

©Naturhistorisches Museum Wien, Wien, Österreich, 2025  
DENKSCHRIFTEN  
DES NATURHISTORISCHEN MUSEUMS IN WIEN  
BAND 3

# GESTEINSUMFORMUNG

VON

DR. WALTER SCHMIDT

A. O. PROFESSOR DER MONTANISTISCHEN HOCHSCHULE LEOBEN

MIT 12 ABBILDUNGEN IM TEXT  
UND 1 TAFEL

LEIPZIG UND WIEN  
FRANZ DEUTICKE

1925

STOR  
23421

ALLE RECHTE,  
BESONDERS DAS DER ÜBERSETZUNG IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN

*COPYRIGHT 1925 BY FRANZ DEUTICKE, LEIPZIG UND WIEN*

VERLAGS-NR. 2944

DEM GEDENKEN MEINES VATERS  
SCHULRAT DR. WILHELM SCHMIDT  
GEWIDMET

# Vorrede.

Dieses Buch macht den Versuch, den Gesetzen, die die Gestaltänderung der Gesteine beherrschen, nachzugehen. Es will sich damit in die Reihe der Arbeiten stellen, die schon seit dem Beginne der geologischen Forschung von der Erkenntnis gezeugt wurden, daß Gesteine im festen Zustande ihre Form verändert haben und die die Wege erforschen wollen, auf welchen diese Umformungen vor sich gegangen sind. Ich nenne da Daubrée, Reyer, Becker, Leith, Van Hise, Becke, Grubenmann, E. Suess, F. E. Suess und insbesondere Heim in seinen schönen Darlegungen vom „Mechanismus der Gebirgsbildung“ an bis zu der „Geologie der Schweiz“, mit ihm die ganze Schweizer Schule.

Es soll dieses Buch ein Beitrag sein aus jener Gruppe österreichischer Geologen, die seit einer Reihe von Jahren sich mit diesen Fragen befassen, ich nenne hier Sander, Ampferer, Spitz, Heritsch, Angel, Schwinner. Insbesondere wird der Leser aus der Häufigkeit des Namens Sander in den folgenden Darlegungen erkennen, wieweit ich ihm für Anregungen sowohl aus freundschaftlichem Verkehr als auch aus seinen Schriften zu Danke verpflichtet bin.

Nach Fertigstellung des Manuskriptes erschien die Arbeit Sander „Zur petrographisch-tektonischen Analyse“ Jahrb. d. Geol. Bundesanst. Wien 1823, 183. Eine eingehende Behandlung und Würdigung der darin enthaltenen Darstellungen hätte eine weitgehende Umstellung meiner Arbeit bedingt, weshalb hier davon abgesehen wurde. Ich begrüße aber diese Arbeit als willkommene und in manchen Punkten umfassendere Ergänzung der in diesem Buche enthaltenen Vorstellungen.

Nur mangelhafte Berücksichtigung konnte ferner das leider verspätet in meine Hand gelangte Buch Boeke-Eitel „Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie“, 2. Aufl., finden, ferner die nach Drucklegung erschienenen Arbeiten Schwinner „Scherung, der Zentralbegriff der Tektonik“, Zentralblatt f. Min. etc. 1924, 469, Koenigsberger „Das experimentelle und theoretische Studium des Faltungsvorganges in der Natur“, Naturwissenschaften 1924, 568, Becke „Fortschritte der Min. u. Petr.“ 24.

Manche Beziehungen unserer Bestrebungen werden sich auch zu den Methoden der „Granitmessung“ von Cloos und seiner Schule ergeben.

Dieses Buch ist in den Alpen entstanden; es ist möglich, daß seine Gesichtspunkte etwas zu sehr dieser Heimat angepaßt sind, daß andere Bereiche auch eine andere Betrachtungsweise ergeben hätten. Doch habe ich das Vertrauen, daß ich damit nicht fehlgegriffen habe, so daß eine Übertragung auf andere Gebiete nicht ein Umstürzen dieser Anschauungsweise, sondern nur eine Erweiterung und Abänderung erfordern wird und dies deshalb, weil die Alpen, insbesondere die Westalpen, ein Gebirge sind, von dem wir jetzt schon behaupten können, daß man die Hauptzüge seines Baues kennt.

Eine andere Wurzel hat dieses Buch in der Technik, insbesondere in der Technologie; ich muß hier dankend der Anregungen erwähnen, die mir in dieser Hinsicht die Stätte meines Schaffens bot. Es hat die Metallkunde, deren Stoffe ja denen der Geologie so außerordentlich gleichen, eine derartige Fülle von Erfahrungen gesammelt, begünstigt durch die Möglichkeit, einwandfreie Versuche zu machen, daß es nicht möglich ist, an diesem Schatze vorüberzugehen.

Ein Eindringen in ihre Vorstellungswelt wäre jedem Geologen, der diese Seite der Forschung pflegen will, dringend anzuraten.

Es wird in diesem Buche das Streben nach Analyse auffallen, die Erscheinungen in ihre Einzelvorgänge zu zerlegen. Es möge dies nicht als ein hochmütiges Herabsehen auf die üblichen Wege geologischen Schaffens gedeutet werden, das bildhaft arbeitet, ich weiß, daß viele ihrer Erkenntnisse nur durch Bilder gewonnen werden können. Dieses Streben nach Analyse entspringt wohl zum Teil aus persönlicher Neigung, zum Teile auch aus der Anschauung, daß für dieses Forschungsgebiet die Möglichkeit einer Zergliederung schon gegeben ist, und daß sie andererseits auch zur Vermeidung falscher Vorstellungen geboten erscheine. Es bleiben immer noch genug Wege übrig, auf denen die Geologie ihr schönes Recht, bildhaft zu denken, ausüben kann.

Es sind im ersten Teile der Arbeit zwei Sätze aufgestellt: der Satz der Einscharigkeit der Gleitung und der Satz der Gleitbretter. Es sind dies ausgesprochene Wahrscheinlichkeitssätze und müssen auch als solche aufgefaßt werden. Daher wird der tektonische Einzelfall immer Abweichungen von diesen Sätzen zeigen, ich hoffe aber, daß die durch sie bezeichneten Stellen ausgesprochene Häufungsstellen der Erscheinungen sind, so daß damit erkenntniswerte Regeln gegeben erscheinen.

Es haben die folgenden Betrachtungen immerhin zu einigen neuen Begriffen geführt, und es hätte sich sehr schöne Gelegenheit geboten, die schönsten griechisch-lateinischen Namen dafür aufzustellen. Ich habe dies grundsätzlich vermieden, einmal, weil mein Sprachgefühl in diesen Sprachen schon etwas verstaubt ist und nicht mehr hinreicht, Schöpfungen von so hohem Schwunge hervorzubringen, wie sie sonst in der Wissenschaft üblich sind, andererseits, weil ich meine Muttersprache immerhin für so reich halte, daß sie das, was man sich denken kann, auch benenne.

Ich erfülle gerne meine Dankespflicht an alle jene Förderer, die durch namhafte Spenden mir die Drucklegung meiner Arbeit ermöglichten, an das Erzhandelshaus Jakob Neurath Wien, an die „Montana“ Bergbau-Gesellschaft Wien und an die Gesellschaft von Freunden der Leobener Hochschule Leoben.

Ich danke Herrn Professor F. X. Schaffer, daß er meiner Arbeit durch die Aufnahme in die Denkschriften des Naturhistorischen Museums Wien die Möglichkeit der Drucklegung geboten hat.

Mein Dank gebührt ferner der Verlagsbuchhandlung F. Denticke Wien für ihre Bemühungen um Ausstattung und Verlag des Werkes.

Leoben, 5. Dezember 1923.

Mineralogisch-petrographisches Institut der mont. Hochschule

Dr. W Schmidt.

# Gesteinsumformung.

## Einleitung.

Zur Begrenzung der Aufgabe, die dieser Untersuchung gestellt sein soll, sei zunächst gesagt, daß sie dem Worte Umformung gemäß nur mit der Änderung des Formbestandes eines Gesteinskörpers im Laufe seiner geologischen Geschichte zu schaffen haben soll, Form allerdings in weitem Sinne genommen, nicht bloß die äußere Umgrenzung betreffend, sondern alles umfassend, was sich etwa an Gesteine geometrisch beschreiben, was sich etwa durch eine Strichzeichnung wiedergeben läßt. Es reicht also der Formbestand eines Gesteines bis herab zu den feinen Einzelheiten im Aufbaue, die wir als das Gefüge des Gesteines bezeichnen.

Nicht beabsichtigt ist dagegen ein Eingehen auf andere Veränderungen im Gesteinskörper oder wenigstens nur insoweit als sie auch die Form beeinflussen, insbesondere sollen hier nicht die Veränderungen des Phasenbestandes, des Mineralbestandes eingehend besprochen werden, obwohl diese Umwandlungen sehr häufig im Gefolge der Formänderungen auftreten.

Diese Einschränkung des Stoffes auf das rein Gestaltliche geschah deshalb, weil gerade hierin noch eine Reihe von Fragen der Erledigung harren, deren Bedeutung wenigstens gezeigt werden soll. Dagegen ist im Bereiche der Fragen des Phasenbestandes insbesondere seit den schönen Darlegungen von Becke und Grubenmann bis Eskola ein soweit zufriedenstellender Zustand geschaffen worden, daß hierin Neues zu bieten mir nicht möglich war.

Es ist die Aufgabe der Tektonik, das Werden der Formen unserer Gesteinswelt zu beschreiben. Es liefert die Feldaufnahme die Kenntnis einer Endform. Eine Ausgangsform läßt sich nach den Gesetzen der Geologie mit einiger Wahrscheinlichkeit erschließen. Welcher Weg wurde zurückgelegt, um aus der Ausgangsform die Endform zu bilden?

Diese Aufgabe nur aus den Umrissen der Körper zu lösen, ist nicht eindeutig möglich, ich kann ja auf unendlich vielen Wegen eine Form in die andere überführen.

Wohl liefert die Aufnahme noch mehr als eine Endform. In Schubflächen, Striemen, Reibungsgesteinen, bis in die feinsten Einzelheiten des Gefüges hinein sehen wir Aufzeichnungen des Bewegungsvorganges selbst, und je genauer wir diese sehen und deuten lernen, desto genauer wird das Bild, das wir von dem Werdegang der Form entwerfen, mit dem tatsächlichen Gange übereinstimmen.

Betrachtet man die Gedankengänge, die man beim Deuten solcher Spuren durchmißt, so sieht man, daß in ihnen deduktive Betrachtungen eine große Rolle spielen: Wie kann die Umformung eines Körpers unter gegebenen Verhältnissen vor sich gehen? Wie kann sie sich abbilden? Welche der dabei zu erwartenden Erscheinungen finden sich in der Natur wieder, so daß ich berechtigt wäre, auch für den geologischen Körper dieselben Umformungsbedingungen anzunehmen, wie bei der deduktiven Betrachtung.

So finden wir bei allen Forschern, die sich mit der Umgestaltung der Gesteine beschäftigen, das Hineinspielen deduktiver Überlegungen, ich nenne nur Heim, Becker, Leith, Van Hise, Becke, Grubenmann, Lachmann, Ampferer, Sander, Cloos usw.

Diese Arbeit hat nun die Absicht, diesen deduktiven Weg nach Möglichkeit umfassend darzustellen, zu versuchen, ob sich auf ihm allgemeine Richtlinien finden lassen, den Werdegang einer geologischen Form auf wahrscheinliche Art im Geiste nachzubilden.

Formänderung eines Körpers setzt verschiedene Bewegung seiner Teile voraus. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten wie Teile eines Körpers gegeneinander ihre Lage verändern können.

Die eine ist dadurch gekennzeichnet, daß gewisse Nachbarschaftsbeziehungen noch aufrechterhalten bleiben, die Ordnung der Massenpunkte wird nicht vollkommen umgestoßen, es haben immer gewisse Punktgruppen gleichartige Bewegungsform. Es ist dies die mechanische Umformung.

Bei der anderen Art der Umgestaltung sehen wir, daß einzelne Stoffpunkte sich aus dem bisherigen Verbände vollkommen loslösen können, für sich wandern, in andere Verbände sich wieder einfügen können, es ist dies die Umformung durch Molekülsatz, als dessen geläufigstes Beispiel der Lösungsumsatz gelten mag. Da ihr Verlauf durch die Gesetze der physikalischen Chemie beherrscht wird, möge sie kurz als chemische Umformung bezeichnet werden.

Als Ursachen einer Formänderung nehmen wir Kräfte an. Es ist klar, daß auch die Erforschung der Formänderung eines Gesteinskörpers sofort die Frage nach der Art der sie veranlassenden Kräfte gebiert, weiters die Frage, was diese manchmal so rätselhaft zu gewissen Zeiten der Erdgeschichte auftretenden Einflüsse veranlaßt. Es ist nicht die Absicht, der Untersuchung dieser letzteren Frage näherzutreten, also die Ursachen der Gebirgsbildung zu untersuchen; wir wollen also die Kräfte als gegeben betrachten und schauen, welchen Gesetzen die erfolgenden Verlagerungen im Gesteinskörper gehorchen. Als solche Ursachen der Formänderung der Gesteine kennt die Geologie eigentlich nur das, was wir mechanische Kräfte nennen, Kräfte, die an der Masse an sich ohne Rücksicht auf deren Stoff hängen. Sie sind diejenigen, die die mechanischen Umformungen verursachen. Es ist uns vollkommen klar, wenn wir eine Überschiebung, Faltung, Verwerfung etc. sehen, daß da etwas gewirkt haben muß, das unserer gewohnten Vorstellung von Kraft entspricht, für die wir die unmittelbare Anschauung in unserem Muskelgeföhle haben. In dem Abschnitte über die chemische Umformung wird Gelegenheit sein, zu zeigen, daß wir diesen Kräften gegenüber jene Einflüsse gewöhnlich vernachlässigen, die wir als chemische Kräfte bezeichnen können, wie osmotischen Druck etc., die nicht an der Masse hängen, sondern am Stoffe. Wir vernachlässigen sie wohl aus dem Grunde, weil wir für sie nicht diese unmittelbare Anschauung haben wie für die mechanischen Kräfte, wohl aber auch deshalb, weil ihre Wirkungen sich nicht in so scharfen Zügen erweisen wie die der mechanischen Kräfte, so daß ihre Einflüsse auf die Form, insbesondere die Großform vielleicht der Petrograph in einem übersichtlichen Gebiete nachweisen können, nicht aber der Geologe in einem Gebiete, das neben chemischer Umformung womöglich noch eine kräftige mechanische aufweist.

Da aber nun einmal die Sachlage so ist, daß dem Geologen die chemischen Kräfte kaum zugänglich sind, so soll der Stoff dieser Untersuchung noch enger begrenzt werden: Wie erfolgt die Umformung eines Gesteinskörpers durch mechanische Kräfte?

Aus den beiden Wegen der Umformung, dem mechanischen und dem chemischen, ergibt sich die Zerteilung des Untersuchungsstoffes in zwei Hauptabschnitte. (Auch die chemische Umformung muß besprochen werden, denn mechanische Kräfte können ja auch die chemische Umformung beeinflussen.)

Form soll alles in sich begreifen von der tektonischen Großform bis hinab zum mikroskopischen Gefüge. Dieselben Vorgänge können das eine wie das andere umbilden, so daß umgekehrt wieder aus dem Gefüge wichtige Anhaltspunkte für das Werden der Großform sich ergeben. Dies ist der Satz der Korrelation von Tektonik und Gefüge Sanders. Es wäre daher auch eine einheitliche Darstellung beider möglich. Daß hier aber durchwegs getrachtet wurde, die Umformung der Großform getrennt von der der Kleinform zu behandeln, kommt davon, daß die Untersuchungsweise beider eine verschiedene ist. Es wurde aber angestrebt, jeweils das Verbindende zwischen beiden zu zeigen.

## **Mechanische Umformung.**

Unsere Aufgabe ist es hier, den Umformungsvorgang, den irgendwelche äußere mechanische Kräfte in einem Gesteinskörper mechanisch hervorbringen, so genau zu beschreiben, daß wir womöglich alle seine Wirkungen, auch solche im kleinsten Bereiche, damit erfassen können.

Wir sehen mit jeder tektonischen Beschreibung eines Gebietes verknüpft mehr oder weniger eingehende Ausführungen über die Bewegungsvorgänge, meist verbunden mit Schlüssen über die Ursachen dieser Bewegungsvorgänge, nämlich über die Art der Kräfte, die hier gewirkt haben. Bei der geschilderten Unbestimmtheit der Aufgabe, die Bewegungsvorgänge zu beschreiben, ist es nun naheliegend, daß die Aussagen hierüber vielfach in sehr allgemeiner Form gehalten sind, ihren Eigenarten nur sehr von weitem nahekommen; trotzdem werden aber

die Schlüsse über die Kraftwirkungen mit einer sehr großen Bestimmtheit gezogen. Es geben solche Darlegungen über Bewegungsvorgang und Kraftwirkung vielfach ein recht unerquickliches Bild, ein Gemenge von in allgemeinsten Art gehaltenen Ausdrücken, bei welchen man oft nicht weiß, ist von Bewegungen die Rede oder von Kräften. Die Schlüsse, die daraus aber, insbesondere für die Kräfte, gezogen werden, stehen in ihrer Bestimmtheit in argem Gegensatz zu der vorgehenden Verschwommenheit.

Ich möchte hierfür ein Beispiel genauer behandeln, das in der tektonischen Beschreibung häufig wiederkehrt, nämlich das „Ausweichen“ „Es sei eine Gesteinsmasse in einer bestimmten Richtung ausgewichen“ In dieser Form wäre gegen diese Feststellung nicht viel einzuwenden, nur ist sie sehr allgemein gehalten, gibt kein Bild davon, was in der Masse dabei eigentlich vorgegangen ist. Die Aussage genügt vielleicht, um eine Großform beiläufig zu erklären, wird aber vollkommen versagen, wenn man die Wirkung dieses Vorganges auf das Gefüge des Gesteins untersuchen will.

Wenn es aber dann, wie es fast unvermeidlich geschieht, heißt: „Die Masse ist senkrecht auf die Richtung des größten Druckes ausgewichen, sie ist in der Richtung des geringsten Druckes auseinanderggegangen“, so ist dies eine zunächst unzulässige Schlußfolgerung aus einer unvollkommenen Feststellung über die Bewegung. So einfache Zusammenhänge, die hierzu zwischen Kraftwirkung und erfolgender Bewegung vorausgesetzt werden, sind nicht zulässig.

Es rührt die Unsicherheit in der Beurteilung dieser Frage, wie ein Körper unter dem Einflusse äußerer Kräfte seine Gestalt ändert, davon her, daß gerade hierüber noch nicht viele Untersuchungen gemacht worden sind. Die Technik, die ja in so vielen Fällen mit ganz ähnlichen Fragen zu tun hat, beim Schmieden, Walzen, Pressen und so weiter, ist auch noch nicht zu einer Darstellung gelangt, welche Vorgänge sich hierbei in einem allgemeinen Einzelfall abspielen, und kann nur einzelne auserwählte Sonderfälle beherrschen. Die Erforschung dieser ist allerdings schon recht weit gediehen.

