für Tunnel I. Die Expertenkommission der Bundesbahnen, Dr. R. Moser, Ingenieur, Ing. Fr. Lusser und Prof. Dr. C. Schmidt, haben diese Erscheinungen genau konstatiert und sind zur Überzeugung gekommen, dass es höchste Zeit sei, den Stollen II wenigstens auf lange Strecken auszuwölben, dass in Tunnel I noch stärkere Gewölbe und mehr Sohlengewölbe hätten eingesetzt werden sollen, ferner dass die Distanz der beiden Tunnelaxen mit 17 m eigentlich viel zu gering sei, und an manchen Stellen kaum mehr 3 m zusammenhängendes Gestein zwischen beiden Tunnel vorhanden ist. Ist das nicht eine schlagende Bestätigung meiner Auffassung? Wie kann man es jetzt als „unberechtigt“ bezeichnen, dass ich das alles vorausgesagt habe? Schmidt aber, nachdem er sehr eingehend mitgeholfen hat, alle diese schlimmen Erscheinungen im Simplon objektiv festzustellen, gipfelt S. 59 in der Behauptung, er komme zu dem Schlusse, dass die Existenz des Simplontunnels durch meine Theorien in keiner Weise gefährdet sei.

Heute erlaube ich mir, meinen schon vor bald 30 Jahren angedeuteten, dann mehr und mehr ausgereiften und in meinen Vorlesungen über „Anwendungen der Geologie“, sowie in meiner Schrift „Tunnelbau und Gebirgsdruck“ näher in der Anwendung auf Tunnelbau dargelegten Standpunkt als aufs Neue durch die Erfahrungen bestätigt festzuhalten, dahingehend, dass die Überlastung durch das überliegende Gebirge bei unseren grossen tiefen Gebirgstunnels vielfach die Gebirgsfestigkeit, manchmal sogar auch die Gesteinsfestigkeit übersteigt und sich in einen allseitigen Druck umsetzt, so dass, um auf die Dauer haltbar zu sein, diese Tunnels von vorneherein mit druckstarkem, ringsum geschlossenem Gewölbe, am besten von annähernd kreisförmigem Querschnitt ausgeführt werden sollten und dass ein unausgebauter Stollen und ein Tunnel ohne Sohlengewölbe auf die Dauer nicht haltbar sind, und eine stets weiter greifende Lockerung des Gebirges nach sich ziehen.

Die verschiedenen Projekte schweizerischer Ostalpenbahnen suchen sich zur Zeit dadurch den Rang abzulaufen, dass jedes seine Kulmination noch tiefer legen will. Dadurch entsteht aber nicht nur eine Verlängerung des Haupttunnels, sondern eine wesentliche Erschwerung des Baues durch die vermehrte Tiefe unter der Oberfläche. Man wird stärkere Gewölbe und weit mehr Sohlengewölbe anwenden müssen, und wenn man sich dieser Einsicht, wie zu erwarten ist,

hartnäckig verschliesst, so werden einige Jahrzehnte später diese Arbeiten unter viel schwierigeren Umständen und doppelten Kosten durchgeführt werden müssen. Die Greina-Bahn hat beiderseits in je 900 m Meerhöhe von Natur gebotenen Tunnelleingang. Das tiefere Projekt verlängert den Tunnel nicht nur um ca. 7 km, sondern macht ihn auch viel druckhafter und verscherzt die reellen technischen und einen Teil der geologischen Vorteile. Noch bedeutend schwieriger wird sich das tiefere Projekt beim Splügentunnel gestalten, weil dort die Gesteine vorherrschend ziemlich flach liegen, die Wasserverhältnisse viel ungünstiger sind und, wenigstens der Südausgang, nicht von Natur gegeben ist. Grössere Tiefe ist nicht stets ein Vorteil, sie wird schliesslich zum Nachteil, schon abgesehen von den höheren Temperaturen.

Zur Zeit, da im Hinblick auf Greina und Splügen, neue Tunnelbausysteme auftauchen, in denen eventuell ein zweispuriger Tunnel mit dem Doppelstollensystem verbunden werden (Weber und Hennings, Chiapuzzi) oder ein vom Simplon abweichender Bau zweier einspuriger Tunnels (Dr. Locher) versucht werden soll, muss ich meinerseits betonen, dass ich es bei allen diesen Bauarten als ein Postulat ansehen muss, dass der Lüftungsstollen, der Wasserkanal etc., wenn er unter oder dicht neben dem Tunnel gedacht ist, in das Kreisgewölbe miteinbezogen werde, oder dann für sich ganz ausgewölbt werden muss. Stets würde ich demjenigen Tunnelbausystem den Vorzug geben, welches eine möglichste Ausnützung der „Überraschung“ des Gebirges gestattet, d. h. bei welchem die definitive totale Auswölbung des Tunnels möglichst rasch dem Einbruch durch den ersten Richtstollen nachfolgt.

4. Über die Druckplastizität der Gesteine bei der Gebirgsbildung.

Meine Theorie der Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung, die Theorie der Druckplastizität, die Schmidt bei dieser Gelegenheit ganz allgemein angreift und verwirft, ist durch alle bezüglichen in den letzten 30 Jahren gemachten, mir bekannt gewordenen Untersuchungen nur bestätigt worden und hat eine Menge für mich unerwarteter Vervollständigungen durch die mikroskopische Beobachtung und durch die Experimente einer ganzen Anzahl von vortrefflichen Forschern gewonnen. Seite 60 unten führt Schmidt heute wieder gegen mich diejenigen Widersacher (Stapff, Pfaff etc.) ins Feld, die schon vor vielen Jahren gründliche Zurückweisung erfahren haben, an deren Einwürfe Schmidt selbst nicht glaubt, und aus deren

Widerspruch nur Bestätigung für mich hervorgegangen ist¹⁾. Schmidt selbst gibt in seiner vorliegenden Arbeit in den Mitteilungen der tatsächlichen Beobachtungen viele Bestätigungen und nichts, das ich als Widerlegung ansehen könnte. Endlich ruft er S. 61 sogar „alle petrographischen und allgemein geologischen Lehrbücher“ zu Hilfe und konstatiert, dass „sich heutzutage die Autoren äusserst reserviert über latente Plastizität und bruchlose Faltung der Gesteine in der Tiefe äussern“. Das letztere ist nicht unrichtig, aber es ist kein Gegenbeweis. Es ist auch nur zum Teil richtig, denn z. B. für die Arbeiten vieler englischer Geologen, die sich so viel mit diesen Fragen beschäftigt haben, ist es nicht zutreffend. Sodann lese man z. B. nach in Zirkels Lehrbuch der Petrographie, 1893, erster Band, S. 603 bis 635. Gewiss drückt sich der grosse Meister der Petrographie sehr „reserviert“ aus. Allein S. 613 sagt er ausdrücklich: „Abgesehen von den Zertrümmerungen der Gesteinsbestandteile, welche nur deren Zusammenhang aufheben, bewirkt der Gebirgsdruck aber an ihnen auch eigentliche Deformationen, Gestaltsveränderungen, welche hauptsächlich als Streckung bezeichnet werden, unter Wahrung der Konsistenz“. In den darauf folgenden Seiten folgen eine Menge von Beispielen bruchloser mechanischer Gesteinsumformungen aus grosser Tiefe.

Oder man lese nach in E. Haug: *Traité de Géologie*, 1907, I., S. 232 oben, oder noch in andern.

Einen Gegenbeweis in der geologischen Literatur gegen die „latente Plastizität und bruchlose Faltung der Gesteine in der Tiefe“ habe ich nirgends finden können.

Es würde ein grosses Werk mit vielen Figuren ergeben, wollte ich diese Gelegenheit dazu benützen, auf alle mir von verschiedenen Seiten gemachten Einwürfe einzutreten und andererseits die zahlreichen zustimmenden oder erweiternden Beobachtungen und Diskussionen im Auszug wiederzugeben und zu besprechen. Hier muss ich mich ganz kurz fassen. Die folgenden Zeilen sollen so einfach und kurz als möglich meinen Standpunkt gegenüber diesem Generalverdikt (hier Seite 46, 2. Absatz) von Schmidt kennzeichnen.

Bei Aufstellung meiner Theorie der mechanischen Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung („Mechanismus der Gebirgsbildung 1878“) bin ich wie folgt vorgegangen:

1. Die vorher in den Alpen noch von erst wenigen (Arn. Escher, Baltzer) beachteten und im allgemeinen sonst noch ganz ungenügend gewürdigten Tatsachen der Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung

¹⁾ (Zeitschrift der Deutschen Geol. Ges. 1880, S. 262—299).

wurden in einer grossen Anzahl von Erscheinungsformen festgestellt und diese Tatsachen untereinander in Zusammenhang gebracht, und die Gesetze ihres Auftretens abzuleiten versucht. Es sind dies die deformierten Gerölle, deformierten Petrefakten, Dislokationsbreccien, Harnischgesteine, Clivage verschiedener Arten, Faltungen, feste Fluidaltexturen, Knetstrukturen, manche krystalline Umwandlungen und Ummineralisationen, die in geklemmten Faltungszonen fern von Eruptivgesteinen liegen¹). Seither sind noch eine schöne Anzahl weiterer Modifikationen von andern und mir dazu entdeckt worden, wie die Umwandlungen von Eruptivgesteinen in krystalline Schiefergesteine (Lossen, Rosenbusch, Grubenmann), die Mörtelstruktur (Thörnebohm), die Entmischungen von Kalk und Thon (Arnold Heim), die Knetmischungen (Steinmann) etc. Die Mannigfaltigkeit ist gross. Das Neue erschien mir nicht als Widerspruch gegen die frühere Erkenntnis, sondern als Entwicklung derselben.

2. Sodann habe ich alle diese Erscheinungen in eine Reihe zusammengeordnet, beginnend mit der Gesteinsdeformation durch grobe Brüche und Verschiebungen, übergehend zu immer feinerer innerer Zertrümmerung, endlich brechende oder gleitende Verstellung mikroskopisch kleiner Teilchen und endigend in der plastischen Umformung ohne eigentlichen Bruch, aber zum Teil mit Ummineralisation. Schon vor 30 Jahren hatte ich mikroskopisch wie makroskopisch eine Menge von Fällen bruchloser Gesteinsdeformationen gefunden.

3. Dann erst habe ich eine Erklärung für diese grosse ganze Erscheinungsreihe gesucht und dabei folgendes gefunden:

- 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

¹) Bei dieser Gelegenheit sehe ich mich zu folgender Selbstanklage verpflichtet. Vor 1878 waren mir die älteren Beobachtungen aus ausseralpinen Gebieten über mechanische Gesteinsumformungen bei der Gebirgsbildung leider grösstenteils entgangen. Im besonderen kannte ich damals noch nicht die Arbeiten von Baur (1846) über Transversalschieferung, nur teilweise diejenigen von Sorby (1853) und Phillips (1856). Ganz besonders mache ich es mir zum Vorwurf, dass ich damals die Beobachtungen und weitgehenden theoretischen Folgerungen von Lossen 1867 über Ummineralisation in Verbindung mit textureller Umformung aus dem Taunus übersehen hatte. Es ist das ein Fehler, für dessen Beurteilung ich nur den Linderungsgrund anführen kann, dass ich von einem schlechten Gedächtnis, besonders für das, was ich gelesen habe, geplagt bin — Folgen von schwerem anhaltendem Migräneleiden in den Jugendjahren. Literarische historische Gerechtigkeit ist für mich dadurch sehr erschwert. Die damals unberücksichtigt gebliebenen älteren Beobachtungen stimmen mit unseren späteren überein und heute mag es eher als Beweis für die Objektivität unserer Auffassungen gelten, dass unabhängig von einander so ähnliche Gesichtspunkte gewonnen worden sind.

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, Modellerton etc.

Wir können a und b noch kürzer ausdrücken: **Überlastung macht deformierbar, Dislokation deformiert.**

Die Art der Deformation mit mehr oder weniger Bruch oder ohne Bruch hängt ab von der Eigenschaft des Gesteines in Verbindung mit dem Grade der Belastung, sie kann betreffen die Lagerung, Textur, Struktur und Mineralisation.

Der von Rosenbusch stammende Name „Dynamometamorphose“ (1886) ist wohl am gebräuchlichsten geworden. Die älteste Bezeichnung von Lossen Dislokationsmetamorphismus (1869) ist aber viel präziser, um die zonal in den Kettengebirgen auftretenden und eben von der Dislokation herrührenden Gesteinsveränderungen zu unterscheiden von Kontaktmetamorphose, Regionalmetamorphose und anderem. Sie hat auch gegenüber anderen („Stauungsmetamorphose“ Gümbel, „Druckmetamorphose“ Brögger) den Vorzug, in allen Sprachen anwendbar zu sein.

Seite 61 sagt Schmidt: „Die tausendfältige mikroskopische Untersuchung der im Gebirge am intensivst gepressten Gesteine zeigt durchweg Zermalmung in erster Linie, dann bei Drucksteigerung chemische Auflösung und bei Druckerniedrigung Auskristallisation der Gemengteile. An Stelle rein mechanischer Vorgänge treten chemische, d. h. es entstehen erst Lösungen und dann Auskristallisationen, die zur Entstehung neuer Verbindungen führen können. so ist es doch sicher, dass die heutige Petrographie die bruchlose, rein mechanische latent plastische Umformung der Gesteine nirgends zu finden vermag“ — von „latenter Umformung“ wird gesprochen!

Meine Theorie von der Deformation der Gesteine bei der Gebirgsbildung umfasst die ganze kontinuierliche Reihe der Umformungen von der Zertrümmerung zur Dislokationsbreccie bis zur mehr oder weniger bruchlosen Umformung, und bringt diese Erscheinungsformen

in verständlichen Zusammenhang. Die total bruchlose plastische Umformung ist nur das äusserste Endglied der ganzen Reihe. An diesem allein aber setzt die Kritik meistens ein. Selbstverständlich sind die letzten Endglieder viel seltener zu sehen, als die Millionen von Zwischenformen. Aus den letzteren auf Nichtexistenz der Endglieder oder auf Unrichtigkeit der ganzen Betrachtungsart zu schliessen, ist unlogisch. Es ist aber auch nicht wahr, dass mikroskopische Untersuchung stets nur Zermalmung oder Lösungsumsatz nachweise. Eine ganze Menge von Autoren haben das bruchlose Fliessen (Flowage) von Gesteinssubstanz unter dem Mikroskop erkannt (Becker, Adams, Harker, Teall, Milch, Fisher, Sharpe, Sorby, Reusch, A. Geikie, Zirkel [vergl. obiges Zitat], Rosenbusch, Van Hise, Grubenmann etc. etc.). Ich besitze manche Dünnschliffe, in denen die feinsten Deformationen von Gesteinen ohne Bruch und ohne Lösungsumsatz zu sehen sind. In unseren Sammlungen befinden sich herrliche Stücke, an denen rein mechanische bruchlose Faltung jedem Unbefangenen sofort in die Augen springt und durch die Dünnschliffe bestätigt wird. In manchen Regionen der Alpen sieht man auf Schritt und Tritt Fältelungen, Linearstreckungen an den Gesteinen ohne Rissbildung, ohne Strukturänderung, ohne Farbänderung der Gesteinsmasse. Eine Menge anderer Beobachter haben solche Fälle konstatiert. Es scheint mir nicht berechtigt, die Hypothese des Lösungsumsatzes auch überall da hineinzutragen, wo starke bruchlose Deformationen, ohne die geringste Umänderung in der Mikrostruktur und ohne Farbveränderung, wie sie doch bei Lösungsumsatz fast unvermeidlich wären, eingetreten sind. Ich komme darauf nochmals zurück.

Ich habe zwar stets betont und bin noch jetzt der Meinung, dass bruchlose Umformung einschliesslich einer Dislokationsmetamorphose mit Ummineralisationen (chemischen Umsetzungen) durch den blossen Druck rein mechanisch hervorgerufen werden können; ich habe aber niemals behauptet, dass andere als rein mechanische Faktoren ausgeschlossen seien. Der Lösungsumsatz, der zuerst von Lossen eingeführt worden war, war für mich längst ein Mittel, dessen auch die Deformation bei der Kettengebirgsstauung sich bedienen kann. Niemals hielt ich denselben für einen Widerspruch, sondern für eine willkommene Erweiterung meines Erklärungsversuches, er macht die Moleküle beweglicher. Der Lösungsumsatz für sich allein kann aber keine Gesteinsdeformation erzeugen. Auch bei Lösungsumsatz bleibt die Gesteinsdeformation an den Schweredruck in der Tiefe und an den Dislokationsdruck gebunden. Inwieweit im einen und andern Fall der Lösungsumsatz mitgeholfen hat, darüber freilich sind die Akten

noch lange nicht geschlossen. Wahrscheinlich kann manche Umlagerung mit Lösungsumsatz schon unter geringerem Gebirgsdruck eintreten, als dies ohne Lösungsumsatz der Fall wäre.

Eine ähnliche zweite Ergänzung der Theorie der Gesteinsdeformation bildet die Einführung der Wärme als eines begünstigenden Faktors. Gegenüber einigen älteren Meinungen ist hervorzuheben, dass es sich dabei keineswegs um Reibungswärme durch Dislokation, sondern einfach um die Erdwärme in der Tiefe handelt, in welcher die Deformation stattgefunden hat. Es sind vor allem die Experimente von Adams und Nicolson, welche die wesentliche Erleichterung der Deformation von Marmor durch Erwärmen auf 300° erwiesen haben. Ganz das gleiche Resultat hatten diejenigen von Tammann über die Ausflussgeschwindigkeiten kristallisierter Stoffe. Wärme vermehrt rasch die Plastizität. Die meisten in den Alpen jetzt entblösten Gesteinsdeformationen haben unter einem jetzt abgewitterten Gesteinsmantel von einigen hundert bis einigen tausend Metern, also bei erhöhter Temperatur stattgefunden. Aber auch hier gilt das Ähnliche: Die Wärme allein ergibt keine Gesteinsdeformation, keine Dislokationsmetamorphose — höchstens Regionalmetamorphose; Dislokation muss erst auf das gepresste warme Gestein einwirken, bis es deformiert wird.

Eine dritte Erweiterung hat die Theorie der Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung erfahren durch die Beobachtungen über die „Gleitflächen“ und die Zwillingsbildung bei Plagioklas, Mikroklin, Augit, Disthen, Calcit etc. durch Druck. Auch da wiederum: Diese Eigenschaften für sich allein erklären die Umformungen nicht, erst unter hohem Druck und bei Dislokation können sie in Wirkung treten und die Deformation sehr wesentlich erleichtern.