Und einer dieser Sonderfälle scheint auch das Vorbild für das „Ausweichen“ in der Richtung des kleinsten Druckes gewesen zu sein, nämlich der Versuch, einen bildsamen Körper, Wachs, Blei, Eisen in einer Presse umzuformen. Dabei weicht wirklich das Probestück senkrecht zum größten Drucke aus, vergrößert seine Abmessungen in dieser Richtung, während es in der Richtung des Hauptdruckes dünner wird.

Jedoch ist dabei zu beachten, daß dies ein ausgesprochener Sonderfall ist, auf dessen Sonderheiten nämlich insbesondere Symmetrie des Vorganges, nicht bloß durch den Bau der Presse, sondern auch durch sehr große Mühewaltung bei der Durchführung des Versuches, genaue Herstellung der Probeform, genaue Einmittlung der Probe, peinlich geachtet wird. Ein solcher Versuch weist daher immer zwei oder unendlich viele Spiegelebenen durch die Richtung des Preßdruckes auf, je nachdem die Probe rechteckigen oder runden Querschnitt hat, dazu noch eine andere senkrecht auf den Preßdruck.

Nun ist die Übertragung dieser Erfahrungen von der Presse auf andere Verhältnisse dadurch sehr naheliegend, da es bekannt ist, daß die Beanspruchungen auf ein Körperelement bei irgendeiner Anordnung der äußeren Kräfte dargestellt werden können durch ein System von drei aufeinander senkrecht stehenden Hauptkräften von im allgemeinen verschiedener Größe. Dieser Beanspruchungszustand stimmt also in der Anordnung mit dem Versuche in der Presse weit überein, denn bei der Presse würde es am Ergebnis keine weitere Änderung machen wenn senkrecht auf den Hauptpreßdruck andere, aber geringere Drücke angeordnet würden, der Kuchen würde in der Richtung des geringeren Druckes auseinandergangen. Es könnte also der Sprung vom Großversuch auf das Differentiale des Körperelements gewagt werden, der Beanspruchungszustand an ihm als eine Art Mikropresse aufgefaßt werden. Das ließe dann auch für das Körperelement ein Auseinanderquellen in der Richtung des geringsten Druckes erwarten.

Betrachten wir aber die Vorgänge unter der Presse genauer, so sehen wir, daß dieser Sprung ins Kleine nicht zulässig ist. Der Vorgang des „Ausweichens“ erweist sich nämlich als Sammelvorgang von recht großer Verwickeltheit. Man betrachte nur dabei, daß die Probe beim Ausweichen Reibung sowohl an der oberen wie an der unteren Preßplatte zu überwinden hat. Der Preßdruck steht aber senkrecht auf diese Platten, hat keine Teilkraft in ihrer Ebene, kann daher in einem einheitlichen Vorgang, der die ganze Probe gleichartig ergriffe, die Reibung gar nicht überwinden. Die Antwort gibt die Untersuchung des Gefüges jeder so gepreßten Probe, insbesondere bei Metallstücken, Eisen oft sehr schön zu sehen. (Fig. 1.)

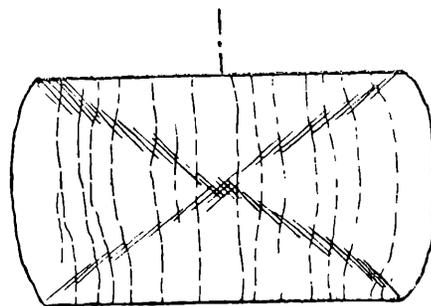


Fig. 1

Schneidet man eine solche gepreßte Probe in der Achse des Preßdruckes durch und ätzt die Schnittfläche, so sieht man von den Ecken des Querschnittes dunkle Bänder diagonal hereinziehen, sich in der Mitte durchkreuzend. In ihnen sind die Körner gestreckt, leichter anätzbar, ihr Zusammenhang ist vielfach gelockert. Es sind Spuren von Gleitflächenscharen, die auf diese Weise anschaulich gemacht sind. Das Ausweichen hat sich auf solche Weise vollzogen, daß vor den beiden Preßplatten zwei Kegel des Preßgutes sich in die Probe hineingedrängt haben, die seitlichen Teile hinaustreibend. Wollen wir also diesen Vorgang in der Presse auf eine Weise beschreiben, daß sie auch über den Einfluß auf die Kleintektonik — auf das Gefüge — Aufschluß gibt, so kommen wir mit dem „Ausweichen“ nicht mehr aus, müssen schon auf die Beschreibung dieser Schervorgänge eingehen.

Es lehrt der Versuch mit der Presse auch etwas anderes. Betrachten wir ein Körperelement in der Mitte der Probe, in der Achse des Preßdruckes. Es ist klar, daß sein Beanspruchungszustand ähnlich sein wird wie die Kraftanordnung in der Presse, die Hauptdruckbeanspruchung wird in der Preßachse liegen. Und wir sehen, wie sich in dem kleinen Körperelement ganz ähnliches abspielt wie in der ganzen Probe. Auch in ihm schneiden sich ja gleichwinklich mit der Hauptdruckspannung mindestens zwei Scherflächen. Für dieses Körperelement wäre also der Ersatz des Beanspruchungszustandes durch eine Mikropresse zulässig.

Gehen wir aber an einen anderen Punkt, zum Beispiel an eine Ecke des Querschnittes der Probe. Ein Körperteilchen hier wird auch einem Beanspruchungszustande unterliegen, der denselben Symmetriegesetzen gehorcht wie der frühere, wenn auch hier nicht mehr angenommen werden darf, daß sein Hauptdruck dem Drucke der Presse gleichgerichtet ist. Jedenfalls könnten wir auch hier versuchen, den Beanspruchungszustand als „Mikropresse“ aufzufassen und würden erwarten, auch hier die zwei Scharen von sich kreuzenden Scherflächen zu finden, die wir beim großen Preßversuch erkannt haben.

Wir sehen aber etwas ganz anderes. Tatsächlich geht durch das Körperelement nur eine Richtung Scherflächen durch. Die andere im Schnitte der Probe sichtbare Schar trifft ja gar nicht in unsere Ecke hinein. Man sieht daraus, daß der Sprung um eine Größenordnung, den wir gemacht haben, von den Vorgängen unter der Presse zu den Vorgängen am Körperelement nicht statthaft ist. Zugleich erhält man eine sehr beherzigenswerte Erfahrung, daß es nicht möglich ist, bei der Kenntnis des Beanspruchungszustandes eines Körperelements allein zu erschließen, was an diesem vor sich gehen wird.

Die beiden in Betracht gezogenen Körperelemente waren sich sicher im Beanspruchungszustande sehr ähnlich, was aber an beiden Stellen vor sich ging, ist herzlich unähnlich. Dies warnt aber auch davor, umgekehrt aus dem Bewegungsvorgang eifertig Schlüsse auf die Art der Beanspruchung an dieser Stelle zu ziehen.

So erweist sich der Vorgang des Ausweichens unter einer Presse als ein sehr verwickelter, der zur genauen Erfassung ein Eingehen in die Einzelheiten verlangt. Er zeigt, daß ein Ausweichen in dem Sinne, wie es in der Geologie angewendet wird, das Auseinanderfließen senkrecht zur Richtung des größten Druckes, vorkommt, aber nur dadurch, daß sich von selbst eine „Maschine“ von treibenden Keilen ausbildet, was aber nur unter gewissen Symmetriebedingungen möglich ist. Daneben zeigt aber die Technologie genugsam Beispiele anderer Umformungen, bei denen von einem Ausweichen nicht gesprochen werden kann. Man denke nur an den Verdrehungsversuch, den Vorgang, wenn eine Rundstange bleibend verdreht wird. Auch hier steht ein Teilchen unter einem symmetrischen Beanspruchungszustande. In der Tangentialebene an dem Mantel des Rundstabes liegen 45 Grad mit der Erzeugenden einschließend eine Druck- und eine gleichgroße Zugkraft senkrecht aufeinander. Das Ergebnis ist aber nicht ein „Ausweichen“ in der Richtung der Hauptzugkraft, sondern eine Scherbewegung in der auf die Stabachse senkrechten Ebene, es verdrehen sich die durch solche Ebenen getrennten Scheiben des Stabes gegeneinander. Man kann fast sagen: Je allgemeiner, je zufälliger die Art des Kraftangriffes ist, desto weniger trifft für den Vorgang die Beschreibung mit dem Ausweichen in der Richtung der geringsten Druckkraft zu. Es hat sich die Tektonik in dem Ausdrucke Ausweichung eines unangenehmen Sonderfalles bedient, daher kann man fast annehmen, daß in allen Fällen, wo er angewendet wird, das damit erzeugte Bild den Tatsachen nicht entspricht.

Ich habe absichtlich das Beispiel der Ausweichung eingehender behandelt, weil es tatsächlich der häufigste Fall unzulänglicher mechanischer Beschreibung ist. Es sei nicht verschwiegen, daß es neben solchen unklaren Darstellungen zahlreiche Beispiele schön zutreffender und auch für die Erklärung der Kleinformen ausreichender Beschreibungen gibt, so, wenn die Umformungen in einer Schubdecke als Gleitvorgänge beschrieben werden. Es ist nur zu bedauern, daß vielfach nebeneinander Ausdrücke genauer Darstellung neben so beiläufigen gebraucht werden, so daß ein umfassendes Bild eigentlich nur selten erreicht wird.

Unsere Aufgabe wird für das Folgende sein, die Vorgänge der mechanischen Umformung von ihren Einheiten ausgehend zu untersuchen. Zunächst ist es notwendig, in die Grundbegriffe der Umformungsmöglichkeiten einzugehen.

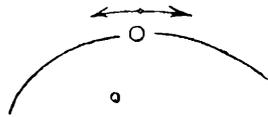
Hätten wir ein System, bestehend nur aus zwei Punkten, zwischen denen Kräfte irgendwelcher Art wirken, Fig. 2 a, so kommen als Formänderungen dieses Körpers nur Vergrößerung oder Verkleinerungen des Punkt-Abstandes in Betracht. Wir können z. B. nach den von festen Körpern gewonnenen Erfahrungen annehmen, daß mit zunehmender Entfernung beider Punkte elastische Kräfte zwischen ihnen auftreten, die diesem Zunehmen entgegenwirken; dann müssen wir von außen her „Zugkräfte“ an die beiden Punkte anbringen, um den erhöhten Abstand aufrechtzuerhalten. Umgekehrt für Annäherung beider Punkte aneinander.

Bei nur zwei Massenpunkten ist die Formänderung also sowohl dem Bewegungsvorgang als auch der daraus erfolgenden Kraftwirkung nach leicht zu beherrschen.

Anders, wenn viele Massenpunkte zu einem System zusammentreten.

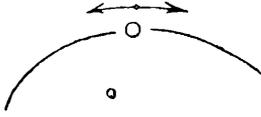
Betrachten wir den Fall, daß ein einzelnes Molekül einer Gruppe unter sich starr verbundener Punkte gegenübersteht. Fig. 2 b. Jencs kann gegen diese schon in mannigfaltiger Weise verlagert werden. Es sind einmal sehr viele Verlagerungsrichtungen möglich, die eine Vergrößerung aller Abstände des Massenpunktes von allen anderen Punkten zur Folge haben, oder doch in der überwiegenden Zahl, wo ich also am Punkt und der Gruppe je Zugkräfte von außen anbringen muß, um diese Vergrößerung aufrechtzuerhalten. Umgekehrt gibt es auch viele Verlagerungen, die Verkürzung aller oder der meisten Abstände erzielen, die also Druckkräfte von außen erfordern.

Daneben gibt es auch Bewegungsformen des Punktes, bei denen genau ebenso viele Abstände



a.

Fig. 2 a



b.

Fig. 2 b

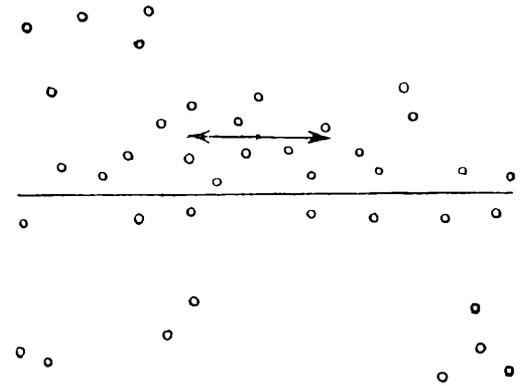


Fig. 2 c

verlängert wie verkürzt werden, wenn nämlich unser Punkt gleichlaufend mit der Grenzfläche unserer Gruppe verlagert wird. Diese Bewegungsform ist also vor den anderen ausgezeichnet.

Es wird diese Sonderstellung noch klarer, wenn wir nicht einen einzelnen Punkt einer Gruppe, sondern zwei Gruppen einander gegenüberstellen, wenn wir z. B. eine einheitliche Gruppe durch eine Fläche in zwei Teile geschieden denken. Fig. 2 c. Wieder haben wir unter allen möglichen Verschiebungen beider Teile gegeneinander solche, bei denen alle Punkte der einen Seite ihre Abstände gegen alle Punkte der anderen Seite vergrößern, dann wieder andere Verschiebungen, bei denen sich alle Abstände verkleinern, sie benötigen dann je nachdem von außen angreifende Zug- oder Druckkräfte zur Aufrechterhaltung des Zustandes. Daneben gibt es aber eine ausgezeichnete Art der Verschiebung beider Teile gegeneinander: wenn nämlich die Trennfläche beider Gruppen eine entsprechende Form hat, wenn sie eine Ebene, Regelfläche oder Rotationsfläche ist, so kann ein Gleiten beider Teile aufeinander eintreten, wobei jeweils genau die Hälfte der Abstände je eines Punktes der einen Seite von allen Punkten der Gegenseite eine Verlängerung, die andere Hälfte eine Verkürzung erleidet.

Nun unterscheiden sich diese Arten der Verlagerung sehr bezeichnend in ihren Auswirkungen, soweit sie bleibende Verlagerungen hervorrufen.

Ist die gegenseitige Verschiebung ein Auseinanderweichen senkrecht auf die Fläche, die die beiden Gruppen verschiedenen Bewegungszustandes trennt, so haben wir schon besprochen, daß Spannungen auftreten, die der Vergrößerung der Abstände entgegenwirken. Nun ist es eine eigenartige Erscheinung, daß diese Spannungen nicht ins Unendliche wachsen können. Bei einem gewissen Abstände geraten die Punkte der Gegenseiten aus ihrem Einflußbereich, die Spannungen sinken auf Null. Der Körper ist in zwei Teile zerfallen, er ist „zerrissen“. Dieser Zerreißvorgang hat bei Smekal, Naturwissenschaften 22, eine energetische Darstellung erfahren. Bei der Anspannung der Verbindungen durch das Auseinanderweichen wird eine derartige Menge Energie aufgehäuft, daß von einer gewissen Entfernung an die Ausbildung zweier neuer Oberflächen, nämlich der Trennflächen an beiden Teilen, eine geringere Anforderung an potentieller Energie darstellt.

Ist die Relativverschiebung eine Annäherung beider Teile aneinander, so kann nach unserer Erfahrung eine bleibende Formänderung überhaupt nicht eintreten. Auch hier entstehen Kräfte im Körper, die der Verschiebung

entgegenarbeiten, aber diese Kräfte können beliebig wachsen, können sich mit beliebig großen Außendrucken ins Gleichgewicht setzen.

Absichtlich ist hier von den Bewegungsvorgängen ausgegangen worden, nicht von den sie bewirkenden Kräften. Es ist ja ersichtlich, daß der erste Fall, der des Zerreißen, nur dadurch verwirklicht werden kann, daß ich von außen her Zugkräfte anbringe. Aber nicht immer, wenn „Zugkräfte“ wirken, zerlegt sich der Körper durch eine Fläche so in zwei Teile, daß ihre gegenseitige Verschiebung gerade senkrecht auf die Trennfläche steht. Geradeso gilt dies für die „Druckkräfte“, auch hier steht die Fläche, die die Teile verschiedenen Bewegungszustandes trennt, nicht unbedingt senkrecht auf die Verschiebungsrichtung, wir werden im Gegenteile sehen, daß die Regel eine ganz andere ist. Nur in einem Falle kann ich bei Anwendung von Druckkräften von außen restlose Annäherung aller Punkte aneinander erzielen, wenn nämlich der Druck von außen von allen Seiten gleich wirkt. Dann sehen wir aber auch, daß eine solche Druckwirkung keine bleibende Formänderung erzielen kann; es ist noch nie erfahren worden, daß ein Körper, der einem noch so hohen allseitigen Druck ausgesetzt war, eine Erhöhung seines spezifischen Gewichtes dauernd erhalten hätte, was ja unumgänglich wäre, wenn er sein Volumen dauernd verringert hätte.

Für den dritten Fall, daß die Verschiebung gleichlaufend mit der Grenzfläche vor sich gehe, liegen die Verhältnisse so, daß ein Teil der Punktabstände vergrößert, ein anderer Teil verkleinert wird. Auch hier wird es eintreten, daß ein Abreißen einzelner Bindungen erfolgen wird, wenn ihre Punktabstände zu groß werden, aber dieses Abreißen kann nie für alle Punktbeziehungen gleichzeitig eintreten. Dafür, daß ein Punkt aus dem Einflußbereiche eines anderen der Gegenseite austritt, tritt er in die eines neuen wieder ein.

Es ist diese Art der Formänderung, die Gleitung oder Scherung daher eine, die bleibende Ergebnisse hervorrufen kann, ohne daß der Zusammenhang des Körpers unterbrochen wird.

Weitere Arten der Formänderung sind nicht möglich. Denn wenn die gegenseitige Bewegung beider Teile des Körpers unter einem Winkel gegen die Trennfläche erfolgen sollte, kann sie immer in zwei Teile zerlegt werden, einen gleichlaufend und einen winkelrecht zur Trennfläche, wodurch diese Fälle auf die einfachen früheren zurückgeführt sind.

Es lassen sich also die bleibenden mechanischen Formänderungen auf zwei einfache Vorgänge zurückführen, auf das Zerreißen und auf den Gleitvorgang oder die Scherung, ersteres mit Trennung, letzteres mit Aufrechterhaltung des Zusammenhanges.

Es sind dies die einfachsten Glieder, in die wir eine Formveränderung auflösen können, daher ist es bei der Beschreibung einer solchen unerlässlich, auf diese einfachsten Einheiten herabzugehen.

Nun ist es wünschenswert, aus dieser vorläufig reinen Bewegungsbetrachtung zur Untersuchung der Wirkung der Kräfte in bezug auf die Erzeugung dieser beiden Arten Formänderung überzugehen, die Gesetze der Kraftwirkung im Körper zu untersuchen.

Auf einen Körper wirken von außen her auf seine verschiedenen Punkte Kräfte ein; nehmen wir an, daß sie sich das Gleichgewicht halten. Dies kann nur dadurch bewirkt werden, daß auch zwischen den Punkten des Körpers Kräfte, Spannungen herrschen, die diesen Ausgleich bewirken. Betrachten wir eine Punktgruppe im Inneren des Körpers, ein Körperelement. Als Anteil der Beanspruchung des ganzen Körpers werden auch von den Nachbarpunkten Kräfte in allgemeiner Anordnung auf die Punkte unserer Gruppe ausgeübt werden, welchen wieder durch Kräfte zwischen den Punkten selbst das Gleichgewicht gehalten werden muß.