Vielleicht findet man noch weitere Erscheinungen, welche ebenfalls zur Umformung mithelfen können. Vor allen denke ich hier als viertes Moment daran, dass die Lösung fester Substanz in fester Substanz durch hohen Druck und infolge davon die chemische Umsetzung von grösster Bedeutung sein könnte. Wesentlich unterstützt wird dieser Gesichtspunkt durch die Experimente von Spring, in welchen zusammengepresste trockene Pulver in chemische Umsetzung treten, falls dadurch Produkte von geringerem Volumen möglich sind und dass die so erhaltenen Produkte von zunehmender Kristallinität sich zeigten.

In der Folge sind wir mehr und mehr dazu gelangt, die Dislokationsmetamorphose in zwei Richtungen der Ausbildung zu unterscheiden. Unter Druck bei starker Bewegung, „Stress“, treten mehr

Lagerungs- und Texturänderungen auf (Faltung, Clivage, Linearstreckung, Knetstruktur, Rutschflächen) unter mehr stehendem Druck mehr Umkristallisation und Ummineralisation unter Beibehalt oder gar Ausbildung mehr massiger Texturen. Das erstere findet sich öfter in Faltenschenkeln, das letztere öfter in eingeklemmten Muldenkernen und Gewölbekernen. Alle Mischungen oder Zwischenformen sind möglich.

Durch die Faltung eingeklemmte Muldenzonen können in sehr grosse Tiefen hinabgeschleppt worden sein. Da waren zum Teil gleiche Faktoren wie bei der Regionalmetamorphose massgebend, wie besonders Hitze, dazu auch vermehrter Schweredruck, Lösungsumsatz, und die Resultate können sehr ähnlich werden und sich örtlich ebenso zusammensetzen wie die Ursachen.

In meinen weiteren Besprechungen beziehe ich mich ausdrücklich nur auf die Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung, die zonal in Kettengebirgen auftritt und von der Dislokation abhängig ist. Es war ja doch meine Theorie der Druckplastizität der Gesteine an Hand der Dislokationsdeformationen und zur Erklärung von diesen gewonnen. Ich kann mich hier nicht auf das einlassen, was z. B. die Entstehung der kristallinen Schiefer überhaupt betrifft, was zur reinen Regionalmetamorphose gehört.

Nochmals muss ich auf die Frage des wässrigen Lösungsumsatzes zurückkommen.

Ich kenne viele Fälle, wo ich von der Mitwirkung des Lösungsumsatzes zur Deformation unter hohem Druck überzeugt bin. Die neuen Mineralien scheiden sich dann, hingewandert an die Stellen geringsten Druckes, aus und erinnern dort in gewissen Hinsichten an Sekretionen, indem sie deutlichere Kristalle bilden und von Verunreinigungen und Farbmitteln befreit sind.

Es gilt dies z. B. für die kleinen Quarzkriställchen auf den Schichtfugen an den Umbiegungen der feinen Falten des Quartenschiefer — Röthidolomites¹⁾. Ebenso gilt wohl Lösungsumsatz sehr oft für Feldspath gegen die Enden der Flaserlinsen in Augengneissen. Es ist dies besonders dann unzweifelhaft, wenn der mittlere Teil des Feldspathauges viele Unreinigkeiten enthält, die Winkel des Auges dagegen rein sind. Weisse Calcit- und Quarzlagen finden sich massenhaft auf den Schichtfugen der Umbiegungskniee von Fältelungen im dunkeln Bündnerschiefer und bei vielen anderen gefältelten Schiefer-

¹⁾ A. Heim, Geol. Nachlese Nr. 12, Vierteljahrsschrift der naturforsch. Ges. Zürich 1900.

gesteinen aller Art, während sie zwischen den Schichtenschenkeln völlig fehlen. Durch die Anhäufung an diesen Stellen geringsten Druckes, durch ihre fast sekretionsähnliche Struktur und durch den Mangel an Farbstoff kennzeichnet sich hier der Lösungsumsatz oder Lösungs-transport während der Faltung und als Folge des Dislokationsdruckes. In fein gefältelem dichtem schwarzem Malmkalk vom Piz Frisal, den Windgällen, vom Hüfigletscher, vom Pfaffenkopf, vom Titlis finden sich oft eine Menge feiner, scharf abgegrenzter, weisser, dünner Calcitlagen in den Schichtfugen zwischen den schwarzen Schichten in den Regionen der Umbiegungskniee ¹⁾. Sie sehen so sehr nach Calcitsekretionen aus, dass ich sie früher zum Teil irrtümlicherweise für nachträglich gefaltete Calcitadern angesehen hatte. Sie sind durch Lösungsumsatz und Lösungs-transport während der Faltung entstanden. Aber gerade in diesen Gesteinen tritt uns nun sehr oft der Gegensatz von dem plastisch gefalteten, in seiner Mikrostruktur fast total unveränderten schwarzen dichten Malmkalk einerseits und der auf den Schichtfugen durch Lösungsumsatz gebildeten Calcitmasse andererseits sehr augenfällig entgegen. Die Calcitmasse ist zudem oft von feinen dunkeln Flächen in der Ausweichungsrichtung durchzogen. Das sind die während der Bewegung und dem Lösungsumsatz ausgeschiedenen Anthraconit und Tonhäutchen, das Resultat der Entmischung, auf welchen zurückgebliebenen Gleithäuten dann das Fliessen der übrigen Gesteinsteile vom Schenkel gegen die Umbiegungsstelle hin ohne weiteren Lösungsumsatz stattgefunden hat.

Auf den beiden Streckseiten der Pyritknollen im schwarzen Malmkalk von Quinten sind faserige weisse viertelmondsförmige Calcitkappen angesetzt, die nach ihrer Farbe und Struktur — die Fasern sind in der Richtung mit der Streckung gewachsen — mit Hilfe von Lösungsumsatz an den Stellen geringsten Druckes sich ausgeschieden haben.

Ich denke mir, dass unter Belastungsdruck und Dislokation die blosse Gebirgsfeuchtigkeit den Lösungsumsatz besorgt haben kann, und dass die gleiche Menge Wasser immer wieder in Wirkung getreten ist.

Der Lösungsumsatz unter hohem Druck ist aber experimental noch sehr wenig geprüft worden. Spezia ²⁾ ist es nicht gelungen,

¹⁾ Verglichen die Abbildungen Taf. VIII, Fig. 8 u. 9, in A. Heim, Geol. Nachlese Nr. 12, Vierteljahrsschrift der Naturf. Ges. Zürich 1900.

²⁾ Georgio Spezia: Accad. real. Sc. Torino 1904: „Contribuzione di Geologia chimica und 1905 il Dinamometamorfismo e la Mineragenesi“, ferner Atti del Congresso dei naturalisti italiani, Milano 1906, „la pressione anche unita al tempo non produce reazioni chimiche“.

durch hohen Druck die Lösung von Quarz zu vermehren. In den neuesten physikalisch-chemischen Lehrbüchern liest man, dass die Löslichkeit vom Drucke nicht merklich abhängig sei. Und doch ist die Lösung in der Regel spezifisch schwerer, als Lösungsmittel und ungelöster Körper im Mittel sind. Lösung bedeutet somit meistens etwelche Verdichtung und sollte deshalb von Druck befördert werden. Vielleicht wird der Lösungsumsatz erst wesentlich befördert, wenn erhöhte Temperatur den Druck unterstützt? Sehr auffallend bleibt immerhin die Tatsache, dass bei den Experimenten von Adams und Nicolson die plastische Umformung des Marmors in vollständig trockenem Zustande bewerkstelligt werden konnte, und dass die Durchfeuchtung des Gesteines seine Umformbarkeit nicht vermehrt hat. Es ist also wohl angezeigt, noch nicht zu schnell alles auf Lösungsumsatz abzustellen. Musste nicht der höchste Druck das Wasser und die Lösung meistens ganz herausquetschen und die zurückbleibenden trockenen Substanzen in Reaktion bringen?

Wie wir viele Fälle kennen, wo sicher, wie wir alle darüber einig sind, Lösungsumsatz in Mithilfe bei der Deformation getreten ist, so kennen wir aber auch sehr viele Fälle, wo die genauere Art der Ummineralisation und der Deformation zweifelhaft bleibt. Namentlich in den Dünnschliffen hochgradig ummineralisierter und deformierter Gesteine fehlen oft alle unzweideutigen Anzeichen dafür, ob die Metamorphose durch Lösungsumsatz oder ohne solchen stattgefunden habe. Jeder sieht dann nach seiner Auffassung. Viele Erscheinungen können so oder so gedeutet werden. Wir suchen vergeblich nach sicheren objektiv entscheidenden Merkmalen. Wir können nur sagen, Lösungsumsatz sei wahrscheinlich, weil die dazu nötige Wassermenge im Gestein allgegenwärtig ist und das Wasser bei hohem Druck und hoher Temperatur nicht träge geblieben sein wird. Aber die Resultate von Lösungsumsatz einerseits, trockenem Druckumsatz andererseits sind oft nicht unterscheidbar. Der Entscheid für unsere Auffassung liegt zur Zeit noch darin, ob wir dem einen oder andern mehr Glauben schenken. Wir müssen eben die Mittel erst noch entdecken, an welchen sich Lösungsumsatz einerseits von trockenem chemischem Druckumsatz oder trockener Molekularwanderung, oder rein mechanischer Deformation des einzelnen Mineralkornes andererseits unterscheiden lässt, wenn es überhaupt solche für alle Fälle gibt.

Endlich gibt es aber auch zahlreiche Fälle, wo nach meiner Überzeugung Lösungsumsatz ausgeschlossen bleibt, obschon bruchlose Deformation eingetreten ist. Einige Beispiele der letzteren Art:

Der schwarze tonfreie Malmkalk an der Windgälle, im Meyental etc. ist lineargestreckt — wie die eingeschlossenen Belemniten messen lassen auf 2- bis 10fache Länge. Lösungsumsatz hat die Lücken zwischen den wegen ihrer hohen Sprödigkeit und Querfaserung auseinandergerissenen kleinen Belemnitenstücken als Stellen geringsten Druckes mit weissem Calcit ausgefüllt. Das intensiv linear gestreckte Gestein aber hat keinerlei Strukturveränderung erfahren, wie sie mit Lösungsumsatz verbunden sein müsste, wohl aber sind alle kleinsten Calcitkörnchen etwas gestreckt, ohne irgend eine kristallographische Orientierung zu erhalten. Die feine Pigmentverteilung ist unverändert, das gestreckte dichte Kalkgestein ist dunkel blaugrau geblieben. Da sehen wir nebeneinander: 1. In geringen Mengen das Produkt des Lösungsumsatzes an den Stellen geringsten Druckes zwischen den Belemnitenstücken als weisse Calcitmasse und 2. die ganze Masse des einschliessenden Gesteines mechanisch gestreckt, also in der Textur verändert, aber ohne irgend eine Struktur- oder Farb-Veränderung. Ganz genau so verhält sich die Linearstreckung im Malmkalk der Windgälle mit zerrissenen Seeigelstacheln.

Die Mikrostruktur des von Adams und Nicolson ¹⁾ experimentel erhaltenen deformierten feinkörnigen Marmors stimmt auffallend genau überein mit der Mikrostruktur des gestreckten Kalksteines von Fernigen. Die Umformung geschah dort ganz trocken unter hohem Druck, das einamal bei 300° in 124 Tagen, das andere Mal bei 400° in 8½ Stunden. Das deformierte Gestein hatte beinahe unverändert die gleiche rückwirkende Festigkeit wie das ursprüngliche, in einem Experiment war es sogar noch fester geworden. Die im ursprünglichen, massigen Gestein in allen Richtungen gleichdimensionierten Calcitkörnchen waren nun stark flachgequetscht, manchmal dazu noch gebogen und stark verzwillingt. Die abgeflachten Körner erzeugten eine Schieferung in der Richtung ihrer grössten Ausdehnung, aber von Kataklasstruktur, Mörtelstruktur war keine Spur vorhanden. Die individuellen Körner verhielten sich als plastische Körper!

Die Versuchsbedingungen bei Adams und Nicolson entsprechen genau den von der Theorie geforderten Bedingungen. Durch diese prachtvollen Versuche ist die bruchlose mechanische Deformation von sprödem tonfreiem kristallinischem Kalkstein (Marmor) ohne Lösungsumsatz, trocken bei allseitiger Pressung höher als die rückwirkende Festigkeit tatsächlich bewiesen. Was für ein weiterer Beweis

¹⁾ Adams und Nicolson „An Experiment into the Flow of Marble, Philos. Trans. A. vol. 195, S. 363 etc.

ist denn noch notwendig? Bereits ist ähnliches auch mit granitischen Gesteinen mehr oder weniger gelungen. Die plastische Gesteinsumformung unter hohem Druck steht als experimentelle Tatsache vor uns!

Auch da kann man sagen: In der Natur war aber etwas Wasser dabei und das wird nicht untätig geblieben sein. Im Adams'schen Versuche hat die Feuchtigkeit aber die Deformation nicht erleichtert. Die Möglichkeit der bruchlosen trockenen plastischen Umformung ist bewiesen!

Ganz entsprechende Erscheinungen haben sich bei den Experimenten von Tammann¹⁾ über die Ausflussgeschwindigkeit kristallisierter Stoffe unter Druck und erhöhter Temperatur aus engen Öffnungen ergeben. Er kommt zu dem Schlusse, dass „Fliesen nicht durch vorangegangene Schmelzung bedingt ist, sondern dass die Plastizität, die reziproke innere Reibung, eine den Kristallen eigentümliche Eigenschaft ist. Sie wächst schnell mit der deformierenden Kraft und der Temperatur“. Auch da war Lösungsumsatz nicht im Spiele, es wurde mit trockenen Substanzen experimentiert. Übrigens haben auch schon die Versuche von Tresca die Plastizität kristalliner Stoffe unter Druck bewiesen.

Doch wieder zu den Beobachtungen im Gebirge zurück: Sehr häufig sahen wir in dichten tonhaltigen wie tonfreien Kalksteinen, in Kieselkalken, Dolomiten und anderen Gesteinen prachtvolle feine auch unter dem Mikroskop völlig bruchlose Fältelungen ohne jede Kataklase, ohne strukturelle Veränderung des Kalksteingewebes, mit der doch Lösungsumsatz notwendig verbunden sein müsste. An den Schichtschenkeln sind die Calcitkörner ohne Brüche parallel der Schicht manchmal deutlich abgeflacht, im Umbiegungsknie liegt ihre grösste Dimension quer zur Schicht, d. h. in der Axialebene der Falte, wie es die Theorie verlangt. So ist es z. B. stellenweise zu sehen im schwarzen, fein gefältelten tonfreien Malmkalk vom Pfaffenkopf, im Malmkalk vom Selbsanft, Windgälle, Grindelwaldgletscher, im Seewerkalk am Klausen, im Dolomit des Aversertales etc. Im Seewerkalk des verkehrten Mittelschenkels, der unter der ganzen Säntisgruppe am Risipass²⁾ liegt, finden wir im Dünnschliff in den gequetschten Teilen der Kalklinsen die sonst runden Durchschnitte von Foraminiferen mehr und mehr flach elliptisch gepresst. Dennoch

¹⁾ Tammann, Kristallisieren und Schmelzen, Beitrag zur Lehre der Änderungen des Aggregatzustandes, 1903, S. 180 etc.

²⁾ Arnold Heim, „Beiträge z. Geol. d. Schweiz“, neue Folge XVI. S. 469 etc. und Atlas Taf. XLI, Fig. 2, 3 und 4.

sind die feinstkörnige Struktur des sehr dichten und festen umgebenden Kalksteines und die Sekretionsstruktur der Steinkerne unverändert geblieben, und die Foraminiferenschale hat ihre scharfe Umgrenzung und die feinfaserige Radialstruktur behalten. Wenn auch ganz schief gedrückt, ist doch noch im polarisierten Licht das dunkle Axenkreuz der sphärischen Aggregation in den Schalendurchschnitten erhalten geblieben. Jeder Lösungsumsatz hätte bei so starker Deformation solche Strukturfeinheiten verwischt und alles mehr oder weniger ähnlich marmorisiert. Das ist plastische Deformation ohne Lösungsumsatz! An gleichem Orte, manchmal sogar im gleichen Handstück, finden sich andere Stellen, wo die Umformung noch weiter geht. Da verschwinden dann die Foraminiferen und Gestein wie Foraminiferen und Steinkerne derselben werden aufgezehrt in farblosen Calcitfasern, die in der Streckungsrichtung liegen. Da hat sich nun nach aller Wahrscheinlichkeit Lösungsumsatz eingestellt. Von freiem Auge lassen sich diese calcitfaserigen Stellen stets daran erkennen, dass die graue Gesteinsfarbe verschwunden, das Gestein weiss geworden ist, während an der Grenze des Lösungsumsatzes sich als Resultat der Entmischung durch Lösungsumsatz tonige Pigmenthäute ausgeschieden haben. Also auch hier lässt sich ganz scharf rein mechanisch plastische Umformung von Umformung unter Mithilfe des Lösungsumsatzes unterscheiden, und die erstere hat tatsächlich stattgefunden, die letztere erscheint in diesem Falle als Steigerung der ersteren.

Und wenn ich die Schwämme, Ammoniten und das einschliessende Gestein der Schiltkalke vom Bützistöckli ohne jede Kataklase und ohne jene an Sekretion erinnernde Änderung in der Mikrostruktur oder der Farbe auf 2- bis 12fache Länge stenglig ausgezogen finde, so kann ich für solche Fälle nicht auf Lösungsumsatz, nicht auf eine indirekte Plastizität abstellen.