Wir nennen die Art, wie auf ein Körperelement von der Umgebung Kräfte ausgeübt werden, dessen Beanspruchungszustand. Wollen wir das Wirken dieser an der Punktgruppe von außen her angreifenden Kräfte, und zwar gerade auf ihre Eignung hin untersuchen, Formänderung der einen oder der anderen Art zu erzeugen, so können wir dies am besten dadurch besorgen, daß wir solche „Trennflächen“ wie früher in beliebiger Lage durch die Punktgruppe gelegt denken und jeweils untersuchen, welcher Anteil der an beiden Teilen angreifenden äußeren Kräfte die Teile winkelrecht zur Fläche zu verschieben sucht, welcher andere Anteil hingegen auf ein gegenseitiges Gleiten beider Teile entlang der Fläche hinarbeitet. Und wenn wir das für alle möglichen Flächenlagen durchgeführt haben, so ist die Beschreibung der Kraftwirkung auf das Körperelement so vollkommen als möglich. Wir bekommen also für jede gedachte Trennfläche eine Kraft, die die Annäherung oder Entfernung beider Teile bewirken will, die sogenannte Normalbeanspruchung, die je nachdem Zug- oder Druckbeanspruchung sein kann, und eine andere, die die beiden Teile in einer bestimmten Richtung in dieser Fläche zu verschieben sucht, die Scherbeanspruchung. Natürlich müssen jetzt, wenn Gleichgewicht herrschen

soll, über die Trennfläche hinweg innere Kräfte zwischen den beiden Teilen wirken, die den Anteilen der äußeren Kräfte das Gleichgewicht halten, also ganz entsprechend Normalspannungen und Scherspannungen. Kann das Element diese Spannungen nicht aufreiben, weil die Beanspruchungen zu hoch sind, so ist zunächst ein Gleichgewicht nicht möglich\*).

Nun zeigt sich aber, daß es nicht notwendig ist, die Untersuchung auf alle möglichen Flächenlagen auszudehnen. Es läßt sich nachweisen: Wenn für drei verschiedene Flächenlagen Normalbeanspruchung und Scherbeanspruchung der Größe und Richtung nach gegeben sind, dann läßt sich für eine beliebige andere Flächenlage Normal- und Scherbeanspruchung rechnerisch ermitteln. Es läßt sich also gedanklich die sehr verwickelte Anordnung der Kräfte, die von der Umgebung auf unser Element ausgeübt werden, vollkommen ersetzen durch die Angabe der drei Scherbeanspruchungen in drei verschiedenen Ebenen und durch die Angabe der drei Normalbeanspruchungen auf ebendiesellen Ebenen.

Ferner läßt sich nachweisen, daß für jede Ebenenlage die äußeren Kräfte sowohl eine Scher- wie eine Normalbeanspruchung ausüben; nur drei Ebenen haben eine Sonderstellung; für sie gibt es keine Scherbeanspruchung, es wirken nur Normalkräfte, die die beiden Teile senkrecht zur Fläche zu verschieben suchen. Die drei Ebenen heißen die Hauptebenen des Beanspruchungszustandes, die drei zugehörigen Normalkräfte sind die Hauptbeanspruchungen. Hauptebenen und Hauptbeanspruchungen stehen je winkelnrecht zueinander, der Schnitt zweier Hauptebenen ist jeweils auch die Richtung der der dritten Ebene zugehörigen Hauptbeanspruchung. Fig. 3. Wir können nach dem vorigen auch diese drei Hauptbeanspruchungen als Gedankenersatz für die am Element außen angreifenden Kräfte verwenden, ich kann, wenn diese mir gegeben sind, für jede andere Ebene Normal- und Scherbeanspruchung nach Größe und Richtung ermitteln.

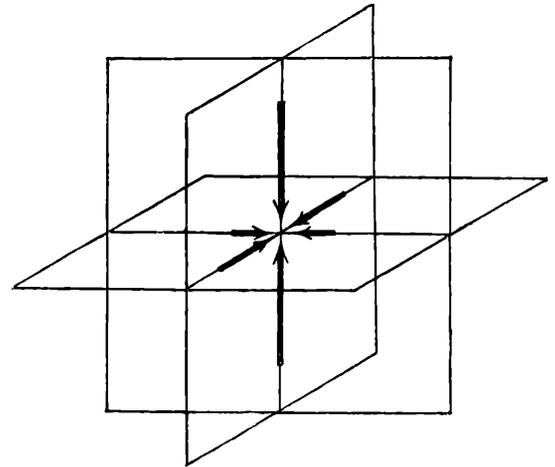


Fig. 3

Dadurch, daß diese drei Hauptbeanspruchungen senkrecht aufeinander stehen, erhält der Beanspruchungszustand Spiegeleigenschaften, trotzdem die außen angreifenden Kräfte allgemeinst angeordnet sein werden. Jede der Hauptebenen wird zu einer Spiegelebene. Man kann sagen, der Beanspruchungszustand am Körperelement hat rhombische Symmetrie.

Die Größe und Lage der Hauptbeanspruchungen hängt von den äußeren Verhältnissen ab. Von den dreien sind dabei zwei die „äußersten“ Normalkräfte, die es in dem Körperelemente überhaupt gibt, also größte und kleinste Druckkraft, oder größte und kleinste Zugkraft oder größte Druckkraft und größte Zugkraft. Die dritte Hauptbeanspruchung hat einen dazwischenliegenden Wert. (Ein ausgezeichnete Fall ist der, daß alle drei Hauptbeanspruchungen gleichen Wert haben. Dann hat keine Ebene durch das Körperelement eine Scherbeanspruchung, nur wieder Normalbeanspruchungen von gleicher Größe wie die Hauptkräfte. Es ist also die Richtung der Hauptbeanspruchungen in diesem Falle unbestimmt; dies ist der allseitige oder hydrostatische Beanspruchungszustand.)

Von den übrigen Ebenen, für welche wir uns Scher- und Normalbeanspruchung aus den Hauptbeanspruchungen errechnen können, ist wieder ein Bündel ausgezeichnet, nämlich das, das senkrecht auf die Hauptebene steht, die durch die größte und kleinste Hauptkrafttrichtung geht. Diese Ebenen haben die größten Scherbeanspruchungen unter allen, die unter gleichen Winkeln zu einer Hauptkraft stehen, unter ihnen findet sich auch die Ebene, die die größte Scherbeanspruchung überhaupt in dem Körperelement aufweist, sie ist unter 45 Grad zu den Richtungen der beiden äußersten Hauptspannungen geneigt. Fig. 4.

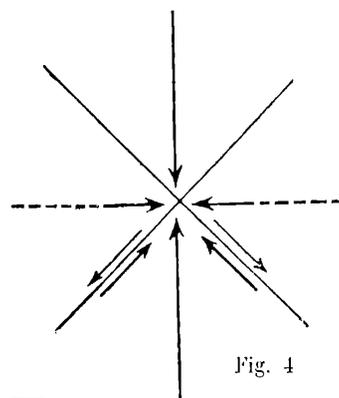


Fig. 4

\*) Es wird als eigenartig erscheinen, daß bei Betrachtungen über Gebirgsbildung vom Gleichgewichtszustande ausgegangen wird. Doch ist zu beachten, daß Gleichgewicht nicht gleichbedeutend ist mit Ruhe. Auch eine gleichförmig sich abspielende Umformung verläuft im Gleichgewicht. Mit Ungleichgewicht ist stets eine Beschleunigung oder Verzögerung verbunden. Nun spielen sich aber unserer Erfahrung nach Gesteinsumformungen mit so geringer Geschwindigkeit ab, daß in ihnen für bedeutende Geschwindigkeitsänderungen gar kein Raum ist. Wir sind daher berechtigt, für alle diese Vorgänge weitgehende Annäherung an den Gleichgewichtszustand vorauszusetzen.

Wegen der Symmetrie des Zustandes gibt es natürlich zwei solcher Flächen, sie stehen zueinander unter 90 Grad, ihr Winkel wird durch die beiden äußersten Hauptbeanspruchungen halbiert. Die Größe dieser größten Scherkräfte hängt von dem Unterschiede der beiden äußersten Hauptkräfte ab, ihre Richtung liegt schon aus Symmetriegründen in dem Schnitte der Ebene mit der Hauptebene durch die äußersten Hauptkräfte. Dabei ist aber die Normalbeanspruchung senkrecht auf diese Ebenen der größten Scherbeanspruchung nicht gleich Null, sondern hat einen endlichen Wert.

Im allgemeinen kann man über die anderen Flächenlagen aussagen, daß die in ihnen wirkenden Scherkräfte umso geringer sind, je näher ihre Lage sich der Lage einer Hauptebene anschließt, also auch je genauer sie normal auf eine Hauptbeanspruchung stehen.

Diese allgemeinen Angaben über den Beanspruchungszustand an einem Körperelement mögen uns genügen. Für den Weg des Beweises und für die Größermittlung sei auf die Werke der technischen Mechanik, z. B. Föppl, „Vorlesungen über techn. Mechanik“, verwiesen.

Ausdrücklich sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß wir in dieser Betrachtung einen Unterschied gemacht haben zwischen Beanspruchungen und Spannungen. Die Beanspruchungen sind die von dem Körperelement vollkommen unabhängigen, von außen her einwirkenden Kräfte, die irgendwie übertragen werden, die ein Verschieben der Teile des Körperelementes gegeneinander bewirken wollen. Als Spannungen haben wir aber die Kräfte bezeichnet, die das Körperelement selbst aufbringen muß, die über die Teilungsfläche hinwegwirken, die das Verschieben verhindern wollen. Soll Gleichgewicht herrschen, so müssen Spannungen und Beanspruchungen jeweils gleich groß aber entgegengesetzt sein. Es ist aber die Frage immer die, ob das Element die Spannung auch aufbringt. Die Spannungen sind also von dem Stoffbestand des Elementes abhängig.

So läßt sich die Kraftwirkung am Körperelement eigentlich überraschend einfach darstellen. Es wäre jetzt auch notwendig, daß wir das für den ganzen Körper durchführen könnten, daß wir für jeden seiner Punkte den Beanspruchungszustand angeben könnten.

Ich möchte für diese Beschreibung der Kraftwirkung im ganzen Körper im Gegensatz zum Begriff Beanspruchungszustand am Element den Namen Beanspruchungsplan\*) verwenden. Wünschenswert wäre es also, daß aus der Angabe der einwirkenden äußeren Kräfte der Beanspruchungsplan ermittelt werden könnte.

Versucht man aber, dies durchzuführen, so kommt man sofort zur Erkenntnis, daß die durch die Angabe der äußeren Kräfte gegebenen Grundlagen nicht genügen, um die für die Bestimmung des Beanspruchungsplanes notwendigen Gleichungen zu liefern. Die Aufgabe ist als unterbestimmt nicht lösbar.

Versuchen wir nämlich einmal sie zu lösen. Wir können einem beanspruchten Körper z. B. durch einen Schnitt in zwei Teile zerlegen und den einen dieser Teile untersuchen. An ihm greifen an: die äußeren Kräfte die auf diesen Teil wirken, und an der Schnittfläche die Spannungen, die in allen durch den Schnitt getroffenen Körperelementen wirken. Es liefert die Gleichgewichtsbedingung den Satz, die Summe aller Kraftwirkungen muß Null sein, daher die Summe aller Spannungen an der Schnittfläche gleich und entgegengesetzt der Summe aller äußeren Kräfte an diesem Teile des Körpers. (Summe hier immer als geometrische Summe verstanden.) Die Summe aller Spannungen an der Schnittfläche ist also bestimmbar, wie sich diese Summe aber auf die einzelnen Flächenelemente verteilt, auf die Querschnitte der einzelnen Körperelemente, ist aus diesen Angaben nicht entnehmbar.

Zur Bestimmung wären weitere Gleichungen notwendig, die aussagen, was in dem Körper selbst schon vor sich gegangen ist, die also Angaben über dem Stoff angehörige Eigenschaften geben. Es können zwei genau gleiche Körper aus verschiedenen Stoffen, die gleich von äußeren Kräften beansprucht werden, durchaus verschiedene Beanspruchungspläne haben.

Diese Unterbestimmtheit der Aufgabe ist natürlich für die Technik sehr unangenehm. Es wäre ja für die Konstruktionen von größter Wichtigkeit zu wissen, wie groß an jedem Punkte die Beanspruchungen sind. Die Aufgabe wird dadurch zur Lösung gebracht, daß auf Grund naheliegender Annahmen, die darüber aussagen, was in dem Körper vor sich geht, die Anzahl der Bestimmungsgleichungen vermehrt wird. So z. B., daß die Spannungen geradeso wie die Entfernungsänderungen der Punkte zunehmen (Elastizitätsgesetz), daß bei einer Zugbeanspruchung die Spannungen gleichmäßig über die Querschnittsfläche verteilt sind, daß bei Biegungen die Querschnitte senkrecht zur Stabachse eben bleiben usw. Man sieht aber, daß diese Hilfsannahmen jeweils nur Näherungen sein werden, daher sind auch die auf ihnen aufgebauten Beanspruchungspläne immer

\*) Seine Darstellung findet er, soweit es die Richtungen der Hauptbeanspruchungen anbelangt, in den Trajektorien.

nur als Näherungen aufzufassen. Vor allem sehen wir, daß die Fälle, in welchen solche Pläne aufgestellt werden können, insbesondere die erste Hilfsannahme, das Elastizitätsgesetz, benötigen. Damit ist aber auch schon gesagt, daß man in allen Fällen, wo man diesen Satz nicht anwenden kann, also gerade da, wo es sich um bleibende Veränderungen handelt, wie in Technologie und Tektonik, kaum Aussicht hat, die Beanspruchungspläne wirklich aufzustellen. Immerhin kann aber die Ermittlung nach dem Elastizitätsgesetz wenigstens für die allgemeinen Züge vielfach einen Anhaltspunkt geben, da ja bei dem allmählichen Ansteigen der äußeren Kräfte zunächst die Beanspruchung noch eine elastische ist und erst später in einen Zustand kommt, in dem das Elastizitätsgesetz nicht mehr gilt. Für Beanspruchungen, die nicht viel über der Elastizitätsgrenze liegen, wird man daher annehmen können, daß im Beanspruchungsplan noch wesentliche Züge aus dem elastischen Plan erhalten sind, die um so deutlicher werden, je näher die Kräfte an der Elastizitätsgrenze liegen.

Im allgemeinen werden wir für geologische Verhältnisse nicht mehr als die allgemeinsten Angaben über Beanspruchungspläne machen dürfen.

Eine wichtige Erkenntnis aber geht aus der Unzulänglichkeit der Angaben der äußeren Kräfte hervor. Der Beanspruchungsplan des Körpers kann sich ändern, ohne daß sich in den äußeren Kräften etwas zu ändern braucht; er kann sich ändern dadurch, daß im Körper etwas vorgeht. Nehmen wir an, es sei an einer Stelle eine Scherbeanspruchung zu groß geworden, das Element könne die entsprechende Gegenspannung nicht mehr aufbringen. Was geschieht? Wäre das Element allein, so würde es eine weitreichende Formänderung erfahren. Nun ist es aber rings umlagert von anderen Teilchen; dadurch, daß in dem ersten eine zunächst geringe Verschiebung eintritt, wird der Beanspruchungszustand in den anderen in einer Weise abgeändert, daß sie mehr von der Beanspruchung auf sich nehmen müssen. Können sie das, so hat die Verschiebung sofort ein Ende, das erste Element ist dadurch gerade bis zur Grenze seiner Festigkeit entlastet. Der Beanspruchungsplan regelt sich also nach Größe und Richtung so, daß in keinem Teilchen eine Beanspruchung auftritt, die größer ist als die Spannungen, die das Teilchen entgegensetzen kann (wobei daneben immer noch den Bedingungen des Gleichgewichtes der äußeren Kräfte genügt werden muß). Erst wenn an einer den Körper ganz durchsetzenden Fläche kein Teilchen mehr eine höhere Belastung verträgt, kann eine Umformung in höherem Ausmaße eintreten. Wir werden im folgenden diese „Einregelung“ des Beanspruchungsplanes häufig in Betracht zu ziehen haben.

Es hängt also der Beanspruchungsplan und dann auch die Art der dauernden Formänderung im wesentlichen von der Fähigkeit des Körpers ab, Spannungen, das sind Widerstände gegen die Verschiebung seiner Teile gegeneinander aufzubringen.

Gegen Annäherung seiner Teile gegeneinander kann er, wie schon gezeigt, Widerstände von beliebiger Höhe aufbringen, auch gegen Entfernung in wachsendem Maße, so daß bei Aufhören der Beanspruchung die Formänderung vollkommen wieder zurückgeht. Wir sahen aber das Bestehen einer Grenze, über die Zugspannungen nicht mehr wachsen können.

Wie ist es nun bei Scherspannungen? Auch für sie können wir für kleine Verschiebungen zunächst ein elastisches Verhalten annehmen. Bei der Verschiebung werden ja Verbindungen zwischen zwei Punkten beiderseits der Gleitfläche verlängert, nämlich solche, die nach hinten in bezug auf die Verschiebungsrichtung ziehen, andere verkürzt, nämlich solche, die nach vorne zielen. So wird der gleitende Teil nach hinten zurückgehalten, und erleidet Druck von vorne, also im ganzen einen Widerstand gegen die Bewegung. Und solange noch dieselben Verbindungen bestehen wie vor Eintritt der Beanspruchung, wird diese Formänderung eine vollkommen elastische sein. Geht aber die Formänderung zu weit, so werden rückliegende Verbindungen zerreißen, weil zu weit ausgespannt. Von diesem Augenblick aber ist ein Rückkehren in den Ausgangszustand nach Beendigung der Beanspruchung nicht mehr zu erwarten. Es ist bleibende Formänderung vorhanden. Daraus darf aber nicht geschlossen werden, daß von nun an kein Widerstand gegen weitere Verschiebung mehr vorhanden ist; der betrachtete Massenpunkt hängt ja nicht bloß an den jetzt zerrissenen Verbindungen, sondern an noch vielen anderen, hat ja als Ersatz für die verlorenen durch die Verschiebung von vorne her wieder neue Beziehungen geknüpft. Die Geschichte fängt eben jetzt wieder von neuem an.

Dieser Widerstand gegen das Verschieben nimmt bei größeren Bewegungen die Züge einer Reibung an, wird als innere Reibung bezeichnet.

So wichtig die Kenntnisse dieser Reibung wären, sind wir doch trotz der schönen Bemühungen der Technik noch nicht dazu gelangt, ihre Gesetze in einer Weise zu beherrschen, daß sie auch für die Tektonik Verwendung finden könnten. Wir sehen hier die verschiedenartigsten Abhängigkeiten: von Stoff, Temperatur, Normaldruck auf die Gleitfläche, Geschwindigkeit der Verschiebung. Wir sehen Fälle, wo der Widerstand gegen Verschiebung

abnimmt, wenn sie so weit gegangen ist, daß sie nicht mehr elastisch ist, andere wieder, wo sie mit dem zuruckgelegten Wege zunimmt. Wichtig ist insbesondere die Frage, ob es beim Gleiten uberhaupt eine Elastizitätsgrenze gibt, wie wir vorhin der Einfachheit halber angenommen haben, ob nicht eine jede Gleitung zu einem gewissen Teile eine plastische ist. Denn man beachte, daß unter den vielen Bindungen, die ein Punkt mit denen der Gegenseite besitzt, immer einige sein werden, die schon an und fur sich an der Grenze der Bestndfahigkeit sind, durch die kleinste Verschiebung schon uberanstrengt, wenn nicht sofort, so doch im Laufe der Zeit unter dem Zerren der Wärmebewegung zugrunde gehen. Das wurde heißen, daß die kleinste Scherbeanspruchung schon dauernde Verschiebungen erzielen kann, aber mit sehr geringer Verschiebungsgeschwindigkeit, oder, daß die innere Reibung fur die Geschwindigkeit Null gleich Null ist (Nullreibung). Es muß die Möglichkeit, daß insbesondere im Hinblick auf die geologischen Zeiträume es uberhaupt keine Elastizitätsgrenze fur Scherbeanspruchung gibt, wohl im Auge behalten werden. Die Versuche an Metallen besonders bei hoheren Temperaturen, siehe Ludwik, „Elemente der technologischen Mechanik“, haben gezeigt, daß fur langsame Formänderungen die Elastizitätsgrenze wirklich uberraschend tief liegt.

Jedenfalls sind diese Untersuchungen noch nicht so weit gediehen, daß es sich ermöglichen ließe, darauf aufzubauen. Es wird also gut sein, fur die Tektonik nicht eine einzelne dieser Anschauungen zugrunde zu legen, sondern alle Möglichkeiten zu berücksichtigen, zumal die Ergebnisse der an und fur sich sehr schonen Experimente von Adams, Karman, Tammann, Ludwik und vieler anderer immer dem Einwurf ausgesetzt sind, daß in ihnen die geologischen Verhältnisse nicht berücksichtigt sind.

Wie man sieht, hangt der Widerstand gegen Gleiten nur mittelbar mit dem gegen Annäherung und Entfernung zusammen. Bei den verschiedenen Körpern konnen daher die verschiedensten Verhältnisse dieser Werte vorkommen. Davon hangt z. B. ab, was geschieht, wenn an einem Körper Zugkräfte wirken. Er kann zerreißen, wenn an einer Fläche der Widerstand gegen Entfernung uberschritten wird. Er kann aber seine Form auch durch Gleiten verändern, wenn zuerst an einer andersliegenden Fläche der Widerstand gegen das Gleiten uberwunden wird. Es ist unzulässig, die Ergebnisse in der Zerreißmaschine unbesehen als die uns angehende Zerreißfestigkeit anzusehen, denn wir sehen in der Regel bei Metallen, daß dem Zerreißen zunächst weitgehende andere Formveränderungen ohne Aufgabe des Zusammenhanges vorausgegangen sind, Einsnrungen, die nur durch Gleitung zu erklären sind. Es ist fur viele Körper außerordentlich schwer, Angaben uber die Zerreißfestigkeit zu erhalten, als Grenzfall nenne ich nur die Flüssigkeiten, die sich so vollkommen und leicht durch Gleiten umformen lassen, daß sie jeden Versuch, sie zum Zerreißen zu bringen, mit vollkommener Abschnürung beantworten. Nur auf besondere Weise konnte man ihre Zerreißfestigkeit feststellen, und diese ergab uberraschend hohe Werte von der Größenordnung der festen Körper.

Fur die beiden Möglichkeiten bleibender Umformung, Zerreißen und Gleiten, müssen wir die Bedeutung fur die Geologie feststellen. Zerreivorgnge sind ja in der Tektonik nicht ausgeschlossen. Grundbedingung fur sie ist das Vorkommen von Normalzugbeanspruchungen am Körperelement, was wieder eine Anordnung der äußeren Kräfte bedingt, die wir als Zug bezeichnen. Ubermig wahrscheinlich ist eine solche Anordnung nicht, da schon durch das Gesteinsgewicht bei halbwegs großer Uberlagerung soviel Druck in die Beanspruchung hineinkommt, daß das Aufkommen von Zugbeanspruchungen nicht mehr recht möglich erscheint. Es werden wohl Erscheinungen angefuhrt, die als Zugwirkungen erklärt werden, Zerrklüfte etc. Fur eine Reihe davon mag die Erklärung auch wohl stimmen, doch möchte ich vor einer zu reichlichen Verwendung dieser Vorstellung in der Tektonik warnen. Eines ist eigenartig bei diesen Fallen, wo ein Zerreißen eingetreten sein soll: Die Zugkräfte benehmen sich dabei merkwürdig gutartig. Man sollte meinen, die Kräfte, die den Riß hervorgebracht haben, wurden, nachdem kein weiterer Zugwiderstand sie hindert, mit den Bruchstücken davontollen, wie es die Scherkräfte mit den Schubdecken, wo ja der Reibungswiderstand weiterdauert, so schön zuwege bringen. Einstweilen sehen wir die Bruchstücke nach einem Wege, der nach Millimetern, Zentimetern, vielleicht auch nach Metern zu messen ist, bereitwillig haltmachen, eine Ader begrenzend. Nach einem spater zu erläuternden Begriffe sind es keine wegefahigen Kräfte, die diese Zerreißungen zustande gebracht haben. Wirklich wegefahige Zugkräfte hat die Tektonik bis jetzt eigentlich noch selten zu verwenden Gelegenheit gehabt. Ein Zerreißen mit weitgehender Trennung der Bruchstücke wurde z. B. die Ansicht Hahns annehmen, wonach die Wettersteinmassen am Nordrande der bayrischen Kalkalpen, Benediktenwand, Wendelstein etc. abgetrennte und nach Norden vorgefrachtete Teile der tirolischen Stirne waren. In einem Falle sehen wir allerdings Zerreißungen weitestgehender Art angewandt: in der Wegenerschen Vorstellung, wo wir in den Trennspalten, Roter Meergraben, Atlantischer Ozean Zerreiwege bis zu Ozeanbreite sehen.

Auch für die Gefügeausbildung haben Zerrißvorgänge eine recht zurücktretende Bedeutung. Wir sehen solche als Folgen einer örtlichen Sonderausbildung des Beanspruchungsplanes, z. B. in den virtuellen Hohlräumen um Porphyroblasten, in Faltenscheiteln etc. Im ganzen ist aber die Umformung durch Zerreißen für Tektonik und Gefügebildung recht bedeutungslos.

Es stehen also von den Möglichkeiten der mechanischen Umformung für die Tektonik fast nur die Gleitungen zur Verfügung und jede Technologie der tektonischen Formänderungen muß sich mit den Gesetzen der Ausbildung der Gleitungen befassen\*).

Die Frage ist die: Welche Gleitungen sind bei einer gegebenen Anordnung der äußeren Kräfte zu erwarten? Daß diese Frage nicht eindeutig lösbar ist, haben wir schon gesehen, wir brauchen aber wenigstens Grundsätze für die Entwicklung der Gleitung. Zunächst liegt eine Anschauung sehr nahe. Wir kennen die Gesetze des Beanspruchungszustandes am Körperelement und wissen, daß er symmetrisch ist; wir wissen, daß es in ihm zwei gleichwertige Ebenen größter Scherbeanspruchung gibt, je unter 45 Grad die Achsen der größten und kleinsten Hauptbeanspruchung schneidend. Wächst nun die Beanspruchung durch das Anwachsen der äußeren Kräfte, so ist es wahrscheinlich, daß an diesen Ebenen zuerst eintreten wird, daß der Körper die entsprechenden Gegenspannungen nicht mehr aufbringen können, es soll also an diesen beiden Flächen Gleiten auftreten, und zwar an beiden in gleicher Weise. Es sollte sich also die Umformung durch Gleiten nach zwei gleichwertigen Flächen vollziehen. Es ist das eine Anschauung, die auch in der Technik durchaus häufig anzutreffen ist.

Die tatsächlichen Erscheinungen stehen aber mit diesen Erwartungen durchaus im Widerspruche. Die meisten Umformungserscheinungen zeigen ausgesprochene Asymmetrie der Gleitflächen, nur tritt dies gerade bei den Versuchen der Technologie nicht hervor, weil bei ihnen, wie wir eingangs an der Presse zeigten, die Symmetrie künstlich besorgt ist. Betrachtet man aber einen allgemeinen Vorgang der Technologie, Schmieden, Walzen, das Abschälen eines Spanes, überall wird einem zum mindesten das Vorwiegen einer Gleitfläche vor den anderen, wenn solche überhaupt erkennbar sind, auffallen. Gehen wir in die Geologie, so sehen wir die moderne Tektonik, eigentlich durchaus als Tektonik einzelner bevorzugter Gleitflächenlagen.

Es ist also die Frage der Asymmetrie der Gleitflächenentwicklung — die Frage der Bevorzugung besonderer Flächenlagen für die Gleitung — diejenige, die wir zum mindesten klären müssen, wenn es uns schon nicht gelingt, die Gesetze der Gleitflächenausbildung überhaupt zu klären. Es ist eigenartig, daß bei der großen Bedeutung dieser Frage eigentlich noch wenig sowohl induktiv wie deduktiv darüber untersucht ist. Die amerikanischen Geologen haben ihre Tragweite erkannt. Ich nenne hier insbesondere die Arbeiten Beckers. Seine Untersuchungen hierüber haben aber eigentlich keine Beachtung erfahren. Später hat sich Sander mit dieser Frage beschäftigt (Druckversuch zwischen seitenbeweglichen Backen). Ich habe in der Arbeit „Mechanische Probleme der Gebirgsbildung“ (Mitt. Geol. Ges. Wien 15.) auf die Erscheinung hingewiesen und eine Erklärung versucht. Heritsch schreibt in seinen „Grundlagen der alpinen Tektonik“, S. 52, daß diese Asymmetrie der Scherflächenentwicklung dadurch bedingt sei, daß die Gesteine durch vorgezeichnete Strukturflächen selbst asymmetrisch seien. Letzteres ist ja in den meisten Fällen richtig, doch wäre es unrichtig, sich mit dieser Erklärung zu beruhigen. Die Erscheinung der nicht gleichartigen Entwicklung von Gleitflächenpaaren ist viel allgemeiner, tritt auch bei Stoffen, in denen eine Anisotropie so weit als möglich fehlt, wie in Gußmetallen, Wachs, genau so auf. Wir werden uns später gerade mit den Erscheinungen, die aus dem Nichtzusammenfallen von Gleitflächen mit diesen bevorzugten Gefügeflächen entstehen, zu beschäftigen haben.

Wie geht also dieses Auswählen der Flächen vor sich, an denen Gleiten eintritt? Wir müssen diese Untersuchung zweimal vollführen, einmal unter der Annahme, daß der Körper eine ausgesprochene Elastizitätsgrenze besitzt, das anderemal, daß seine innere Reibung für die Verschiebungsgeschwindigkeit Null auch Null ist.

Der Irrtum, der bei der Forderung nach der Ausbildung zweier gleichwertiger Gleitflächen begangen wurde, liegt darin, daß man glaubt, von der Betrachtung eines einzigen Körperelementes aus urteilen zu können. Wir haben gar nichts davon, daß an einem Element eine Gleitung vor sich geht; die Verlagerungen, die hier möglich sind, sind zu klein, um beobachtet werden zu können. Die Umformung muß den ganzen Körper ergreifen. Wenn wir also die erste Annahme machen, daß der Körper eine ausgesprochene Elastizitätsgrenze besitzt, so dürfte sich der Vorgang so abspielen: Die äußeren Kräfte steigen an, zunächst können aber überall die Spannungen den Beanspruchungen das Gleichgewicht halten. Endlich wird aber an einer Stelle das Wachsen der Spannungen

\*) Vergl. Schwinner, Scherung, der Zentralbegriff der Tektonik. Centralblatt f. Mineralogie etc. 24, 469.

nicht mehr mit dem Wachsen der Beanspruchungen Schritt halten können. Es ist natürlich, daß dies in diesem Körperelemente an den beiden Flächen größter Scherbeanspruchung eintritt, die unter 45 Grad die äußersten Hauptkräfte schneiden. An beiden tritt also ein kleines Gleiten ein, für jede bemerkbare Formänderung ungenügend, aber ausreichend, um den Beanspruchungsplan zu ändern. Es tritt eben jetzt die Einregelung des Beanspruchungsplanes ein, von der wir früher sprachen. Die Nachbartheile sind ja noch nicht überbeansprucht gewesen, dadurch aber, daß in dem ersten Theile diese kleinen Gleitruhe eintraten, entlastet es sich selbst, dafür müssen aber die Nachbartheile mehr Belastung aufnehmen. So kann es kommen, daß bei weiterem Wachsen der äußeren Kräfte auch sie überanstrengt werden, natürlich wieder zunächst an Flächen größter Scherbeanspruchung. Diese werden aber im allgemeinen sich stetig an die des ersten Theiles anschließen. So bahnen sich von den beiden gleichwertigen Scherflächen des Ausgangsteiles zwei Bahnen der Gleitung in den Körper hinein, ohne daß an ihnen noch größere Gleitungen vor sich gegangen sind, denn solange in ihrer weiteren Fortsetzung noch Theile vorhanden sind, die noch Beanspruchung vertragen, werden eben diese weiterbelastet und das Gleichgewicht der äußeren Kräfte kann ungestört weitererhalten werden. Erst wenn solche Theile nicht mehr aufzutreiben sind, das heißt, wenn eine Fläche lauter über der Scherfestigkeit beanspruchter Theile bis an die Grenze des Körpers hinausgewachsen ist, besteht im Körper ein Schnitt, der keine weitere Belastung verträgt, dann ist diese Fläche Gleitfläche, an der auch größere Gleitungen vor sich gehen können.

Es sind aber von unserem Theile zwei solcher Flächen hinausgewachsen, sich im Theile selbst unter 90 Grad schneidend. Beide bahnen sich weiter. Aber in einem allgemeinen Falle werden sie nicht gleichzeitig den Zustand erreichen, daß jede den Körper vollkommen in zwei Theile zerschneidet, eine wird zuvorkommen. Hat diese aber ihr Ziel erreicht, so ist zunächst jeder Anlaß seiner Weiterentwicklung des Beanspruchungsplanes aufgehoben, die zweite bleibt einfach stecken. Man sieht hieraus, daß im allgemeinen nur eine einzige Gleitfläche sich ausbilden wird, die Forderung nach Symmetrie ist ganz unberechtigt. Nur in dem Falle, wo durch die Gleichseitigkeit der ganzen Anordnung wie bei der Presse dafür gesorgt wird, daß beide Ausgangsflächen gleichzeitig ihr Ziel erreichen, werden beide auch in Tätigkeit treten. Dabei sei bemerkt, daß bei Voraussetzung einer Elastizitätsgrenze für die Scherung die entstehende Gleitfläche sämtliche Körperteile in einer der Fläche größten Scherbeanspruchung, also unter 45 Grad zu den jeweiligen äußersten Hauptkräften durchschneidet. Es haben sich eben die Beanspruchungszustände so lange verdreht und ihre Größe verändert, bis dies zutrifft.

Gehen wir zum anderen Falle über. Der Körper habe in der Ruhe keine Reibung. Wie aber ein Gleitweg zurückgelegt werde, sei auch schon eine Reibung vorhanden. Beanspruchen wir einen solchen Körper durch allgemeine Kräfte, so wird auch an einem jeden Körperelement von ihm ein Beanspruchungszustand auftreten, der von dem hydrostatischen verschieden ist. (Groß werden diese Abweichungen im allgemeinen nicht sein, da der Körper schon ganz kleinen Kräften nachgibt, wird sehr häufig beim Entstehen der Beanspruchung schon durch das Nachgeben des Körpers ein Weiterwachsen der äußeren Kräfte verhindert werden. Siehe die späteren Ausführungen.) Es wird also jede Fläche durch das Körperelement eine Scherbeanspruchung aufweisen, der zunächst keine Spannung entgegengesetzt ist, mit Ausnahme der drei Hauptebenen. Und legen wir, von irgendeinem Elemente und irgendeiner Scherfläche in ihm ausgehend Fortsetzungen durch die Nachbartheile und so weiter, so erhalten wir eine sehr große Zahl von den ganzen Körper durchsetzenden Flächen verschiedener Lage, die alle die Eigenschaft haben, daß an ihnen Scherbeanspruchungen herrschen, aber zunächst keine Widerstände dagegen. Ausgenommen sind nur die drei Flächen, die wir ausgehend von je einer Hauptebene des Ausgangsteiles jeweils durch die in der Fortsetzung gelegene Hauptebene des Nachbartheiles gelegt hätten. Tritt aber ein Gleiten um ein Wegdifferential auf, so ist sofort eine Reibung vorhanden. Wenn man annimmt, daß diese Reibung für die Fläche der größten Scherbeanspruchung, die unter dem Winkel von 45 Grad zu den Hauptkräften steht, der Scherbeanspruchung gleich ist, dann wird sie für die anderen Flächenlagen größer sein, als die dortige Scherbeanspruchung.

In diesem Falle wird nur an der Fläche der größten Scherbeanspruchung tatsächlich ein Gleiten zustande kommen. Dies gilt jedoch nur so lange, als das Gleiten an dieser Fläche tatsächlich nur ein Differentiale darstellt, z. B. gemessen gegen den Weg, den die äußeren Kräfte dabei zurücklegen. Wäre der Weg an unserer Gleitfläche ein endlicher, so könnten an den anderen Flächen immerhin andere Wege zurückgelegt werden, die kleiner aber auch endlich sind, so daß auch an ihnen die Scherbeanspruchungen eine entsprechende Reibung fänden.

Nun ist aber bei solchen Körpern die differentielle Verteilung des Gleitweges die Regel, Verteilung nicht auf die Flächen verschiedenen Winkels zu den Hauptspannungen, sondern auf verschiedene Flächen gleicher Lage. Wären wir nämlich von einem anderen Ausgangsteile ausgegangen, so hätten wir von ihm aus geradeso

Flächen verschiedenster Art durch den Körper ziehen können, unter anderem auch Flächen größter Scherbeanspruchung, die den vom ersten Teilchen aus gelegten vollkommen gleichwertig sind. Nun ist es bei solchen Körpern die ausnahmslose Regel, daß alle solchen gleichwertigen Flächen tatsächlich Gleitflächen sind. Die durch eine endliche Verschiebung der Angriffspunkte der äußeren Kräfte veranlaßte Umformung verteilt sich bei ihnen also immer differentiell; daher sehen wir, daß bei ihnen nicht Flächen aller Lagen zur Gleitung kommen, sondern nur solche, die die größte in Betracht kommende Scherkraft zeigen. Im allgemeinen werden dies zunächst die Flächen sein, die die äußersten Hauptspannungen unter 45 Grad schneiden. Wir hätten also zu erwarten, daß in diesem Falle, im Falle der Flüssigkeit tatsächlich die beiden Systeme symmetrisch gelegener Scherflächen auftreten. Im Beanspruchungsplane selbst wäre daher in diesem Falle kein Anlaß zu einer Asymmetrie der Gleitflächenanordnung gelegen.

Bis jetzt haben wir untersucht, wie unter gegebenen äußeren Verhältnissen unter den möglichen Gleitflächen eine Auswahl getroffen wird. Insbesondere nahmen wir die äußeren Kräfte als unveränderlich an.

Es ermöglicht dies wohl die Erklärung von Gleitvorgängen, aber es muß darauf hingewiesen werden, daß diese Überlegungen jeweils nur für kurze Gleitwege Gültigkeit haben. Wenn nämlich Umformungen im Körper vor sich gehen, so werden auch die Angriffspunkte der äußeren Kräfte Wege zurücklegen und damit ändern in der Regel auch diese Kräfte selbst ihre Größe. Wollen wir daher eine Darstellung weitreichender Umformungen geben, so müssen wir unbedingt auch den Einfluß, den die Änderung der äußeren Kräfte spielt, betrachten. Damit ist hier auch der Platz, eine andere Frage zu berücksichtigen, nämlich die des Sinnes der Gleitbewegung.