In den Gebirgen finden wir die Gesteinsschichten oder Schieferplatten bei allen möglichen Gesteinsarten an scharf umgebogenen Stellen immer verdickt, an den Faltenschenkeln dagegen immer verdünnt, oft auf die Hälfte oder einen noch viel kleineren Bruchteil. Die Dickendifferenz der Schichten zwischen Schenkel und Umbiegungsstelle beweist direkt, dass eine innere Verschiebung der Teilchen, ein Strömen, ein „Flow“ oder „Flowage“ vom gequetschten Schenkel nach der benachbarten Umbiegungsstelle hin stattgefunden hat. Die mikroskopische Untersuchung zeigt oft ausser etwas stärkerer Abflachung der Mineralkörner nicht die geringste Strukturdifferenz von Schenkel und Knie. Dagegen finden wir häufiger feinste innere kurze Gleitflächen parallel der Axialebene der Umbiegung, die ganze Masse durchsetzend, in den Schenkeln schief, an der Umbiegung zur Schicht-

fuge quer gestellt und bis zu gezahntem Verlauf der Schichtfugen an der Umbiegungsstelle sich steigernd. Sie äussern sich in einer schwachen Spaltbarkeit. Sie sind entstanden durch das aneinander Vorbeigleiten der feinsten Teilchen, der Kristallkörner oder Teile derselben ohne Aufheben des Zusammenhangs, sie können sich zum deutlichen Clivage¹⁾ entwickeln. Lösungsbewegung kann sie nicht erzeugt haben, nur Bewegung von Festem an Festem. Sie sind Mikrogleitflächen. Bei etwas Tongehalt des Kalksteines oder Dolomites werden die Mikrogleitflächen rasch an Ausbildung und Deutlichkeit zunehmen, das Clivage wird mehr und mehr ausgeprägt und bei wirklichen Tongesteinen von grösster Vollkommenheit.

Diese Art der rein mechanischen plastischen Umformung ohne Lösungsumsatz und ohne Dislokationsbreccien anerkennen auch diejenigen Forscher, welche, wie Becke und Grubenmann, dem Lösungsumsatz noch weit umfassendere Herrschaft bei der Dislokationsmetamorphose zuschreiben, als ich es zu tun vermag. Das ist aber auch diejenige Art der Umformung unter Druck, an welche ich ursprünglich stets am meisten gedacht habe, deren Urbilder Wachs, Paraffin, Modellierton, Plastilina sind, von deren Verhalten ich deshalb auch das Wort „plastisch“ entlehnt habe. Das Wesentliche liegt darin, dass die Teilchen unter Druck sich verschieben ohne ihre Attraktionssphären zu verlassen, also ohne den Zusammenhang zu verlieren. Es ist eine innerliche Verschiebung ohne Zerbrechen, ohne Zerstoren der Festigkeit. Ob dabei die einzelnen Teilchen ganz klein seien, ob sie wie beim Lösungsumsatz Moleküle seien, oder ob es mechanische Einheiten sind, die unter dem Mikroskop wahrgenommen werden können, hat für die Deformation der Gesteine keine wesentliche Bedeutung. Auch im gepressten Wachs und Ton zeigt sich oft Clivage, im gepressten Thon besonders nach dem Brennen. Wie bei dem gepressten Gestein, so ist auch da die Ausbildung von Clivage oder Fluidaltextur um so feiner und versteckter, je homogener das ursprüngliche Material war. Auch bei Pressen von Wachs und Töpferton gleiten die kleinsten Teilchen übereinander wie in einer Flüssigkeit die Moleküle, aber zum Unterschied von der Flüssigkeit bleiben die Spuren des Gleitens, des Flowage als Clivage. Dass beim Töpferton Wasser die Bewegung der Teilchen gewissermassen schmiert, Wachs dagegen in sich allein plastisch ist, ist für den Vergleich im Verhalten bei der De-

¹⁾ Becker: „Experiments on Shistosity and Slaty cleavage“ Un. States Geol. Survey, Bulletin Nr. 241. Harker „On Slaty Cleavage and allied Rock-Structures with special reference to the mechanical Theories of their Origin“ (Report of the British Association for 1885, pp. 813—852), enthält sehr viele Literaturnachweise.

formation unwesentlich. Und nun sollte die Faltung mit Verdünnung der Schenkel und mit Verdickung der Umbiegungsstellen ohne Strukturveränderung und manchmal sogar ohne merkbare Texturveränderung nicht **plastische Umformung** genannt werden dürfen? Frage: Worin unterscheidet sie sich von derjenigen von Töpferton oder Wachs, von der wir den Begriff genommen haben? Antwort: Einzig darin, dass das Gestein nicht schon an freier Luft diese Eigenschaften der Plastizität besitzt, sondern dieselben — und das ist eigentlich meine ganze Theorie — erst in allseitiger Pressung eingeschlossen, d. h. unter Überlastung annimmt. Überlastung gibt dem Gestein die Eigenschaften eines plastischen Körpers, macht es, wie ich mich 1878 auszudrücken gewagt hatte, „latent plastisch“. Ich sollte denken, das wäre nicht so schwer zu erfassen.

Wir verlangten von der bruchlosen plastischen Umformung niemals mehr als von der Plastizität von Wachs, Paraffin, Modellerton oder Plastilina und doch wissen wir jetzt, dass sie manchmal noch darüber hinausgeht, indem — im Fernigerkalk, Windgällenkalk etc. etc. und in den Experimenten von Tammann, Rinne, Adams — sogar das mikroskopische individuelle Kristallkorn sich plastisch homogen deformiert! Und nun will man noch die plastische Umformung ableugnen!

Sogar Weinschenk¹⁾ gibt die plastische Umformung für Kalkstein und Marmor zu, sonderbarer Weise aber einzig und allein für dieses Gestein, das Übrige fertigt er mit dem Worte „undenkbar“ ab. Es gibt aber noch viel plastischere Gesteine wie Mergel, Ton-schiefer etc. A. v. Koenen hat bruchlose (plastische) Biegung im Steinsalz, Zimmermann im devonischen Kieselschiefer gefunden — das mögen Endglieder der Reihe sein, in welcher der Kalkstein und manche andere Gesteine in der Mitte stehen. Wo dagegen nicht nur innere Bewegung ohne Zerbrechen, sondern noch dazu Lösungs-umsatz mehr oder weniger mit ins Spiel tritt, treffen wir vielfach als erstes Anzeichen auf den Schichtfugen der Umbiegungsstellen Auskristallisationen von Calcit, Quarz, eventuell noch andere Mineralien, während solche auf den Schichtfugen der Schenkel fehlen. Gewinnt der Lösungsumsatz an Bedeutung für die Umformung, so greift Hand in Hand damit die Umkristallisation auch in die Schicht selbst mehr und mehr hinein, der Kalkstein „vercalcitet“, womit ich freilich nicht zugestanden haben möchte, dass alle Marmorisierung Lösungs-

¹⁾ Weinschenk „Über die Plastizität der Gesteine“, Zentralblatt für Min. Geol. u. Pat., 1902. S. 161—171.

umsatz sei. Bei diesen Mischformen von plastischer Umformung auf rein mechanischem Wege und plastischer Umformung mit Lösungsumsatz tritt uns meistens das Moment sehr deutlich vor Augen, dass die ursprünglichen Färbemittel des Gesteines vom Lösungsumsatz nicht in gleicher Weise bewegt werden, wie der andere Teil der Gesteinsmasse. Das durch Lösungsumsatz Bewegte ist meistens reiner als das Ursprüngliche, es ändert die Farbe, der Farbstoff verschwindet oder häuft sich im Rückstande in Häuten und Schlieren an. Lösungsumsatz erzeugt also meistens Strukturänderung mit Farbänderung.

Den ersten Fall, an welchem ich 1875 erkannt hatte, dass die Dislokations-Deformation der Gesteine auch tiefer greifende Ummineralisationen erzeugen kann, bot mir der Eisenoolith des Dogger aus dem Mittelschenkel der Windgällenfalte¹⁾. Ich kann das merkwürdige mikroskopische Bild dieses Gesteins auch heute noch durchaus nicht mit wässrigem Lösungsumsatz in Beziehung bringen. Die Neubildungen, z. B. die Magnetitkriställchen sind nicht etwa an den Stellen geringsten Druckes, z. B. den Rändern der zu Linsen gequetschten Oolithkörner angehäuft, sondern annähernd gleichartig durch die ganze Masse eingestreut, an Sekretionen erinnernde Lagerung von Neubildungen sind nicht zu finden. Die flachgequetschten Linsen haben meistens ihre konzentrische Schichtung in Flachlinsenform bewahrt. Eine ganze Menge dislokationsmetamorph ummineralisierter Gesteine machen mir unter dem Mikroskop denselben Eindruck. Mir scheint, die festen Substanzen seien hier unter Druck und bei hoher Temperatur ohne Lösungstransport direkt in Umsatz und Umkristallisation im Sinne der Volumverminderung getreten.

Ich bin auch nicht der Einzige, der diese Überzeugung aus den mikroskopischen Beobachtungen geschöpft hat. Man findet bei verschiedenen Autoren Stellen, die mehr oder weniger deutlich gleiche Überzeugung verraten. In E. Haug *Traité de Géologie* 1907, I. Seite 235 heisst es: „Il est incontestable dès lors que la seule pression a dû, dans certaines conditions, favoriser la production de silicates calcaires et de silicates alumineux cristallisés aux dépens de mélanges d'argile et de calcaire“.

Lassen wir es jetzt der Beispiele und der Erörterungen und Zitationen genug sein. Mir scheint, es sei eine den Beobachtungen

¹⁾ „Mechanismus der Gebirgsbildung“ II. S. 99: „hier erscheint ein Metamorphismus als die Folge rein mechanischer Umstände und Vorgänge, als eine höchste Potenz der mechanischen Umformung, die verändernd bis in das Molekül greift“. Verglichen auch ebendasselbst II. S. 62.

nicht entsprechende Hypothese, alle bruchlose Deformation und alle Dislokationsmetamorphose als durch Lösungsumsatz zu Stande gebracht erklären zu wollen. Seitdem die Chemiker und Physiker von Lösungen fester Substanzen in einander sprechen, dürfen wir auch als Geologen an solche Vorgänge denken.