Solange wir nur den überbeanspruchten Körper betrachten, können wir nur von einer Relativverschiebung beider durch eine Scherfläche getrennter Teile sprechen. Es hätte keinen Sinn, auszusagen, daß der eine von den beiden sich bewegt hätte, der andere nicht. Demgemäß erfolgt in der Technologie auch immer die zeichnerische Darstellung des Schervorganges so, daß keinem der beiden Teile eine Sonderstellung gegeben wird, nämlich durch zwei Pfeile zu beiden Seiten der Spur der Scherfläche, die die gegenseitige Verschiebung der beiden Teile kennzeichnen. So ist es auch in der Geologie, wenn uns nur die beiden Teile gegeben sind, zum Beispiel in einem losgelösten Handstück oder wenn wir in einem Schriff feststellen können, daß eine Scherfläche ihn durchsetzt. Wir können da z. B. feststellen, daß der augenblicklich oben liegende Teil sich gegen den unteren nach rechts verschoben habe oder der untere nach links, können es zeichnerisch also nur durch die zwei Pfeile darstellen; es ist uns kein Anhaltspunkt gegeben zu sagen, der Teil hat sich bewegt, der andere ist in Ruhe geblieben.

Die Sache wird sofort anders, wenn ein Bezugskörper gegeben ist. Es kann unter Umständen die Betrachtungsweise ganz gerechtfertigt sein, den Vorgang in der Festigkeitsmaschine vom Gestell der Maschine als Bezugskörper aus zu beobachten. Es ist dies ein Bezugskörper, der einen Sinn hat, denn von ihm gehen alle Kräfte aus, die auf die Probe einwirken. Der Körper werde durch Überbeanspruchung in zwei Teile zerlegt, die sich gegeneinander verschieben. Vom Gestell aus betrachtet, werden wir aber den Eindruck haben, daß hauptsächlich der eine der beiden Teile die Bewegung ausführt, nämlich der, der an der Kräfteerzeugungsstelle befestigt ist, während der andere Teil sich nicht wesentlich bewegt.

Genau in demselben Falle ist aber auch die Tektonik. Auch ihr ist ein Bezugssystem vorgeschrieben, ganz ähnlich wie das Gestell der Maschine, nämlich die übrige Erde, der Teil des Erdkörpers, in dem die Beanspruchung nicht mehr so groß war, daß sie zu erheblichen Umformungen geführt hätte. Die Berechtigung, gerade diesen Bezugskörper zu wählen, ergibt sich nicht bloß daraus, daß er die jenseitigen Angriffspunkte aller gebirgsbildenden Kräfte in sich enthält, sondern auch daraus, daß er einen wesentlichen Anteil dessen bildet, was wir das Gebirge nennen. Betrachten wir eine Gebirgsbildung nämlich in einem vereinfachten Bilde. Ein Gesteinskörper sei überbeansprucht in zwei Teile zerlegt worden, die sich gegeneinander verschoben haben. Betrachten wir daraufhin ein Deckengebirge, so sehen wir, daß in ihm nur der eine dieser beiden Teile enthalten ist, der andere ist in der Wurzelzone zurückgeblieben, ist unsichtbar, vielleicht der Verschluckung verfallen. Dagegen tritt in den Gebirgskörper ein weiteres Glied mit ein, das als Autochthon, Vorland etc. bezeichnet wird, ein Teil der Erde, der den gebirgsbildenden Kräften meist nur in geringem Maße erlegen ist. Und dieses Autochthon bildet den Bezugskörper, von dem aus der ganze Vorgang zu betrachten ist. Dadurch, daß uns so ein Standpunkt der Betrachtung vorgeschrieben erscheint, sind wir erst berechtigt z. B. von einem einseitigen Gebirgsbildungsvorgange zu sprechen.

Wir haben bisher in den äußeren Kräften keine Unterscheidung machen können. Gehen wir aber von dem Körper aus, dem sie entstammen, so sehen wir sofort, daß in ihnen Unterschiede festzustellen sind. Für den Entwurf einer Brücke sind alle Kräfte gleichwertig, der Druck eines Widerlagers wird genau gleich in die Rechnung gesetzt wie die Last eines Eisenbahnzuges. Für uns, die wir auf der Erde stehen, sind die Kräfte nicht gleichwertig, es ist uns ganz klar, daß beim Bruch die Brücke herabfällt und nicht die Widerlager hinauffahren; bei genauer Betrachtung werden wir aber sehen, daß auch die entlasteten Widerlager wohl eine Bewegung hinaufmachen, aber eine sehr kleine. Es ergeben sich also Unterschiede in den Kräften in bezug auf die Fähigkeiten, ihre Angriffspunkte Wege zurücklegen zu lassen, was wir als Wegefähigkeit bezeichnen wollen.

Begrenzen wir den zu untersuchenden Gebirgskörper, der ja eigentlich nur ein Teil der ganzen Erde ist, so, daß außerhalb von ihm die Beanspruchungen so klein sind, daß sie keine dauernden Umformungen erzeugen, so haben die auf ihn ausgeübten Kräfte die bemerkenswerte Eigenschaft, daß sie neben einer allgemein möglichen Veränderlichkeit nach Temperatur, kosmischen Vorgängen etc. insbesondere sowohl der Größe als Richtung nach abhängig sind von der Lage ihres Angriffspunktes. (Sie lassen daher die Darstellung durch eine Potentialfunktion zu.) Eine gespannte Feder übt z. B. bei einer gewissen Lage des Angriffspunktes eine bestimmte Kraft aus. Lasse ich sie länger werden, verschiebe ich also den Punkt, an den sie die Kraft überträgt, so wird sie einen anderen Druck ausüben, gehe ich wieder zur vorhergehenden Lage zurück, wird auch der Druck wieder derselbe sein wie vorhin, wenn nicht andere Einflüsse, Temperaturänderungen, Molekularumlagerungen eingegriffen haben. Nicht alle Kräfte zeigen diese Eigenschaft, insbesondere nicht Reibungskräfte. Bei der gewählten Abgrenzung dagegen werden nur Kräfte dieser Art von außen auf unseren Körper übertragen.

Überblicken wir die in Betracht kommenden Kräfte der Tektonik, so finden wir, daß sie mit dem Hochbau der Technik darin eine große Ähnlichkeit hat, daß sie hauptsächlich mit zwei Gruppen zu tun hat, nämlich mit Widerständen und Fernkräften, zwischen denen gerade in bezug auf ihre Wegefähigkeit ein großer Unterschied besteht.

Widerstände werden durch unmittelbare Berührung übertragen. Ihre Veränderungen entstammen den Veränderungen des Eingriffes der Atombereiche. Für sie ist eigentümlich, daß einer Verschiebung des Angriffspunktes in der Kraftrichtung stets eine Abnahme der Kraft entspricht. Ist eine Feder zusammengedrückt und verschiebt sich der Angriffspunkt in der Richtung der Kraft, so daß die Feder länger wird, so nimmt der Federdruck ab und umgekehrt. Dabei vollziehen sich alle diese Wandlungen der Kraft auf einem verhältnismäßig sehr geringen Wege.

Die Größe dieser Wege für eine bestimmte Änderung der Kraft hängt, abgesehen von der Beschaffenheit, von der Größe des Körpers ab, der die Kraft ausübt. Da in unserem Falle dieser Körper die Erde ist, könnte man annehmen, daß immerhin hier Wege in Betracht zu ziehen sind, die wohl tektonischen Ausmaßes sind. Doch ist dabei zu bedenken, daß die Beanspruchungen, die diese elastischen Zusammendrückungen bewirken, in der Erde mit wachsender Entfernung vom Orte der Gebirgsbildung sehr rasch abnehmen müssen, da ja die Querschnitte durch den Körper außerordentlich rasch anwachsen. Es werden daher die entfernteren Teile der Erde nur sehr wenig zu den Wegen beitragen können. Ferner ist aber auch noch zu beachten, daß es sich bei der Gebirgsbildung wahrscheinlich um in unserem Sinne geringe Kräfte handelt. Es ist daher auch die Möglichkeit der Schwankung der Kraftgröße in enge Grenzen gesetzt. Wir können daraus folgern, daß diese Berührungskräfte, die Widerstände auch für die Geologie die Rolle von nicht sehr wegefähigen Kräften spielen.

Demgegenüber steht die andere Gruppe von Kräften, die Fernkräfte. Sie werden nicht durch Berührung übertragen. Ihre Felder sind weltweit. Daher sind auch die Änderungen, die sie bei der Verlegung ihres Angriffspunktes erfahren, ungleich langsamer, und was ein wesentlicher Unterschied gegen die früher genannten ist, es ist kein derart enger Verband zwischen Verschiebungssinn und Kraftänderung vorhanden. Bei den Widerständen hatte z. B. eine Verschiebung des Angriffspunktes im Sinne der Kraftwirkung unweigerlich ein Sinken der Kraft im Gefolge. Bei Fernkräften gilt dies nicht so; das sieht man an dem geläufigsten Beispiele der Fernkräfte, der Schwerkraft. Außerhalb der Erde nimmt diese sogar zu, wenn der Massenpunkt, auf den sie wirkt, sich in ihrem Sinne verschiebt, wenn er fällt; allerdings ist diese Zunahme eine sehr langsame.

Diese Eigenarten gelten auch für die Kräfte, die, ausgegangen von Fernkräften, durch Berührung also in letzter Linie durch Nahkräfte übermittelt werden, wenn z. B. die Schwerkraftwirkung auf einen Körper durch Vermittlung der Festigkeit eines zweiten auf einen dritten übertragen wird.

Aus diesen Unterschieden der beiden Gruppen kann man zunächst den Schluß ziehen, daß die weiten Bewegungen, mit denen wir in der Tektonik rechnen, im wesentlichen durch die Fernkräfte hervorgebracht sind.

Als solche kommen für uns wohl nur Massenkräfte, insbesondere die Schwerkraft in Betracht, wobei man allerdings zulassen muß, daß sie auch durch irgendwelche maschinenartige Zwischenglieder, schiefe Ebenen und dergleichen in Richtung und Größe verändert auf unseren Körper einwirkt.

Nun hat dieser Unterschied in der Wegefähigkeit der Kräfte einen maßgebenden Einfluß auf die Auswahl der Gleitflächen, sobald wir uns nicht mit Gleitungen kleinen Ausmaßes begnügen. Stellen wir uns vor, der Körper, dessen Umformung wir zu untersuchen haben, sei von wegefähigen und wenig wegefähigen Kräften allgemein beansprucht. Es hätten sich nach den von uns früher gewonnenen Grundsätzen Gleitflächen ausgebildet, entweder eine einzige, wenn der Körper eine ausgesprochene Elastizitätsgrenze hätte oder die beiden gleichwerigen bei Mangel einer solchen. Wir wollen zuerst den ersten Fall berücksichtigen. Betrachten wir den einen Teil, der durch die Scherfläche vom Körper abgeschnitten wird. An ihm wirken: An der Scherfläche die Reibung und dann noch von außen her verschiedene Potentialkräfte (zu ihnen gehört auch der Normaldruck auf die Scherfläche). Unter den Außenkräften können nun wieder nicht wegefähige Widerstände sein und wegefähige Fernkräfte. Es tritt eine Verschiebung ein, damit verschieben sich auch alle Angriffspunkte der Außenkräfte; damit verbunden ist aber auch die oben geschilderte Veränderung in deren Größe. Diese Veränderung wird sich aber hauptsächlich bei den Widerständen geltend machen. Wir können entnehmen: wenn die Verschiebung vor sich geht, daß der Angriffspunkt eines Widerstandes sich gegen die Richtung dieser Kraft verlegt, so wird diese wachsen und zwar verhältnismäßig rasch. Dadurch wird aber die ganze Grundlage, auf der die Auswahl dieser Gleitfläche erfolgte, verändert, es ändert sich der Beanspruchungsplan und zwar unbedingt in dem Sinne, daß die bestehende Scherfläche ungünstiger wird, die Bewegung an ihr wird rasch steckenbleiben, es werden andere Gleitflächenlagen ausgewählt, falls eine an dem Teile angreifende Fernkraft größere Bewegungen ihres Angriffspunktes erzwingen kann.

Es hängt nun ganz von der Anordnung der äußeren Kräfte ab, wie lange diese Umordnung des Beanspruchungsplanes fort dauert. Es ist der Fall außerordentlich häufig, daß ein geologischer Körper von Fernkräften bedeutender Größe beansprucht ist und trotzdem keine tektonische Umformung zuwege kommen kann, weil er derart von Widerständen umstellt ist, daß jeder Versuch einer Gleitung sofort durch deren Anwachsen erstickt wird; unter fortwährenden kleinen Rucken im Körper nach den verschiedensten Flächen stellt sich der Beanspruchungsplan jeweils so ein, daß die jeweilige Gleitung ertötet wird. Es nähert sich der Beanspruchungsplan immer mehr einem allseitigen. Dies ist der Weg, auf dem sich der hydrostatische Beanspruchungszustand in einem Gefäße einstellt, in das Wasser eingegossen wird. Bei Körpern mit innerer Reibung der Ruhe wird dieser hydrostatische Beanspruchungszustand natürlich nicht vollkommen erreicht, er kann soweit von ihm abweichen, als die Reibung ohne Formänderung noch Beanspruchungen ertragen kann. Diese Form der Belastung ist ja außerordentlich häufig, es ist der Zustand, in dem eigentlich unsere Erdkruste immer ist, wenn keine Formänderung vor sich geht. Belastet durch das Gesteinsgewicht in einem Ausmaße, das für sich jedenfalls weitgehende Formänderungen erzeugen müßte, kommt doch keine Formänderung zustande, weil ringsum Widerstände jeden Ausweg im Sinne der wegefähigen Kraft verhindern. Es ist der Zustand, den Heim sehr richtig als latent plastischen bezeichnet hat, die Wegnahme eines Widerstandes muß dann eine Bewegung einleiten.

Neben diesen Fällen, die nicht zu einem Großereignis führen, können aber andere auftreten, in denen eine Scherfläche sich so durchlegen läßt, daß an dem einen Teile Fernkräfte wirken, die diesen in einem bestimmten Sinne zu verschieben trachten, und daß ihnen keine an demselben Teile angreifenden Widerstände entgegenwirken; diese Gleitfläche muß nicht von Anfang an erwählt gewesen sein, vielleicht hatten sich früher andere gebildet, und unter rasch wieder erliegenden Rucken an ihnen formte sich der Beanspruchungsplan solange um, bis endlich eine Scherfläche möglich wurde, an der gegen keinen Widerstand Weg zurückgelegt werden mußte, eine Scherfläche, die die Fernkräfte „ins Freie führt“. Eine solche Lage wird also zu einer Weitbewegung führen, die erst dann zum Erliegen kommt, wenn auch die Fernkräfte infolge der Gestaltung des Feldes an Größe abnehmen, oder wo dem Teile im Laufe seines Weges sich ein neuer Widerstand entgegenstellt. Ich möchte annehmen, daß die rasch ersterbenden Rucke gegen die Widerstände tektonisch und auch im Gefüge kaum Spuren hinterlassen haben, insbesondere dort nicht, wo wie wir später zu betrachten haben werden, die Bewegungen sich differentiell auf eine große Zahl gleichliegender Gleitflächen verteilen. Wo letzteres nicht der Fall ist, könnten sie vielleicht zur Anschauung kommen. Die eigentlichen formbildenden tektonischen Bewegungen tragen aber alle die Züge der ins Freie führenden Gleitung im Sinne einer fernwirkenden Kraft an sich.

Betrachten wir diese Frage für einen Körper ohne innere Reibung der Ruhe, also für eine Flüssigkeit. Wir hatten oben gesehen, daß die erste Auswahl das Gleiten nach Flächen größter Scherkräfte wahrscheinlich macht,

daß sich zwei Scherflächenlagen, die sich unter 90 Grad schneiden, zunächst einstellen. Wieder setzt jetzt aber nach den ersten Rucken die Umregelung des Beanspruchungsplanes ein, falls bei ihnen Wege gegen Widerstände geleistet werden müssen, und wieder solche Umregelungen welche die augenblickliche Gleitfläche ins Unrecht setzen. Im ungünstigsten Falle führt dies zur schon geschilderten Einstellung des allseitigen Beanspruchungszustandes. Im anderen Falle kann eine Gleitung zuwege kommen, die ins Freie führt. Dabei muß aber beachtet werden: Wenn ein solcher Beanspruchungsplan sich eingestellt hat, daß eine von den beiden zu erwartenden Flächen den erwünschten Ausweg findet, so muß dies für die andere bei allgemeiner Anordnung der äußeren Kräfte noch durchaus nicht der Fall sein, es erfordert im Gegenteil eine sehr unwahrscheinliche Anordnung der Fernkräfte und Widerstände, wenn diese beiden Flächen größter Scherkraft zugleich für weitgehende Verschiebungen tauglich sein sollten.

Es ist sogar hier die Frage, ob es gerade eine Fläche größter Scherkraft sein wird, die hier zur Ausbildung kommt. Wir haben für den ersten Auswahlvorgang bei solchen Körpern ja gesagt, daß alle Flächen mögliche Gleitflächen sind, daß für die Flächen größter Scherkraft nur das Verhältnis vom Reibungsanwachsen zur Beanspruchung am günstigsten ist. Es läßt sich aber daraus nicht erschließen, daß in unserem Falle der Beanspruchungsplan sich solange regeln muß, bis gerade eine Fläche größter Scherbeanspruchung den Ausweg ins Freie findet; man muß mindestens mit der Möglichkeit rechnen, daß schon eine minder beanspruchte Fläche die Bewegung übernehmen kann, wenn die Flächen größter Scherkraft noch behindert sind. Jedenfalls haben wir aber den Satz für solche Körper ohne innere Reibung der Ruhe, daß im Falle der allgemeinen Belastung die Flächenlage eine Weitbewegung erfahren wird, die unter allen Flächen, die die Fernkraft ins „Freie“ führen, die größte Scherbeanspruchung hat.

Dies ist die Art und Weise, in welcher sich eine Bewegung in einer Flüssigkeit vollzieht. Man beachte einmal die Bewegungsform des Rinnens von Wasser in einem Bette mit Gefälle. Es greifen als äußere Kräfte an: die Schwerkraft als Fernkraft und die Widerstandskräfte des Bodens des Gerinnes. Es entsteht eine Bewegungsform, die als Gleiten nach einer einzigen Gleitflächenlage darstellbar ist, nämlich nach der, die mit dem Gerinneboden gleichläuft. Steilere Flächen als diese würden den Wasserkörper nämlich in zwei Teile zerlegen, von denen der eine so beschaffen ist, daß an ihm neben der Schwerkraft noch die Widerstände des Bodens angreifen. Glitte der Teil im Sinne der Schwerkraft ab, so müßten diese Widerstände zurückgedrängt werden. Diese Flächen sind deshalb unmöglich. Flacher geneigte Flächen kommen offenbar deshalb nicht zum Gleiten, weil die Fläche parallel zum Flußgrunde die größte Scherkraft aufweist.

So haben wir also den bemerkenswerten Satz sowohl für Körper mit ausgesprochener Elastizitätsgrenze als auch ohne eine solche erhalten, daß bei einer allgemeinen Beanspruchung, die keinen besonderen Symmetriebedingungen gehorcht, es wahrscheinlich ist, daß nur eine Scherflächenlage es zu einer weitergehenden Bewegung bringt. Und zwar ist es hauptsächlich die Anordnung der Fernkräfte, welche diese Auswahl der weitführenden Scherfläche beherrscht.

Zwischen diesen Grenzfällen muß also das Verhalten der Gesteine eingeschlossen sein. Besonders für die Tiefentektonik läßt sich annehmen, daß sie dem Falle der Flüssigkeit ohne Reibung der Ruhe sehr nahe kommt. Immerhin dürfen wir das bei den Grenzfällen Gemeinsame auch für die Gesteine mit annehmen, daß bei einer allgemeinen Beanspruchung sich diese in einer Gleitung nach einer einzigen Gleitflächenlage auslöst.

Es ist hiezu eine Einschränkung zu machen; es gilt dies für den Fall, daß der Beanspruchungsplan ein „schlichter“ (monotoner) ist, daß in ihm keine raschen Wechsel in der Richtung der Beanspruchungen vorkommen. Im allgemeinen kann man annehmen, daß bei einer einfachen Anordnung der Fernkräfte und Widerstände auch der Beanspruchungsplan diese Forderung erfüllen wird, wir werden uns aber später bei Besprechung der Knickfalten mit dem Falle zu befassen haben, wo trotz dieser einfachen Beanspruchung der Beanspruchungsplan ein verwickelter wird, wo eine einzige Gleitfläche, die den obigen Bedingungen genügen würde, eine zum Gleiten ungeeignete Form haben müßte. Dann löst sich jedes Teilfeld des Planes, soweit es als schlicht angesehen werden kann, für sich nach einer einzigen Gleitflächenlage aus.

Es läßt sich die Überlegung, die wir in bezug auf die Wegefähigkeit der Kräfte gemacht haben, auch noch in einer anderen Darstellung geben, die insbesondere für den Vergleich der mechanischen Umformung mit der chemischen von Bedeutung ist. Da alle äußeren Kräfte Potentialkräfte sind, läßt sich ihr Wirken auch durch ihr Potential darstellen. Das Potentialfeld für den ganzen Vorgang ist dann nichts anderes als die Summe aus den Feldern der Einzelkräfte. Die Fernkräfte haben ein weiträumiges Potentialfeld, in welchem die einzelnen Energiestufen in annähernd gleichen Abständen aufeinanderfolgen. Die Flächen gleichen Potentials sind schlicht geformt.

Gleicherweise haben die Widerstände, die von der Umgebung des umzuformenden Körpers auf diesen ausgeübt werden, ein Potential. Dieses Feld bildet, sofern wir nur Druckkräfte in Betracht ziehen, eine Hülle an der Grenze, das 0-Potential fällt mit der Lage der Grenzfläche in unbelastetem Zustande zusammen, von dort aus nehmen die Energiestufen gegen das „Innere der Umgebung“ sehr rasch und mit immer engeren Schritten zu. Die Flächen gleichen Potentials folgen dabei der Grenzfläche.

Wenn man für jeden Punkt des Feldes die beiden Potentialwerte zusammenrechnet, kann man sich das Feld aller äußeren Kräfte ermitteln, welches wieder ein ausgesprochenes Gefälle haben wird. Ein Körper, der in diesem Felde sich befindet, wird nur dann im Gleichgewichte sein können, wenn er mit allen seinen Teilen sich so verlagert hat, daß er sich im Raume möglichst geringen Potentials befindet. Er kann dies erreichen, wenn keine weitere Kraft auf ihn einwirkt, die sich nicht in die Potentialdarstellung einfügen läßt, insbesondere wenn keine Reibung ihn daran hindert. Für eine Flüssigkeit, einen Körper ohne Reibung der Ruhe läßt sich dies annehmen. Ein Körper dagegen mit Ruhereibung wird das Ziel nicht vollkommen erreichen können, immerhin gibt für diesen das Potentialfeld wenigstens den Sinn an, in welchem der Vorgang in sich vollziehen wird.

Kehren wir nach dieser Abschweifung wieder zur Betrachtung der Gleitflächenbildung zurück. Wir haben bisher immer nur von einer einzigen Gleitfläche oder Gleitflächenlage gesprochen, die vor den anderen ausgezeichnet sein soll, doch haben wir schon Gelegenheit gehabt, eine Erweiterung zu erwähnen. Zu dieser Auszeichnung einer einzigen Fläche kamen wir dadurch, daß wir von einem einzigen Körperelement ausgegangen sind. Hätten wir dieses von einem anderen nicht zu ferne gelegenen getan, so hätten wir eine andere Fläche ähnlicher Lage gefunden, die ähnlich gegenüber allen anderen sie schneidenden Flächen ausgezeichnet gewesen wäre. Es wird also tatsächlich nicht eine einzige Fläche ausgewählt, sondern eine ganze „Schar“ gleichartiger und es hängt jetzt von besonderen Bedingungen ab, wie weit sich die einzelnen Flächen dieser Schar an der Gleitung beteiligen. Das Gemeinsame aller Flächen derselben Schar ist, daß sie einander nirgends schneiden (in kleineren Bereichen können sie genügend genau als parallel angesehen werden), ferner daß sie alle gleichen Verschiebungssinn besitzen.

Unsere Untersuchung führte also zu dem Satze: In einem Bereiche eines schlichten Beanspruchungsplanes ist es wahrscheinlich, daß eine bleibende Umformung durch Gleiten nach einer einzigen Schar von Gleitflächen erfolge.

Es ergibt sich daraus eine Anweisung für das Bewegungsstudium eines tektonischen Baues:

Läßt sich ein Bau erklären durch einen Gleitvorgang nach einer einzigen Schar von Gleitflächen, so hat diese Erklärung die Wahrscheinlichkeit vor den anderen Wegen voraus.

Es ist dies ein Einfachkeitssatz, er ist nichts anderes als die geometrische Darstellung der von der Deckenlehre schon lange gefühlsmäßig aufgestellten Forderung nach der „Einheitlichkeit des Vorganges“.

Es wird dieser Satz zunächst befremdlich erscheinen. Der Aufnahmsgeologe steht im Felde einer sehr großen Mannigfaltigkeit der Formen gegenüber und vielfach ist die Ansicht verbreitet, daß man diese Mannigfaltigkeit durch die Mannigfaltigkeit der Bewegungsrichtungen erklären dürfe. Durch unseren Satz ist aber gerade diese Möglichkeit ausgeschaltet. Man sieht, daß dieser Einfachkeitssatz durch einen Mannigfaltigkeitssatz ergänzt werden muß, damit die Menge der verschiedenen Formen umfaßt werden können.

Die Möglichkeit dazu ist vorhanden. Wir haben es nach dem obigen ja nicht mit einer einzigen Gleitfläche zu tun, sondern mit einer Schar von einander gleichwertigen. Es bestehen in der Art, wie sich diese Flächen an der Gleitung beteiligen, eine große Anzahl Möglichkeiten, die ausreichen können, die Mannigfaltigkeit der geologischen Erscheinungen weitgehend zu erklären. Sie lassen sich zwischen zwei Grenzfälle einschalten.

Der eine Grenzfall ist der, daß von der Schar nur eine Fläche tätig wird, der ganze tektonische Weg wird nur durch Gleiten an einer einzigen Fläche zurückgelegt. Es ist dies die unstetig im Raume verteilte Formänderung, kurz gesagt unstetige Formänderung. Der andere Grenzfall ist der, daß in dem betreffenden Raume, dem „Bewegungshorizonte“ (Sander) alle Flächen der Schar in Tätigkeit treten, an jeder der unendlich nahen Flächen vollzieht sich ein Bruchteil der Verschiebung, an allen im gleichen Sinne. Jede durch zwei solche Flächen eingeschlossene Platte des Gesteines rückt gegen die liegende in gleicher Richtung vorwärts. Die Gleitbewegung ist differentiell über den Raum verteilt. Differentialbewegung (Durchbewegung).

Zwischen diesen beiden Grenzfällen gibt es Übergänge. Häufig sehen wir z. B. wie von einer Hauptgleitfläche die Bewegung seitlich in das Nebengestein hineingreift. Wieder ist die Bewegung differentiell auf die verschiedenen Flächen einer Schar verteilt, aber zu ungleichen Teilen, an der Hauptgleitfläche hat sich der größte Teil des Verschubs vollzogen, von ihr nach beiden Seiten sehen wir, wie der Verschubanteil der nächsten Flächen immer geringer wird bis zu unmerklicher Kleinheit.

Die Gesetze dieser Verteilung der Gleitung auf die Flächen einer Schar sind noch nicht genügend erforscht. Ein Bild kann man sich mit den Vorstellungen Karmans machen, „Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck“, Z. d. Ver. d. Ing. 1911. Wenn die Reibung an einer Gleitfläche durch die Verschiebung eine Vergrößerung erfährt, dann werden die noch nicht tätig gewordenen Flächen der Schar günstigere Reibungsverhältnisse aufweisen als die schon tätigen, die Bewegung wird also auf jene „abwandern“, sich differentiell verteilen. Nimmt die Reibung an einer Fläche durch die Gleitung aber ab, so bleibt die erste tätige Fläche auf die Dauer die bevorzugte, die Umformung ist eine unstetige. Dieses Verhalten der Reibung ist abhängig vom Stoffe, daneben aber auch, wie die genannte Arbeit zeigt, vom Drucke senkrecht auf die Fläche, sicher auch von Temperatur etc. Daß wirklich neben dem Stoffbestand die genannten Größen die Verteilung beherrschen, sieht man an der regionalen Verteilung der darauf begründeten Arten der tektonischen Umformung, der sich der unstetigen annähernden Oberflächentektonik und der stetigen Tiefentektonik.

Nun liefert aber die geologische Erkenntnis noch einen weiteren Satz über die Verteilung der Bewegung auf die Flächen einer Schar. Nachdem die Bewegungsform der „Gleitbretter“ (Spitz) einen der anschaulichsten Fälle dieses Satzes darstellen, möchte ich ihn den Satz der Gleitbretter nennen.

Wir sehen sehr oft in Bereichen einheitlichen Durchbewegungssinnes nicht bloß eine Gleitfläche besonders hervortreten, sondern mehrere der Schar, die in diesem Raume oft auffällig gleichmäßig verteilt sind, zwischen sich Platten geringerer oder fehlender Durchbewegung — eben die Gleitbretter — lassend.

Dabei kann wieder jede dieser Gleitflächen die Mutterfläche sein, von der aus die Gleitung in oben geschilderter Weise auf die benachbarten Flächen der Schar übergreift. Es sind also alle Fälle denkbar und auch beobachtbar von dem Grenzfall an, wo einflächige scharfe Scherungen die im Inneren ganz undurchbewegten Bretter von einander scheiden, zu solchen, wo von den Hauptgleitflächen die Bewegung schon auf die benachbarten Flächen auswanderte mit nach außen immermehr abnehmender Größe der Verschiebungsanteile, so daß der Kern der Gleitbretter noch immer ganz undurchbewegt ist; weiterhin folgen solche Fälle, wo die Differentialbewegung auch den Kern der Gleitbretter ergriffen hat, aber mit geringeren Gleitbeträgen als sie bei den Hauptgleitflächen herrschen, bis zum Schlusse wieder der Grenzfall des vollkommen gleichmäßigen durchbewegten Bewegungshorizontes kommt, der meines Wissens aber kaum je verwirklicht sein dürfte; in allen vollkommen einer Differentialbewegung unterlegenen Räumen lassen sich Platten geringerer Durchbewegung unterscheiden, die durch solche stärkerer voneinander getrennt sind.

Es ist dieser Satz von den Gleitbrettern ein durch Induktion gewonnener. Eine Ableitung insbesondere für die so eigenartig regelmäßige Wiederholung läßt sich derzeit kaum geben, wiewohl wir später einen zur Erklärung vielleicht geeigneten Zusammenhang berühren werden. Wir wissen nicht einmal, ob die Gleitung an den einzelnen Gruppen gleichzeitig oder nacheinander erfolgte.

Immerhin ist diese Erscheinung der Gleitbretter eine in so riesenhafter Anzahl auftretende, daß wir wohl berechtigt sind, daraus eine allgemeine Eigenschaft des festen Stoffes abzuleiten, also diesen Satz als weitgehend gültig anzuerkennen.

Die Größenordnungen dieser Erscheinung sind die verschiedensten, von Bretterdicken von Millimetern bis zu bergbildenden Gleitbrettern. Es zeigt sich deutlich, daß diese Ausmaße bei sonst gleichen Umständen vom Stoffe abhängig sind, wir werden ferner einen noch unbekanntem Einfluß von Temperatur und Druck zugestehen.

Es ergänzt dieser Satz von den Gleitbrettern in außerordentlich glücklicher Weise unseren Satz von der Einscharigkeit der Gleitflächen, er bringt in die Einförmigkeit der Bewegung, die letzterer fordert, die Mannigfaltigkeit hinein, die der Geologe braucht, um die Menge der Erscheinungen im geologischen Baue zu erklären.

Unsere Anweisung für die Untersuchung der Bewegungsvorgänge eines geologischen Baues nimmt also folgende Form an:

Es ist immer zunächst zu versuchen, den Bau als das Ergebnis eines einscharigen Bewegungsvorganges zu deuten mit der Möglichkeit, daß die Gleitbeträge an den einzelnen Flächen ungleich sind und womöglich nach dem Gesetze der Gleitbretter periodisch wechseln.

Nun wollen wir sehen, wie weit wir mit diesen beiden Grundsätzen für die Erklärung geologischer Formen kommen.

Wie spricht sich eine Gleitung im Körper aus?

Wir werden ja später die Möglichkeit sehen, daß die Gleitfläche selbst sich im Gefüge abbildet; wenn wir aber von dieser Möglichkeit absehen, erkennen wir als das Ergebnis der Gleitung die Umgestaltung der Form des Körpers. Wäre ein Körper durch und durch gleichartig, so könnten wir diese Formänderung nur an seiner Begrenzung feststellen. Gerade geologische Körper haben aber die Eignung nicht, gleichartig, sondern auch im

Inneren „gezeichnet“ zu sein, so daß wir fast an jeder Stelle an der Veränderung der Zeichnungsgestalt die Wirkung der Formveränderung erkennen können. Als solche Zeichnungen haben wir die Schichtung, ferner die große Menge von Gefügeregelungen, die irgend eine Fläche im Gestein besonders auszeichnen. Es sind dies die „s“-Flächen Sanders, gleichgültig, ob sie noch auf sedimentären Ursprung zurückgehen oder einer späteren Umformung entsprungen. Es werde ein derartiges Gestein der Umformung durch eine einscharige Gleitung unterworfen, die eine gewisse Mannigfaltigkeit in der Verteilung der Gleitung auf die einzelnen Flächen der Schar besitze.

Eine einscharige Gleitung hat die Eigenschaften, daß sie alles, was in der Gleitfläche selbst liegt, unverändert läßt, nur das ändert, was die Gleitrichtung schneidet. Besteht nun die Zeichnung des Körpers in im Schnitte parallelen Geraden, wie dies bei Schichtung und „s“-Flächen fast immer der Fall ist, und liegen diese gleichlaufend zu den Gleitflächen, so kann die schönste Ungleichmäßigkeit in der Gleitungsverteilung keine verwinkelte Form aus der Zeichnung zustandebringen, sie besteht auch nach der Umformung wieder aus gleichlaufenden Geraden. Liegt die Gleitflächenrichtung aber schräg zur Zeichnung, so wird sich jede Ungleichmäßigkeit in der Verteilung des Gleitbetrages auf die Flächen der Schar in der Endform abbilden.

Wenn wir also mit unseren Sätzen die Mannigfaltigkeit eines geologischen Baues erklären wollen, so ist es geradezu gefordert, daß die Gleitflächenrichtung nicht mit der Lage der „Zeichnung“ zusammenfällt.

Es wird diese Forderung überraschend wirken. Gerade in letzter Zeit wurde wiederholt betont, daß vorhandene „s“-Flächen eine neue Gleitung in ihre Bahnen lenken, demnach sollte ein Schneiden von „s“-Fläche und Gleitfläche eigentlich eine Ausnahme darstellen. (Heritsch, Grundlagen d. alpinen Tektonik.)

Es wird auch als zu weit gegangen erscheinen, wenn ich wie oben die „s“-Flächen als eine „Zeichnung“ hingestellt habe, als ob sie nichts anderes seien als Striche, die in das Profil hineingezogen worden wären. Sie sind sicher mehr, sie stellen ja Ebenen dar, die die ganzen Reibungseigenschaften des Körpers zu einer anisotropen Funktion der Richtung machen. Sie werden daher auch sicher einen Einfluß auf die Lage der Scherflächen haben. Es ist aber die Frage die, ob dieser Einfluß darin bestehen wird, daß die Gleitfläche vollkommen in die Lage der „s“-Fläche hineinfällt oder ob sie bloß eine ihr genäherte Lage wählt.

Wir haben oben gesehen, daß das Potential der äußeren Kräfte der tektonischen Bewegung ein bestimmtes Ziel vorstellt, das aber wegen der Reibungen nur mehr oder weniger angenähert erreicht wird. Durch dieses Ziel sind die Bewegungsbahnen bis zu einem gewissen Grade vorgeschrieben. Es läßt sich nun aber von vornherein nicht erwarten, daß in dem betreffenden Körper die etwa von früher her vorhandenen „s“-Flächen eine solche Lage haben, daß sie durchwegs als Bahnen zur Erreichung dieses Zieles dienlich sein können. Es sind also von vornherein Schnitte zwischen „s“-Flächen und Scherflächen zu erwarten. Es wäre aber immerhin möglich, daß die Gleitflächen möglichst weit sich strenge vorhandener „s“-Flächen bedienen und dann die Unstimmigkeiten durch kurze Quergriffe wettmachen.

Es wäre zur Beurteilung dieses Verhaltens insbesondere die Kenntnis der Funktion wichtig, nach der die Reibung in einem geschieferten Gesteine von der Richtung zur „s“-Fläche abhängt.

Es sind hier zwei Fälle möglich: Einmal: Der Gang der Reibung in einem geschieferten Gesteine gleicht dem in dem Raumgitter eines Kristalls. In einem solchen können wir begründet annehmen, daß die Reibung eine un stetige Funktion der Reibungsrichtung ist. Wir haben in Raumgittern Translationsebenen, wo ein Gleiten leicht möglich ist; in einer unendlich wenig davon abweichenden Richtung, die dann irrational im Raumgitter liegt, ist die Reibung schon außerordentlich angewachsen. Würde sich die Reibung auch in geschieferten Gesteinen so verhalten — die Schieferung besteht ja aus der Gleichrichtung gleicher Raumgitterrichtungen der verschiedenen Körner — dann wäre es möglich anzunehmen, daß die Gleitfläche im Gestein soweit als möglich in die durch das „s“ vorgezeichnete Richtung einschnappen muß.