Ich wiederhole: Mehr oder weniger Lösungsumsatz ist für meine Theorie der Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung keine Lebensfrage. Vielmehr ist der Lösungsumsatz eine Erleichterung für die feinste plastische Umformung von Molekül zu Molekül in textureller wie struktureller und besonders in mineralisatorischer Hinsicht, wenn dieselbe erst durch grossen Belastungsdruck möglich und durch Dislokation notwendig geworden ist.

Eine indirekte Bestätigung meiner Theorie der Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung hat auch die neuere Auffassung der Deckenfalten in den Alpen dadurch gebracht, dass die Verteilung der erst mehr durch Bruch vermittelten und dann mehr und mehr bruchlosen Umformungen nun viel deutlicher zu beurteilen ist und mit der Belastung, unter welcher die Deformation eingetreten ist, in Übereinstimmung steht. Die schönsten bruchlosen Umformungen aller Art finden wir im Autochthonen, das unter der ganzen Last der Decken sich faltete, und sodann noch in den tiefsten Decken. Nach den höheren Decken erscheinen die Umformungen unter allen Arten des inneren Zerbrechens. In den obersten Decken ist Bruchverschiebung sehr gewöhnlich, Faltung spärlicher. Darauf beruht zum Teil die tektonische Differenz in Ostalpen und Westalpen. Weil beim Überschieben der Decken die Umformbarkeit mit der Tiefe zugenommen hat, treffen wir die tieferen Decken stärker deformiert, die höheren aber steifer, spröder und zugleich rascher über der plastischen Unterlage bewegt.

Ebenso betrachte ich die Aufstellung von Gesteinstiefenzonen in den kristallinen Schiefen (Sederholm, Van Hise, Becke, Grubenmann) als eine Bestätigung unserer Theorie der Gesteinsumformung. Die Ummineralisationen nehmen mit der Überlastungsmasse zu, wobei die Überlastung allerdings ebensowohl als Erwärmer wie als Presse gewirkt haben muss. Ob dabei trockene rein mechanische Drucklösung und Ausscheidung stattgefunden habe, oder ob Durchfeuchtung und wässriger Lösungsumsatz die Hauptsache besorgt hat, ändert nichts an der Erkenntnis von der Bedeutung der Überlastung.

Vor dreissig Jahren habe ich noch kaum daran zu denken gewagt, dass ein enorm stenglig ausgequetschter Gneiss ursprünglich ein massiger Granit gewesen sein könnte. Wenn ein solches Material auf z. B. ein Viertel der ursprünglichen Dicke und auf die vierfache Länge deformiert ist, und dabei ausgeprägte Lineartextur erhalten hat, aber festes, zusammenhängendes Gestein geblieben ist, nicht in Brocken, nicht in eine Breccie sich umgewandelt hat, so muss ich das als Ganzes eine plastische Gesteinsumformung nennen. Dass dabei die einzelnen Elemente des Gesteines sich verschieden verhalten haben, ob z. B. der Quarz feinrümmerig zerquetscht, der Feldspath 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 zu Stande 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.

Ein recht sprödes und zugleich festes Mineral wird überhaupt sogar bei einer allseitigen Belastung viel höher als seine Druckfestigkeit doch noch unplastisch ganz bleiben oder splittrig brechen, dann nämlich, wenn es eingebettet liegt in einer Mineralmasse von geringerer Druckfestigkeit. Die letztere dringt dann in die Druckrisse des spröden Minerals ein oder umfließt dasselbe, sie übernimmt die Hauptmasse der Deformation. Die verschiedenen Mineralien helfen sich jedes nach seinen Fähigkeiten die Deformation des Gesteines zu ermöglichen. Kataklastische Struktur einzig der Quarzkörner eines Gesteines ist deshalb gar kein Anzeichen dafür, dass das Gestein als Ganzes nicht plastisch deformiert sei. Das Gestein ist nicht zertrümmert, nur seine Quarzkörner. Die Quarzkörner verhalten sich da oft ähnlich wie die Belemniten oder Seeigelstacheln im gestreckten Malmkalk. Übrigens beweist schon jede undulöse Auslöschung in einem Quarzkorn eine gewisse plastische Deformation desselben.

Gebirgsdeformation, Gesteinsdeformation und Mineraldeformation sind zu unterscheiden. Eine Gebirgsdeformation kann eintreten, ohne dass das Gestein in seinem petrographischen Charakter verändert wird wie z. B. im Tunnel bei Steinschlägen oder

durch schon vorhandene Bruchflächen an druckhaften Stellen, im Gebirge durch zahlreiche Brüche, wie z. B. die horizontalen Transversalbrüche des Sämtisgebirges etc. etc. Eine Gesteinsdeformation schliesst immer eine Deformation des Gebirges, dessen Glied dieses Gestein ist, in sich. Sie ist eine höhere, eindringlichere Art der Umformung, welche auch grössere Druckkräfte verlangt. Sie kann durch Bruch oder bruchlos eintreten. Die Mineraldeformation ist die tiefst greifende Dislokationsmetamorphose. Keine Mineraldeformation ohne Deformation des Gesteines, dem das Mineralkorn angehört. Nicht jede Gebirgsdeformation bedingt auch Gesteinsdeformation. Nicht jede Gesteinsdeformation bedingt auch Mineraldeformation, wohl aber umgekehrt. Es handelt sich um bloss graduelle Unterschiede infolge des Betrages der Belastung und des Dislokationsdruckes im Verhältnis zur Festigkeit des Gebirges, des Gesteines oder der Mineralien.

Gerölle vieler Gesteine, besonders Quarzitzerölle zu flachen Linsen gedrückt, haben die Skandinavier, vor Allen Reusch¹⁾, längst beschrieben; aus Schottland kennen wir sie von Geikie etc. Plastische Deformation von Quarzkörnern in Gesteinen ist von Milch beschrieben worden²⁾ etc.

Dislokation ohne Belastung ergäbe nur einen Trümmerhaufen, keine Falte, keine Streckung, keine Knetstruktur, kein Clivage, keine deformierten Petrefakten. Ohne die Belastung als erste Bedingung würde kein Lösungsumsatz im Sinne der Ausbildung der dichteren Mineralien hervorgerufen. **Belastungsdruck über die Festigkeit hinaus und Dislokation** sind die Hauptursachen, Wärme, Lösungsumsatz, Zwillingsbildung, Ausbildung von Gleitmineralien sind erleichternde Hilfsmittel der Gesteinsumformung bei der Gebirgsbildung.

Diejenigen Forscher, welche Experimente gemacht haben, haben sich oft am besten in das Problem vertieft. Ich erinnere an die Experimente von Kick, Rinne, Adams und Nicolson, Daubré, Tresca, Becker, Löwinson-Lessing, Tammann, Spring, Auerbach etc. Ich hatte die Herstellung der nach der Theorie richtigen Bedingungen für die Experimente für sehr schwierig dargetan³⁾ und hatte selbst,

¹⁾ Hans Reusch in „Silur fossiler og pressede Conglomerater i Bergenskifrene“ Universitätsprogramm 1883, Christiania.

²⁾ „Über dynamometam. Erscheinungen an einem nordischen Granitgneiss“, N. Jahrbuch 1900, Bd. II. „Über homogene Deformation von Quarz und Piezokristallisation“, Zentralblatt 1904, S. 181—190.

³⁾ Zeitschrift der Deutsch. Geol. Ges. 1880, S. 262—299.

offen gestanden, keine Hoffnung in das Gelingen derselben. Tatsächlich ist nun aber doch die plastische Umformung im Experimente nicht nur für Metalle, sondern auch für unmetallische kristallinische Mineralien und Gesteine gelungen und zwar für Steinsalz und andere Salze, für Flussspath, Kalkspath, Kalkstein und Marmor. Unter den gebirgsgefalteten Sedimentgesteinen gehören aber gerade Kalkstein und Marmor zu den (ohne Fassung in allseitigen Druck) sprödesten, splittrigsten. Andere, wie Kieselschiefer sind fester, aber kaum splittriger. Trescas Experimente beweisen überhaupt die Plastizität kristalliner Stoffe unter hohem Druck und lassen alle Differenzen nur noch als graduel erscheinen. Tammanns Experimente zeigen, dass die innere Reibung mit dem Druck allgemein abnimmt, die Plastizität zunimmt, selbst bei sehr spröden Körpern. Immer noch erhalten die Versuche Unvollkommenheiten, besonders im absolut dichten Umschliessen des umzuformenden Stückes mit einem Material mindestens gleicher oder grösserer Druckfestigkeit. Die Erfolge sind deshalb für bruchlose Umformung noch nicht für alle Gesteine durchschlagend. Rinne hat sehr interessante Umformungen mit teilweisem Bruch, Zermalmungszonen etc. erhalten, dadurch, dass er Marmor in Alaunschmelze einschloss, welche letztere eben für bruchlose Umformung des Marmors nicht druckfest genug ist. Er hat so Deformationen erhalten, wie wir sie auch so oft in den Gebirgen treffen. Die Resultate der Experimente überhaupt sind schon heute der Art, dass es wohl keinem Zweifel mehr unterliegt, dass es noch gelingen wird, selbst sehr spröde körnige Gesteine plastisch umzuformen oder wie Kiek sich ausgedrückt hat, zu prägen, in alle die Texturen, in denen wir sie in den Gebirgen finden. Die erfolgreichsten Experimentatoren, wie besonders Adams und Rinne, haben genaue Anpassung an die von mir theoretisch verlangten Versuchsbedingungen angestrebt: Druck allseitig bedeutend grösser als die rückwirkende Festigkeit, dazu ein nicht allseitiger Deformationsüberdruck oder mit andern Worten: Minimalste Pressung in der Ausweichungsrichtung immer noch grösser als die rückwirkende Festigkeit. Bei allen den Versuchen hat sich deutlich ergeben, dass sie auch bei Körpern schwierigen Verhaltens ein um so besseres Resultat erzielt haben, je näher sie diese Bedingungen für Plastizität zu erreichen vermocht haben. Im Besonderen haben die Resultate der Versuche mich dadurch überrascht, dass die Deformationen in so kurzer Zeit erlangt worden sind. Keiner der Experimentierenden hat einer zu erzielenden Deformation auch nur ein volles Jahr Zeit zur Ausbildung gelassen, meist musste es in wenigen Stunden geschehen sein, höchstens in 124 Tagen! Ich hoffe, dass meine ver-

ehrten Kollegen, die in der Lage sind, in dieser Art zu experimentieren, ihre Experimente fortsetzen werden.