Im anderen Falle können wir wohl zugestehen, daß die „s“-Fläche ein Mindestmaß an Reibung besitzt, es ist aber durchaus nicht notwendig, daß Flächen, die in ihrer Richtung nur sehr wenig von jener abweichen, sich in der Reibung un stetig von ihr unterscheiden. Mit einer kleinen Richtungsabweichung wird wohl ein Anwachsen der Reibung verbunden sein, aber kein un stetiges. Es ist nämlich die „Regelung“ der Raumgitterlagen im Gefüge keine vollkommene, Streuungen sind überall zu erkennen und diese genügen, um die Unstetigkeit des Ganges der Reibung im Einzelkorn im ganzen Gestein nicht zum Ausdruck kommen zu lassen. In diesem Falle müssen wir nicht erwarten, daß ein vollkommenes Zusammenfallen von Scherfläche und „s“-Fläche erstrebt wird, sondern nur ein womöglich weitgehender Anschluß, der aber Winkelabweichungen noch weitgehend gestattet.

Es erscheint die letztere Annahme als die durchaus wahrscheinlichere, weshalb ich, trotzdem ich die Bedeutung der „s“-Flächen für die Lage der Scherflächen gerne würdige, doch darauf hinweisen möchte, daß weitgehend zwischen ihnen Richtungsabweichungen bestehen werden, die oft nicht groß, doch ausreichen, um der Ungleichförmigkeit der Verteilung der Gleitbewegung auf die Flächen einer Schar Einfluß auf die Formausbildung zu gestatten.

Wir wollen nun zur Prüfung der Anwendbarkeit unserer Sätze uns fragen: Ist es möglich, mit ihnen eine der eindrucksvollsten tektonischen Erscheinungen zu erklären, nämlich die Falten? Gerade diese Formen haben schon zu einer großen Menge von Erklärungsversuchen geführt, die aber meistens auf die Anwendung von Bildern hinausliefen, die der Sachlage nicht entsprachen, auf Biegung, Gewölbe etc. Sander hat ausgesprochen, daß zwischen Faltung und Biegung ein Unterschied ist; es ist nicht alles, was krumm geworden ist, gebogen worden, z. B. ist nicht erlaubt, dies von einer Rauchsträhne zu sagen, die sich in der Luft krumm zieht. Wir können nämlich bei dem Begriffe Biegen nicht von der Vorstellung unseres täglichen Lebens loskommen, vom Biegen eines Stabes, wo wir mit der Formänderung, die sich dabei meist innerhalb der Elastizitätsgrenze vollzieht, immer noch Folgerungen über die Bewegungsbahnen, über die notwendigen Drehmomente, neutrale Schicht, gezogene und gedrückte Faser etc. verbinden. Es gibt auch Gesteinsfalten, die diesem Falle nahekommen. Doch sind sie nur Einzelfälle in einer außerordentlichen Fülle von Bewegungsmöglichkeiten, die zu solch gekrümmten Endformen führen, die wir Falten nennen. Sind darunter nun auch solche, die sich durch einen einscharigen Bewegungsvorgang erklären lassen? Die Antwort lautet „ja“, und zwar für eine außerordentlich häufige und für gewisse tektonische Körper außerordentlich bezeichnende Faltenform, die „liegende Falte“

Es sind dies die Falten, die in tausendfacher Wiederholung in gewissen Bereichen von Phylliten und Glimmerschiefern daheim sind, die deren „Umfaltung“ (Sander) bewirken, eine über der anderen aufschießend, alle im selben Sinne vorgetrieben. (Galoppierende Fältelung, Suess). Eine sehr schöne Darstellung haben sie bei Heim gefunden, „Mechanismus der Gebirgsbildung“ und „Gneisfältelung im alpinen Zentralmassiv“, Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft, Zürich, 1900, „Geologie der Schweiz“. Anderweit sehen wir diese liegenden Falten zu Großformen erwachsend, die den Stil ganzer Profile beherrschen. Es sind das die liegenden Falten der Schulgeologie, an denen sich die bekannten Lehrsätze über ausgewalzte Mittelschenkel, verdickte Scheitel usw. entwickelt haben.

Schon in der amerikanischen Literatur findet sich die Darstellung solcher liegender Falten als Ergebnis eines einscharigen Gleitvorganges. Vgl. auch Schmidt, „Zum Bewegungsbilde liegender Falten“, Verh. G. R. A. 1912.

Die Möglichkeit, daß durch einscharige Gleitung liegende Falten entstehen, hängt mit der Möglichkeit ungleicher Verteilung des Gleitbetrages auf die einzelnen Flächen der Schar zusammen. Grundlegende Bedingung ist also eine nicht un stetig verteilte Durchbewegung.

Betrachten wir die Schicksale einer „Zeichnung“ im Gesteine während des Verlaufes einer Differentialbewegung, angesehen auf einem Schnitte senkrecht zur Gleitfläche aber in der Gleitrichtung, was also dem tektonischen Querprofil entsprechen würde. Fig. 5. Die Zeichnung bestehe aus gleichlaufenden Geraden, die aber einen

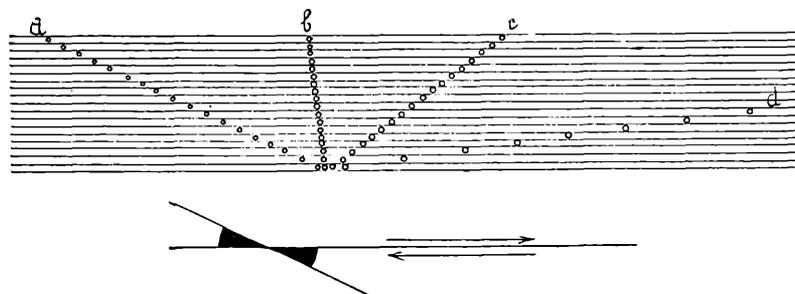


Fig. 5

Winkel mit den Spuren der Gleitflächen einschließen mögen. Wäre der Gleitbetrag vollkommen gleichmäßig differentiell auf alle Flächen der Schar verteilt, so würden wir sehen, daß die Zeichnung im Laufe des Vorganges immer gerade bliebe. Es ändert sich aber der Winkel mit der Gleitflächenspur, da jeder in einer hangenden Gleitplatte liegende Punkt einem Punkte der liegenden Platte und zwar jeweils um gleichviel voraneilt.

Der Enderfolg ist ein Hineindreuen der Zeichnung in die Richtung der Gleitflächen, was aber nie vollkommen erreicht werden kann. Denn immer bleiben die verschiedenen Punkte der Zeichnung in verschiedenen Platten, während sie, wenn die Zeichnung vollkommen mit der Gleitfläche zusammenfallen soll, alle in derselben Platte liegen müßten.

Es ist auch ersichtlich, daß der Drehungssinn, in welchem dieses Hineindreuen erfolgt, von dem Verschiebungssinne der Gleitung abhängt. Haben wir z. B. den Fall, Fig. 5, daß die hangende Platte einer Gleit-

fläche nach rechts verschoben wird, und schneidet die Zeichnung die Gleitflächenspur spitz so, daß der spitze Winkel in der hangenden Platte gleichfalls nach rechts zielt, also in der Richtung der Gleitung, dann kann das Hineindreuen offenbar nur so erfolgen, daß dabei die Drehung um den stumpfen Winkel durchgemacht werden muß.

Es muß daher auch eine Zwischenstellung durchlaufen werden, wo die Zeichnung winkelrecht zur Flächen-spur steht. Zielt der spitze Winkel im Hangenden aber nach links, also der Gleitrichtung entgegen, dann braucht nur die Drehung um diesen zu erfolgen, eine winkelrechte Zwischenstellung tritt also nicht ein.

Ist die Durchbewegung nicht gleichmäßig auf die verschiedenen Flächen verteilt, so werden die Gleitplatten nach Verlauf einer Zeit gegen einander verschiedene Wege zurückgelegt haben, die Verdrehungswinkel werden an verschiedenen Stellen der Zeichnung verschieden groß sein; die Zeichnung ist krumm geworden.

Wir haben aber in dem Gesetze der Gleitbretter einen Satz gefunden, der diese ungleiche Verteilung regelt; wo dieses herrscht, werden auch diese krummen Formen Gesetzen gehorchen.

Nehmen wir an, eine einscharige Durchbewegung habe in einem Raume eine ausgesprochene Gleitbretter-Verteilung angenommen.

In nahezu gleichförmigen Abständen seien gleichlaufende, gleichsinnige „Hauptgleitflächen“ tätig geworden. Von ihnen sei aber in oben geschilderter Weise die Gleitung differentiell auf die benachbarten Gleitflächen abgewandert, so daß die zunächst liegenden Flächen noch bedeutende Gleitbeträge aufweisen, während die ferner liegenden immer weniger Anteil nehmen, so daß der Kern der Gleitbretter undurchbewegt sei. Der Gesteins-körper habe ferner eine Zeichnung schräg zur Gleitflächenrichtung, und zwar nehmen wir an so, daß der spitze Winkel jeweils in der Gleitrichtung ziele. Siehe Tafel I, Fig. 1 b.

Es habe die Bewegung eine gewisse Zeit angedauert, an der Hauptgleitfläche sei schon ein weitgehendes Hineindreuen der Zeichnung in die Flächenrichtung erzielt worden. Da die Nebengleitflächen geringere Gleit-beträge aufweisen, sehen wir, daß sie das Hineindreuen noch nicht soweit zustandegebracht haben werden, und da ihre Beträge von der Hauptfläche nach beiden Seiten gesetzmäßig abnehmen, werden wir nach beiden Seiten auch in stetiger Aufeinanderfolge alle Zwischenlagen der Hineindrehung vorfinden, bis wir im Kerne des Brettes, der ja keine Durchbewegung erfahren hat, noch die Zeichnung in ihrer ursprünglichen Lage vorfinden werden. Es wird nach obigem also auch eine Stelle geben, wo die Zeichnung gerade senkrecht auf die Gleitfläche steht.

Betrachten wir die so entstandene Form, so haben wir die Grundform der liegenden Falte. Im Kerne des hangenden Gleitbrettes der Hangendschenkel, mit allmählicher Krümmung übergehend in die Stelle, wo die Zeichnung gerade senkrecht steht zur Gleitfläche, der Scheitel, dann weiterhin kräftig zurückgebogen zur Stelle, wo die Hineindrehung am weitesten gediehen ist an der Hauptgleitfläche (der Mittelschenkel), worauf die Form mit gegengleicher Ausbildung mit Muldenscheitel etc. wieder in die ungestörte Lage im Kerne des liegenden Brettes zurückbiegt (Liegendschenkel). Und diese Faltenformen folgen sich in solcher Zahl aufeinander, als es solche Gleit-flächengruppen zwischen Gleitbrettern in diesem Raume gibt. Tafel I, 1 a.

Betrachten wir noch, ob diese Bewegungsform auch die bezeichnenden Mächtigkeitseigenschaften der liegenden Falten erklären kann; denken wir uns also durch die Zeichnung eine Schicht abgegrenzt und sehen wir nach, was aus ihr bei der Umformung wird. Dazu sei die Eigenart der einscharigen Gleitung wieder betont, daß sie alles unverändert läßt, was in ihrer Ebene liegt, also auch das Ausmaß der Schicht in der Gleitfläche gemessen. Die Mächtigkeit aber messe ich nach geologischer Übung immer senkrecht zur Schichtgrenze. Da letztere aber durch den Vorgang an den verschiedenen Stellen unter verschiedenen Winkeln zur obigen Unver-änderlichen steht, werde ich auch verschiedene Werte für die Mächtigkeit erhalten. Im undurchbewegten Kerne des Brettes erhalte ich die unveränderte Mächtigkeit; dort aber, wo die Schicht auf die Gleitfläche senkrecht steht, im Scheitel, messe ich die Mächtigkeit in der Richtung der Gleitung. Dort erscheint als Mächtigkeit eben die Unveränderliche, die Strecke, in welcher die Gleitrichtung unsere Schicht schnitt, also mehr als die Ur-sprungmächtigkeit. Der Scheitel erscheint verdickt. Gehe ich in den Mittelschenkel, so schließen wieder Meß-richtung und Gleitrichtung immer größere Winkel miteinander ein, ich erhalte daher wieder immer kleinere Mächtigkeiten. Und wäre in der Hauptgleitfläche die Gleitung unendlich groß gewesen, wäre hier vollständiges Hineindreuen der Zeichnung erfolgt, dann wäre hier die Mächtigkeit gleich Null, denn nur zwei zusamen-fallende Gerade erfüllen die Forderung, daß sie von einer dritten parallelen in zwei Punkten geschnitten werden, die einen bestimmten Abstand von einander haben. Der Mittelschenkel erscheint daher „reduziert“, im Grenzfall bis zu Null reduziert; und alle diese Erscheinungen werden durch eine denkbar einfache gleichsinnige Bewegung erzeugt, ohne daß wir dazu Sondervorgänge wie Anschoppung, Auswulzung, Ausquetschung etc. heranziehen müßten, bei denen wir immer an Verlagerung des Stoffes auf Bahnen entlang des Schichtverlaufes denken.

Diese Art der Faltung fügt sich also schön in unsere Sätze ein. Betrachten wir das Bild eines so gefalteten Phyllites, oder das Bild, das Heim, Vierteljahrschrift, Nat. Ges., Zürich 1900, T. 9, von Gneiß bei Dazio Grande gibt, so sehen wir in den Zügen der aufeinanderfolgenden Mittelseiten der verschiedenen Schichten die Lagen der Hauptgleitflächen, dazwischen die Platten, die die Hangend-Liegendschenkel umfassen, die Gleitbretter.

Dies ist der Vorgang der Umfaltung Sanders. Es ist wahr, daß vielfach die Gleitung Gelegenheit hat, nahezu in einer „s“-Fläche zu verlaufen, aber nicht dadurch, daß sie schon ursprünglich die „s“-Fläche benutzte, sondern dadurch, daß sie im Verlaufe der Umformung auf die besprochene Weise die „s“-Flächen in ihre Lage zwang. Das „s“ schließt sich der Gleitung an. Gerade die ungemeine Häufigkeit dieser Faltenformen spricht dafür, daß die Anisotropie der Gesteine durch „s“-Flächen nicht den oft behaupteten bedingenden Einfluß auf die Gleitflächenwahl haben kann, sie spricht dafür, daß Schnitte zwischen Gleitflächen und dem „s“ durchaus etwas häufiges sind. Es ist dabei noch zu beachten, daß mit diesen Umfaltungsformen nur etwa die Hälfte der Fälle zu erfassen sind, wo „s“- und Gleitflächen nicht übereingestimmt haben. Denn nur dann, wenn der spitze Winkel im Sinne der Bewegungsrichtung wies, entstehen deutliche liegende Falten mit Scheiteln. Gerade so oft wird aber der Fall vorgekommen sein, wo der „Pfeil“ des spitzen Winkels gegen den Bewegungssinn zeigte. Dann ist kein ausgesprochener Faltenbau zu erwarten, die Zeichnung wird einfach wellig mit stärkerem Anschluß an die Gleitflächenlage und Ausdünnung im Bereiche starker Durchbewegung, mit ursprünglicher Lage und Form in den Gleitbrettern. Diese flache Wellenform des ursprünglichen ist nun nicht sehr auffällig, ist aber auch außerordentlich häufig.

Dagegen kann man wohl zugeben, daß der Winkel zwischen ursprünglichem „s“ und der Gleitfläche meistens bemerkenswert klein war, daher auch die meist so bezeichnende spitze Form der liegenden Falten. Es ergibt sich daher induktiv eine Antwort auf unsere oben aufgeworfene Frage: Der Gang der Reibung in Abhängigkeit vom Winkel zwischen „s“ und der Gleitfläche dürfte ein stetiger sein.

Haben wir so einen Einfluß der Schieferung auf die Formänderung nur im beschränkten Maße zugelassen, so haben wir andererseits bis jetzt auch von einem Einflusse des Stoffes gar nicht gesprochen. Es war völlig gleich, ob der Vorgang sich in Schiefer abspielte oder in Kalk, ob die Schichtung in einem Wechsel verschiedener Gesteine bestand oder nicht. Es ist daher das was wir darstellten, ein Grenzfall. Es geschah aber dieses Absehen vom Gesteinsbestand einigermaßen mit Absicht. Es ist nämlich ein naheliegendes und deswegen meiner Ansicht nach oft mißbrauchtes Auskunftsmittel, irgendwelche tektonische Verwicklungen auf den Wechsel in der stofflichen Zusammensetzung des Gesteines zurückzuführen. Demgegenüber verlohnt es sich einmal zu betrachten, wie gering vielfach der Einfluß des Gesteinswechsels auf die Bewegungsform ist, was insbesondere für gewisse tektonische Gebiete, insbesondere für Tiefentektonik äußerst auffallend ist, wo ein und dieselbe Bewegungsform die verschiedensten Gesteine mit ganz geringen Unterschieden ergreift.

Es sei auf das ganz gleichartige Schicksal der Bewertung des Gesteinswechsels für die Morphologie hingewiesen. Auch hier wurde dieser anfangs für alle möglichen Formenmannigfaltigkeiten als Erklärungsgrund herangezogen; später aber folgte eine Richtung, die insbesondere darauf hinweisen konnte, wie unabhängig die Endformen von den Gesteinsunterschieden sein können (Davis). Damit war erst die Grundlage gegeben zu einer richtigen Einschätzung der Gesteinsunterschiede für die Oberflächengestaltung, es zeigte sich, daß ihre Einflüsse erkennbar sind, aber daß sie sich in einer anderen Größenordnung aussprechen, als man ursprünglich annehmen wollte.

Geradeso werden wir auch hier Einflüsse des Gesteinswechsels auf die tektonischen Formen erwarten, sie sprechen sich aber auch hier in einer niedrigeren Ordnung der Formen aus, als man von Anfang an erwarten möchte.

Unter den Einflüssen eines Gesteinswechsels fällt insbesondere einer auf.

Wir sehen oft in einem aus verschiedenen Schichten zusammengesetzten Gesteine die oben geschilderte aus Gleitbretterbildung hervorgegangene Fältelung. Ermitteln wir aus den Falten in den einzelnen Gesteinen die Richtung der Gleitflächenschar, so sehen wir, daß in allen die Gleitrichtung, die Lage der Gleitflächen dieselbe ist.

Der Unterschied im Gestein hat keinen Einfluß auf die Auswahl der Gleitflächenrichtung genommen, das heißt das Gestein ist unter solchen Verhältnissen umgeformt worden, daß an der Gesteinsgrenze kein Wandel im Beanspruchungsplane stattfand. Dagegen sehen wir fast ausnahmslos etwas anderes, nämlich die Regel der Stauchfaltengröße (Sander). In kleine, enge, liegende Falten ist etwa der Phyllit gelegt, anzeigend, daß in ihm die Bretterteilung eine sehr enge war, eine Kalk- oder Quarzitbank aber, die eingelagert ist, ist in große Schlingen gelegt, deren Form auffällig eine Vergrößerung der Phyllitfältelchen darstellt, aber ihre Bogen überspannen oft hunderte von ihnen. Tafel I, 2 a und b. Die Bretterteilung im Kalk ist also eine viel gröbere als die im Phyllit. Und unter Umständen, wo der Einfluß der Festigkeit des Stoffes auf die Auswahl der Gleitflächenrichtung ganz aus-

geschaltet war, hat sich sein uns noch unbekannter Einfluß auf die Gleitbretterteilung, vielleicht der Gang der Reibung mit der Bewegung, noch ganz ungestört erhalten, und zwar gilt dies bis hinab zu den Vorgängen äußerster Tiefentektonik. Wunderschöne Beispiele für diese Erscheinung liefern z. B. in den genannten Arbeiten Heims die Fälle aus den gefalteten Wechsellagerungen von Rötidolomit und Quartenschiefern.