Schon das heute Vorliegende ist ein **vollgültiger Beweis** dafür, dass unter allseitig hohem Drucke tatsächlich plastische Umformungsfähigkeit eintritt, dass also meine Theorie der mechanischen Gesteinsdeformation bei der Gebirgsbildung **richtig** ist.

Viele Beobachter haben in den letzten 25 Jahren Fälle von Gesteinsumformung gefunden und diskutiert. Dabei schien es manchmal, als ob alle diese Dinge nur dazu da wären, um meine Theorie der Deformation kritisieren zu müssen und einzelne Kritiker sahen ob den einzelnen Bäumen den Wald nicht mehr und blieben an kleinen Missverständnissen hängen. Eine ganze Anzahl — die Engländer nicht — stolpern an den Ausdrücken „hydrostatische Druckverteilung“ oder „latente Plastizität“. Sie konstruieren sich die sonderbarsten Schwierigkeiten aus diesen Worten heraus, während sie daneben die Sache bestätigen, ohne es zu merken. Noch neuestens konstatiert Steinmann ¹⁾ „bruchlose Umformung“, „Knetstruktur“ an dichtem Kalkstein, „bruchlose Biegung und Ausdünnung“, spricht von „mechanisch verschweisst“ (S. 346) und bildet bruchlos umgeformte und dabei strukturell unveränderte Kalksteinschichten ab. Dann fährt er aber fort: „Schliesslich will ich noch hervorheben, dass meiner Ansicht nach weder die Struktur des Iberger Mischgesteins noch die des Lochseitenkalks zu der Annahme berechtigen, dass sich diese Gesteinsmassen in einem durch ungeheuren Druck hervorgerufenen latent-plastischen Zustande befunden hätten. Für diese Vorstellung habe ich bisher überhaupt weder an sedimentären noch an kristallinen Gesteinen Anhaltspunkte entdecken können.“ Allein jede bruchlose Umformung, wie sie Steinmann und viele andere konstatiert haben, ist ja der Beweis dafür, dass das Gestein zur Zeit der Umformung in druckplastischem Zustand tatsächlich gewesen sein muss. Bruchlose Umformung ist hervorgegangen aus plastischem Verhalten und beweist ganz unabänderlich einen latent-plastischen Zustand, der die Umformung durch Dislokation vorbereitet hat. Oder was sonderbares, mir ganz unerfindliches stellt man sich denn vor unter dieser von mir als Erklärung der bruchlosen Umformung angenommenen Plastizität? Ich sage ja im Prinzip nicht viel anderes, als: weil, wie wir die fertige Tatsache vor uns sehen, ein Gestein bruchlos umgeformt worden ist, so musste es pla-

¹⁾ Neues Jahrbuch, Festband 1907, S. 340 und 341.

stisch gewesen sein. Als theoretisch kann man erst meinen weiteren Satz bezeichnen: Der Überlastungsdruck war die Ursache dieser Plastizität¹⁾.

Ein anderer Fehlschluss tritt mir hie und da aus gelegentlichen abweisenden Bemerkungen anderer Forscher entgegen: In einer zur schönen scharfen Falte gebogenen Schicht finden sich einige Rissen, einige Sekretionsäderchen, oder einige einzelne Mineralkörner sind gebrochen. Dies wird nun dahin gedeutet, es handle sich da nicht um bruchlose (= plastische) Umformung, es gebe keine bruchlose Deformation, wenn man genau zusehe. Sie übersehen, dass die bruchfreien Zwischenstücke doch deformiert sind und die paar

¹⁾ In der zitierten Arbeit will Steinmann seinen Iberger Seewerkalk und den Lochseitenkalk als ein mechanisches Mischgestein darstellen. Ich gebe zu, dass es solche Mischgesteine gibt. Bei seinem Iberger-Gestein würde ich aber eher an die etwas verknetyten Übergangsregionen von Seewerkalk in Senonschiefer denken, wo primär stratigraphisch dünne Schichtchen von Kalk und Ton wechseln, und beim Lochseitenkalk verhält sich die Sache nicht so, wie Steinmann auf Grundlage einiger weniger chemischer Bestimmungen annimmt. Es gibt Stellen, wo Flysch und Malmkalk in grossen Formen verknetyt sind. Im einzelnen ist man aber fast niemals im Zweifel, mit welchem der beiden gut geschiedenen Gesteine man es zu tun hat. Die alte Pfaffsche Bestimmung auf 46 % unlöslicher Substanz, die Steinmann als Beweis für die Verknetyung von Lochseitenkalk mit Flysch zitiert, bezieht sich gar nicht auf Lochseitenkalk, sondern auf ein Stück Flyschmergel, den Pfaff für Lochseitenkalk genommen hat. Sodann wird vergessen, dass zwar allerdings die kompakten Malmkalkbänke, abgesehen von den häufigen Kieselkonkretionen, keine 2 % unlösliche Substanz enthalten, dass aber in manchen Regionen mit den Kalkbänken Mergelbänke wechsellagern. Diese Mergelbänke des Malm sind im Lochseitenkalk mit reinen Kalkbänken verknetyt und insofern stellt er eine Knetmischung dar. Der durchschnittliche Gehalt an Unlöslichem beim normalen Malmkalk liegt nicht so niedrig. Wenn wir in 13 Proben Lochseitenkalk von 9 verschiedenen Lokalitäten des Serntgebietes gemischt untersucht 10,21 % Unlösliches gefunden haben, so wird das mit dem gewöhnlichen Malm durchschnitt übereinstimmen. Früher hatte ich einzelne Bestimmungen von Lochseitenkalk unter 4 %. Bei der, wenn auch sehr unregelmässigen, aber doch dabei meistens ganz scharfen Grenze zwischen Lochseitenkalk und Flysch, und nicht auffällig mehr unlöslichem Rückstand, als er dem Durchschnitt des Malmes entspricht, kann ich nicht an eine wesentliche Mischung mit Flysch denken. Auch da, wo, wie z. B. an der Setherfurca, am Kalkstöckli etc. der Röthidolomit „lochseitisiert“ ist, ist er nicht mit dem Malmkalk zu einem Mischgestein verknetyt, sondern die zackige Grenzlinie ist besonders auf der angewitterten Fläche scharf zu verfolgen. Der Lochseitenkalk hat deshalb mehr flaserige Knetstruktur und nicht bloss homogene Marmorisierung erfahren, weil er nicht nur gepresst und wenig bewegt worden ist, sondern weil er zwischen zwei verschieden gestellten und sehr verschieden festen und zugleich weithin relativ sich bewegenden Gebirgsmassen eingeklemmt und dabei zerrissen, in Riebeln gedreht und verwalzt worden ist. Der Lochseitenkalk gehört übrigens nicht zu den bruchlos rein mechanisch deformierten Gesteinen; er enthält ausser bruchloser Krümmung seiner Fluidalfasern eine Masse mikroskopischer Brüche und deutliche Spuren von Lösungsumsatz. Der Lochseitenkalk enthält vielleicht noch den tithonischen Zementstein, möglicherweise an einzelnen Stellen etwas Kreide und etwas Flysch, er ist aber im Ganzen durchaus kein Mischgestein von Malmkalk und Flysch, sondern meistens nur Malmkalk.

makroskopisch oder mikroskopisch auffindbaren Brüche, wenn man sie sich wieder weg und die Massen um die Bruchdislokation in ursprünglichere Lage zurückversetzt denkt, nicht ausreichen, auch nur einen kleinen Bruchteil der tatsächlichen Umformung, Biegung etc. zu erklären. Der grössere Teil hat sich bruchlos vollzogen, wie es nur unter allseitigem Druckeinschluss, aber nicht an freier Luft möglich gewesen ist. In manchen solcher Fälle können zudem die beiden verschiedenen Arten der Umformung zu ungleicher Zeit unter veränderten Umständen eingetreten sein.

Bei Schmidt findet sich S. 61 der Satz: „Dass die mechanischen Deduktionen von A. Heim theoretisch einwandfrei sind, kann kaum bestritten werden. Wir stellen nur in Abrede, dass die Anwendungen derselben so schematisch einfach durchgeführt werden dürfen, wie A. Heim das tut“. Ich bin freudig überrascht und dankbar, mitten zwischen der abweisenden Kritik plötzlich auf das unumwundene Geständnis zu treffen, dass Schmidt meine Theorie für „einwandfrei“ hält. Wenn sie aber einwandfrei ist, so darf sie auch angewendet werden. Dann bleibt nur noch der Vorwurf, dass ich dabei „schematisch einfach“ vorgegangen sei. Ob dieser Vorwurf berechtigt sei, überlasse ich denjenigen zu beurteilen, welche meine einschlägigen Arbeiten studiert haben¹⁾. Ich habe vielmehr den Eindruck, dass diejenigen, welche meiner Auffassung nicht beistimmen können, die Dinge zu „schematisch einfach“ nehmen, während meine Theorie selbst auf die unendliche Mannigfaltigkeit und Individualisierung der Erscheinungen, wie wir sie in der Natur finden, einzugehen vermag und sie von einem zentralen Gesichtspunkt aus verständlich macht.

Meine Fachgenossen, auch diejenigen, welche meine Erklärungen der Deformationen durch Druckplastizität ablehnen zu müssen glauben,

¹⁾ „Mechanismus der Gebirgsbildung“ Band II, bei Benno Schwabe, Basel 1878.

„Zum Mechanismus der Gebirgsbildung“, Zeitschrift der Deutschen Geolog. Gesellschaft, Jahrg. 1880, S. 262–299.

Gelegentlich manche bezügliche Beobachtung in „Beiträge zur geol. Karte der Schweiz, Lfg. XXV, Geologie der Hochalpen zwischen Reuss und Rhein“, 1891.

„Stauungsmetamorphose an Walliser-Anthracit und einige Folgerungen daraus“, Vierteljahrsschrift der naturf. Ges. Zürich, Jubelband 1896.

„Gneissfädelung in alpinem Zentralmassiv, ein Beitrag zur Kenntnis der Stauungsmetamorphose“, Vierteljahrsschrift der Zürcher naturf. Ges., 1900, (als „Nachlese Nr. 12“).

„Tunnelbau und Gebirgsdruck“, Vierteljahrsschrift der Zürcher naturf. Ges., 1905, (als Nachlese Nr. 14).

haben unsere Kenntnis der Gesteinsumformungen vielfach und wesentlich erweitert. Aber bisher hat Niemand meine Erklärung wirklich zu widerlegen oder eine bessere an ihre Stelle zu setzen vermocht. Missverständnisse und Missdeutungen sind keine Widerlegungen. Und aus all dem bereicherten Material von Experimenten und von Beobachtungen in der Natur und am Mikroskop kann ich nur immer wieder Bestätigung der logisch so einfachen Auffassung finden: Belastung über die Gesteinsfestigkeit hinaus macht deformierbar, im Endglied latent plástisch, Dislokation (einseitiger Drucküberschuss) dazu deformiert nach Lagerung, Textur, Struktur und Mineralisation. Wenn auch diese Auffassung, wie ihr vorgeworfen wird, dreissig Jahre alt ist, so muss ich doch an derselben festhalten. Die dreissig Jahre haben viel daran zu rütteln versucht, sie haben sie aber bisher nicht geworfen und nicht ersetzt, sondern erweitert, ergänzt und bestätigt.

Nachschrift.

Diese „Nachlese Nr. 19“ stand bereits in 2. Korrektur, als Kollege Schmidt mir eine neue Publikation von ihm überreichte:

„Die Geologie des Simplongebirges und des Simplontunnels“, Rektoratsprogramm der Universität Basel für die Jahre 1906 und 1907, Basel, bei Friedr. Reinhardt, Universitäts-Buchdruckerei, 1908.

Die Schrift soll auch noch auf Verlagsweg verbreitet werden. Der Verfasser sprach mir zugleich den Wunsch aus, dass ich mich in meiner Erwiderung auf seine Kritik mehr an diese neue Publikation, als an das halten möchte, was als Gutachten gedruckt worden ist, da diese neue Publikation weitere Verbreitung, als das erstere unter Fachgenossen erhalten werde. Ich trage diesem für mich etwas verspäteten Wunsche durch diese Nachschrift so gut als möglich Rechnung.

Der Abschnitt IV, „Untersuchungen über die Standfestigkeit der Gesteine im Simplontunnel“, Seite 55 bis 93 ist, abgesehen von kleinen Zusätzen oder Weglassungen, wörtlich das Gleiche, was das „Gutachten“ schon enthält, nur ist die Paginierung eine andere und die verschiedenen Teile sind in ihrer Reihenfolge verstellt worden. Im Besonderen sind alle diejenigen Aussprüche von Schmidt, auf welche ich im Obigen eingetreten bin, meist unverändert wiederholt. Ich lasse hier für meine Zitationen die neuen Seitenzahlen folgen.

In „Nachlese 19“ Seite:	ist zitiert „Gutachten“ Schmidt Seite:	dies entspricht „Rektoratsprogramm“ Seite:
2	51	82 unten und 83 oben
5	50	70 auf 71
5	46	79 unten (Bernhardt)
5	51	82 unten
5	56	88 unter Mitte
5	54 unten	86 oben
6	58 oben	83 unten
7	Figur 3	fehlt
	„ 4	15
	„ 5	16
	„ 6	17
	„ 8	19
	„ 9	20
	„ 12	fehlt
	„ 13	21
	„ 14	22
8 unten	53 bis 54	84 unten und 85 oben
10	57 oben	89 oben (verändert)
11	57	83 unter Mitte
11	58	89 Mitte
12	50	70 auf 71
12	56	88 unter Mitte
13	58	89 untere Hälfte
13	62	92—93
14	61 oben	91 über Mitte
16	59	90 oben
17	60	91 oben
18	61	91 über Mitte
20	61	91 unter Mitte
37	61	91 unten.

Eine kleine Veränderung fand ich in folgenden beiden Zitaten: Seite 61 „Gutachten“ hiess es im sogenannten Generalverdikt: „dass A. Heim nicht berechtigt war . . .“, im „Rektoratsprogramm“ S. 91: „dass A. Heim kaum berechtigt war . . .“ Und im „Gutachten“ S. 61 sind meine mechanischen Deduktionen theoretisch einwandfrei ohne jede Reserve, im „Rektoratsprogramm“ S. 91 sind sie es „in gewissem Grade“. Wichtig scheint es mir, hier ausdrücklich die vortrefflichen Worte von Schmidt „Gutachten“ S. 50, „Rektoratsprogramm“ S. 70 und 71, vollinhaltlich wiederzugeben:

„Den Gesteinen, die ich „brechend“ nenne, sind „Bergschläge, Gebirgsstoss usw.“ eigentümlich. Das spröde, kompakte, homogene Gestein stand vor Eröffnen des Stollens unter allseitig wirkendem Druck. An der neu angehauenen Stollenwand fehlt den randlichen Teilen der Gegendruck; die Konsistenz des Gesteins verhindert eine Zerteilung dieser Aussenschicht in kleinste Teile und Hineintreiben derselben als bewegliche Masse in den neu geschaffenen Hohlraum. Längs der gegendruckfreien Fläche dehnt sich das Gestein in einer wenig mächtigen Zone über dem festen Kern des Felsens aus und es entstehen die Pfeilerschüsse. — Die Gesteine, die ich „treibend“ nenne, sind infolge ihrer weniger grossen Konsistenz von Ruscheln und Gleitflächen durchzogen, die Wirkung der Aufhebung des Gegendrucks besteht hier darin, dass die ganze Gesteinsmasse allseitig in den künstlichen Hohlraum hineindrängt, aufgelöst in Trümmer mit Rutschharnischen oder als breiförmige Masse, langsamer oder rascher, je nach der Konsistenz des Gesteines.“

Ich sehe in diesem Satze die vollste Übereinstimmung mit meiner Auffassung und freue mich derselben, ich bedaure nur, dass Schmidt diese Freude nicht teilt, sondern sich selbst die Übereinstimmung in der Folge immer wieder auszureden versucht.

Auch im „Rektoratsprogramm“ gibt uns Abschn. IV, 1. Teil, S. 55 bis 70 Schmidt wiederum eine noch vermehrte Zahl sehr wertvoller Beobachtungen und Abbildungen über die Deformationen im Simplontunnel. Er führt Stellen an, und bildet sie ab, wo der Sohlenauftrieb nach Art der „Creeps“ eine scharfe Auffaltung mit Scheitelbruch im Gneiss erzeugt hat, andere wo der Wasserkanal in der Sohle von 0,6 m Weite auf 0,48 m zusammengedrückt oder um 0,1 und mehr gehoben worden ist und wo die Widerlager der Gewölbe um Dezimeter zusammengegangen sind etc. etc.

Das „Rektoratsprogramm“ enthält ausserdem eine Anzahl Abschnitte über den Bau des Simplongebirges und die Tunnelgeologie, auf die ich hier nicht einzutreten habe, weil sie ausserhalb des Gesichtspunktes liegen, der uns hier beschäftigt hat. Wohl aber verweise ich hier noch auf eine Richtigstellung von Schmidts Anklagen (S. 9 des „Rektoratsprogrammes“) gegen die Geologische Simplon-Kommission, welche ich in den *Eclogae geol. helv.* im ersten Heft von Bd. X. 1908 gegeben habe.