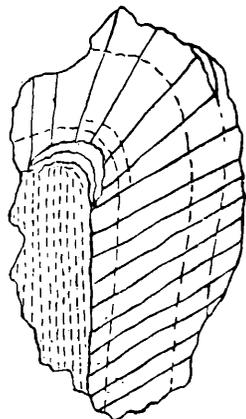


Fig. 6 a

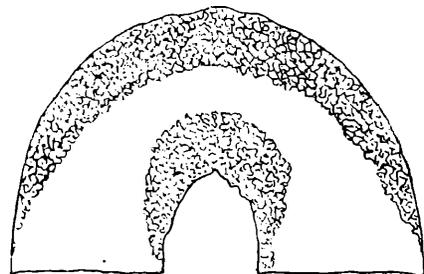


Fig. 6 b\*)

Neben diesem ganz allgemein auftretenden Einflusse des Stoffbestandes auf die Teilung der Gleitbretter finden wir aber doch Fälle, wo er auch die Auswahl der Lage der Gleitflächen beeinflusste, wo wir also beim Überschreiten der Grenze auch in einen Bereich mehr oder weniger abweichender Bewegungsrichtung kommen. Wenn Sander z. B. an dem Faltenbeispiele von der Schöberspitze, Schmirntal, Tscherm. Mitt., 1911, S. 288, „Trajektorienabbildung“ nachweisen konnte, so heißt dies, die Bewegungsform war in der Quarzitbank eine andere als im phyllitischen Nebengestein. Letzteres zeigt nach der Beschreibung zu schließen eine schöne, einscharige Umfaltung, die Faltung der Quarzitplatte kann man in dem Falle wirklich mit vollem Rechte als „Biegung“ bezeichnen, mit solchen Erscheinungen, wie sie bei einer nicht hohen Überschreitung der Elastizitätsgrenze zu erwarten sind. Insbesondere bezeichnend ist das gegensätzliche Verhalten von gezogener und gedrückter Faser, die Abgrenzung des Innenfeldes in der Umbiegung, die auffälligste Übereinstimmung mit gewissen Erscheinungen bei gebogenen Eisenproben zeigt. Fig. 6, a und b.

Wir ziehen aber hier mit Recht den Schluß, daß in der Quarzitplatte entsprechend der anderen Bewegungsform auch der Beanspruchungsplan ein anderer war als im Begleitgestein, daß er eben ähnlich war dem, wie wir ihn beim Vorgänge der Biegung uns vorstellen. Würde die Beanspruchung unter der Elastizitätsgrenze geblieben sein, so wäre mit dieser Formänderung eben ein recht genau bekannter Beanspruchungsplan verbunden, der der Biegung. Wird nun die Elastizitätsgrenze nicht viel überschritten, so verliert sich, wie gezeigt wurde, diese Bindung, aber nicht sofort vollkommen, ein Teil der Formänderung ist immer elastisch, das Verhältnis des elastischen Anteiles der Formänderung zum nicht elastischen wird aber mit steigender Beanspruchung immer ungünstiger. Ist aber für einen Bestandteil eines Gesteinskörpers die Elastizitätsgrenze noch nicht viel überschritten, dann kann er recht wohl einen Beanspruchungsplan aufweisen, der dem noch mehr oder weniger ähnlich sieht, den er angenommen hätte, wenn er dieselbe Formänderung rein elastisch hätte mitmachen müssen. Es können nebeneinander wie in obigem Beispiele verschiedene Stoffe, der eine eine rein einscharige Umformung aufweisen, anzeigend, daß in ihm der Beanspruchungsplan sich zur vollkommenen Schlichte entwickelt hat, — für diesen ist die Elastizitätsgrenze schon weit überstiegen — ein anderer zeigt aber seine eigenwilligen Bewegungen, er ist nicht hoch über der Elastizitätsgrenze\*\*).

Sehr schöne Beispiele zeigen die Schiffe Heims aus den Verfaltungen von Rötidolomit und Quartenschiefern l. c. Ich habe sie oben als schöne Beispiele für einscharige Umformung angeführt. (Es gilt dies nicht für alle seiner Beispiele.) Bei genauerer Betrachtung zeigen sich aber doch Abweichungen, insbesondere der Rötidolomit zeigt in der Ausbildung seiner Gleitbahnen Eigenwilligkeit.

Das Auffälligste ist, daß die Scheitelmächtigkeiten seiner Platten größer sind, als es nach der Ableitung der liegenden Falten mit der Einscharigkeit der Gleitung der Fall sein sollte, oder daß sich im Kerne der Scheitel virtuelle Hohlräume gebildet haben, die mit Quarz ausgefüllt sind. Dabei zeigt sich, daß auch die Umformungen des Dolomites einscharig sind, aber die Gleitflächen haben eine etwas andere Lage als im Quartenschiefer; aus der gegengleichen Lage in den aufeinanderfolgenden Faltschenkeln läßt sich entnehmen, daß immer noch die Biegungsbeanspruchung sich im Plane des Dolomites in Resten abspiegelt, daß also in diesem Dolomit noch beachtenswerte Anteile elastischer Spannung vorkamen. Vergleicht man aber diese Dolomitfalten mit dem obigen Beispiele Sanders, so findet man, daß bei jenen der Anschluß an reine Einscharigkeit schon viel weiter gediehen ist, als bei diesem, das Verhältnis von elastischem Anteil zu nicht elastische bei jenen viel geringer ist. Allerdings ist dabei auch der Unterschied im Material zu beachten.

\*) Nach Fischer, Kruppsche Monatshefte 1923, 83.

\*\*\*) Vergleiche hiezu den Absatz „Streckung an Gesteinsgrenzen“ in Sander „Zur petrographisch-tektonischen Analyse“, Jb. Geol. Bundesanstalt 1923, 212.

Sehr schöne Beispiele hierfür lassen sich auch aus der Grauwackenzone der Ostalpen geben. Sie hat eine Umformung mitgemacht, bei der die Beanspruchung so hoch war, daß der elastische Anteil der Beanspruchung für Kalk kaum stärker in Betracht kam als der für Schiefer. Die weich geschwungenen Kalkbänke fügen sich dem Bewegungsplane des Schiefers vollkommen ein, zeigen nur Unterschiede in der Teilung der Gleitbretter. Tritt aber ein Dolomit oder gar ein Magnesit in den Kalken auf, so sieht man, daß dieser immer einen Fleck abweichender Bewegungsverhältnisse bildet. Sehr häufig finden wir, daß ein Magnesit die Bewegungsbahnen, die den umgebenden Kalk weich ausgeschmiert haben, gar nicht annahm, er bildete seinen eigenen Beanspruchungsplan aus, der meines Erachtens nach bis zum Auftreten von Zugspannungen führen konnte. Gerade bei solchen Magnesiten finden wir noch am ehesten Fälle, die wir als tektonische Zerreibungen ansprechen können, wo ein ehemals wohl zusammenhängender Magnesitstock in einzelne Brocken auseinandergezerrt wurde, die perlschnurartig in einem ausgezogenen Kalkbände drinnenstecken, ähnlich den zerrissenen Belemniten im Schiefer, die uns Heim zeigte, wo ja auch die Ursache eine ähnliche ist. Es lassen sich auf diese Weise sehr schöne Feststellungen über die Größe der Beanspruchung machen, und es wäre eine Einreihung der einzelnen regionalen Umgestaltungstypen nach der Höhe der Beanspruchung recht wohl möglich, je nachdem der Wechsel im Stoffe die Bewegungsrichtungen beeinflußt — dann ist man nicht sehr weit von der Elastizitätsgrenze des Stoffes, in dem die Abweichungen auftreten, entfernt — oder -ob er die Bewegungsrichtung ungestört läßt, nur die Verteilung der Gleitung auf die einzelnen Flächen der Schar beeinflußt, dann kommt der elastische Anteil der Spannungen gegenüber dem nicht elastischen kaum in Betracht.

In dieser Beziehung sind die Unterschiede der Tiefentektonik von der Oberflächentektonik sehr ausgesprochen; in jener Gleitflächenlage sehr unbekümmert um Gesteinswechsel, daher die Fließformen, in letzterer Eigenwilligkeiten der einzelnen Gesteinskörper in zunehmendem Maße auffallend.

Es läßt sich an diese Erörterungen mit Vorteil die Besprechung eines Falles anschließen, auf den schon einmal hingewiesen ist, den ich den Fall der stehenden Falten oder Knickfalten nennen will.

Voraussetzung für unser Gesetz der Einscharigkeit war, daß der Beanspruchungsplan in dem geologischen Körper ein schlichter ist, und es ist auch einigermaßen naheliegend, daß bei großzügig angelegten Fernkräften und bei über ganze Flächen verteilten Widerständen der Beanspruchungsplan diese Eigenschaft hat. Doch nicht immer ist diese Forderung erfüllt und mit einem geologisch wichtigen Falle, wo schlicht angeordnete äußere Kräfte einen unschlichten Plan erzeugen hat uns die Mechanik bekannt. Siehe Smoluchowski, „Über ein gewisses Stabilitätsproblem der Elastizitätslehre und seine Anwendung auf die Entstehung von Faltengebirgen“ Bull. ac. d. sc. Krakau 1909. Siehe auch Schmidt, „Zur Anwendung der Smoluchowskischen Ableitung auf die räumliche Periodizität in der Tektonik.“ Verh. G. R. A. 1914.

Smoluchowski behandelt den Fall einer ausgedehnten Platte, die auf Wasser schwimmt. (Ganz ähnlich wirkt auch Einbettung in ein anderes Gestein.) Sie werde in ihrer Längsrichtung von Druckkräften beansprucht. Nun zeigt sich, daß die elastische Umformung zu einer Wellenform führt, mit mehr oder weniger zahlreichen Wellen, wenn die Druckbeanspruchung eine gewisse Grenze übersteigt. Die elastische Linie der Platte ist dann eine Sinuslinie, die Länge der einzelnen Wellen ist abhängig von der Dicke der Platte und vom Stoffe von Platte und Umgebung. In diesem Falle sehen wir, daß die ursprünglich schlichte Anordnung der äußeren Kräfte zu einem unschlichten Beanspruchungsplane geführt hat, nämlich zu einem regelmäßig wechselnden, er ist in einzelne Felder geteilt, entsprechend Wellental und Wellenberg der Sinuslinie, wo er abwechselnd immer gegensätzliche Lage hat. (Ist diese Form einmal ausgebildet, dann ist auch die Anordnung der äußeren Kräfte nicht mehr schlicht, die Widerstände der Umgebung haben unter dem Wellental eine andere Größe als unter dem Wellenberg.)

Dieser Knickfall — denn dazu gehört diese Erscheinung — ist nun der Ausgang für die stehenden Falten. Wenn durch Steigerung der Belastung aus dem bisher elastischen Beanspruchungsfalle ein überelastischer wird, so ist anzunehmen, daß solange noch erhebliche elastische Anteile der Beanspruchung vorhanden sind, diese Felderteilung des Beanspruchungsplanes nicht sofort aufgehoben wird. Dann kann aber eine einheitliche Gleitflächenschar nicht den Plänen der einzelnen Felder entsprechen, sondern ein jedes Feld bildet seine eigene Schar aus, die in benachbarten Feldern gegensätzlich gelagert sind. So entstehen die Formen der stehenden Falten, wie sie in gewissen Gebieten das geologische Bild beherrschen, im Jura, Dalmatien. Natürlich ist jetzt von einer reinen Sinusform nicht mehr die Rede, die Gestalt hängt ja davon ab, wie weit die einzelnen Gleitbewegungen gegangen sind, und das hängt nicht mehr vom Beanspruchungsplane ab. Wir haben hier Formen von den breiten Kofferfalten des Jura bis zu ganz spitzen Dachfalten, wie sie in gewissen Gebieten kristalliner Schiefer auftreten.

Welche Bedingungen müssen nun herrschen, damit solche Knickfalten entstehen?

Die eine, daß die Elastizitätsgrenze nicht viel überschritten sein darf, haben wir schon erwähnt. Nur wenn in den einzelnen gekrümmten Stellen wirklich ein der Biegung entsprechender Beanspruchungsplan auftritt, kann sich diese Felderteilung erhalten. Voraussetzung ist ferner der Aufbau des Gesteinskörpers aus einzelnen, mechanisch mehr oder weniger selbständigen Platten von nicht zu großer Dicke, es muß geschichtet sein. In der Formel tritt nämlich das Trägheitsmoment des Querschnittes der Platte in der dritten Potenz auf, der Einfluß der Mächtigkeit auf die Grenzkraft, bei der diese Felderteilung zuerst auftritt, ist also ein sehr starker, es können also nur verhältnismäßig schwache Schichten diese Erscheinung zeigen. Während für die liegenden Falten Schichtung etc. nur soweit erforderlich war, als wir ohne sie die Formänderung nicht hätten erkennen können, ist sie hier Grundbedingung.

Ferner haben wir noch als Bedingung für die Knickfaltung eine Druckbeanspruchung von außen, also druckleitungsfähiges Gestein. Es ist also die Knickfaltung eine durchaus scharf umrissene Umformungserscheinung, die aus ihrem Vorkommen wertvolle Schlüsse auf die Umformungsbedingungen zuläßt, Beanspruchung nicht hoch über der Elastizitätsgrenze, Druckleitung etc.

Demgemäß sehen wir auch das Auftreten solcher Knickfalten streng regional begrenzt und für gewisse tektonische Einheiten bezeichnend, wie die oben erwähnten, zu denen ich noch gewisse Deckengebiete rechnen möchte wie Chablais-Freiburger Alpen, vielleicht gewisse Gebiete aus der baiuvarischen Zone der Kalkalpen.

Wir haben hier die stehenden Falten streng von den liegenden geschieden, deswegen, weil sich ihr Bewegungsvorgang grundsätzlich unterscheidet. Es steht dies im Gegensatz zu den geläufigen Anschauungen, wie sie besonders von Heim vertreten werden, wonach die stehende Falte die Ausgangsform für die liegende ist, die dadurch aus jener entstehe, daß die Gleitflächenschar des einen Schenkels zugunsten der des anderen unterdrückt werde. Und es ist wirklich auffällig; wir haben dort den regelmäßigen Wechsel der Felder im Beanspruchungsplane, hier den ebenso regelmäßigen von Gleitbrettern und durchbewegten Platten. Was liegt näher als zwischen beiden Regelmäßigkeiten, eine Verbindung zu schlagen und zu sagen, die Teilung der Gleitbretter stamme noch aus der Zeit, wo die Beanspruchung gering, der Beanspruchungsfall der Smoluchowskische war. Dazu kommt noch eine weitere Übereinstimmung. Wir haben bei liegenden Falten das Gesetz der Stauchfaltengröße kennen gelernt, daß die Bretterteilung abhängig ist vom Stoffe, in Schiefen enge, in Quarziten weit ist. Dieselbe Erscheinung tritt auch bei stehenden Falten auf, hier nach der Smoluchowskischen Ableitung leicht erklärlich, daß ein Schiefer mit seinen schwächtigen Schichten, die ein geringes Trägheitsmoment des Querschnittes haben, engere Felderteilung aufweist als eine starke Kalk- oder Quarzitbank.

Es soll also diese Erklärung der Gleitbretterteilung — wir konnten oben ja keine andere geben — voll gewürdigt werden. Es wäre der Vorgang dann so, daß bei wachsenden äußeren Kräften zuerst ein Beanspruchungsplan entstände mit der geschilderten Teilung in wechselweise gelagerte Teilpläne. Bei weiterwachsender Belastung muß ein Zustand eintreten, wo die elastischen Anteile der Beanspruchung gegenüber der gesamten schon so gering geworden sind, daß sich die Felderteilung nicht mehr aufrechterhalten ließe, der Beanspruchungsplan wandelt sich in einen schlichten um, die Gleitflächenlage ist diesem neuen entsprechend. In ihrer Verteilung finden wir aber noch ein Erbe aus einer früheren Zeit erhalten, den regelmäßigen Wechsel zwischen Gleitbrett und Gleitfläche.

Es seien hier aber auch Bedenken nicht verschwiegen. Das erste ist, daß wir ganz ausgesprochene Gleitbretterbildung auch bei Gesteinen finden, die wegen Mangel an Schichtung ganz ungeeignet erscheinen, Knickfalten anzunehmen, z. B. bei Graniten. Weiters erzeugt die periodische Knickung die Teilfelder mit Grenzen senkrecht zum Hauptdruck. Die Teilung der Gleitbretter hat die Grenzen parallel den Gleitflächen, also schräg zum Hauptdruck, wir müssen also für den Übergang aus dem einen in den anderen Fall ein Verschwenken der Grenzen annehmen. Weiters finden wir das Gesetz der Gleitbretter überall in der Tiefentektonik geradeso wie in der Oberflächentektonik, wo doch gerade für Tiefentektonik es sehr zweifelhaft ist, ob hier die Grundbedingung für die Knickfaltung, nämlich die Möglichkeit einer nennenswerten elastischen Beanspruchung überhaupt vorhanden ist.

Mit liegender und stehender Falte, mit der Scherfläche als Überschiebungsfläche, Verwerfung, Blatt, haben wir eigentlich den ganzen Teilformenschatz der Tektonik erschöpft.

Wir stehen vor der anderen Frage: Wie verträgt sich die Vorstellung der Großtektonik mit unseren Gesetzen?

Die ältere Tektonik hat für die Mannigfaltigkeit des Formenschatzes weitgehende Freiheit in Art und Richtung der Bewegung angenommen. Als Richtlinie galt vielfach, mit möglichst geringen Bewegungsweiten aus-

zukommen. Es kam dann die Deckenlehre mit ihr die Forderung nach Einheitlichkeit des Vorganges. Und betrachten wir diese Einheitlichkeit, wie die Deckenlehre sie sieht, so erkennen wir, daß unser Einfachheitssatz von der Einscharigkeit der Bewegung nichts anderes ist als die geometrische Beschreibung eben dieser Einheitlichkeit.

Um so mehr erscheint aber ein Eingehen auf die mechanischen Vorstellungen der Deckenlehre erwünscht.

Die Deckenlehre arbeitet mit Einzelkörpern, den Decken, die ja durch den Gesteinswechsel gekennzeichnet, dem Geologen zunächst als Einzelkörper entgegentreten, die er getrennt behandelt, deren jeder er auch ihre eigene Geschichte zuschreiben möchte, eigenen Bewegungszustand, womöglich eigene Bewegungsursache, eigene Wurzeln, aus denen jede für sich ihren Bewegungsanstoß erhält.

Dabei ist das Bild einer Decke das einer liegenden Falte, die über die Unterlage hingeschoben wird. Von der „Nappe“ stammen die meisten Vorstellungen über den Bewegungsvorgang in einem solchen Gesteinskörper. Nun sind aber gerade aus zu weitgehender Auswertung des Bildes der Tuchfalte Vorstellungen über den Bewegungsvorgang einer Deckfalte entstanden, die einer Untersuchung und Einschränkung bedürfen. Der Bewegungszustand des Hangendschenkels einer Tuchfalte, die vorgeschoben wird, ist als bildliche Beschreibung der Bewegung im Hangendschenkel der Deckfalte einigermaßen zutreffend, die Einzelpunkte bewegen sich in gleichlaufenden Bahnen. Am Scheitel der Falte sehen wir aber bei der Tuchfalte ein ausgesprochenes Rollen, es ist dies ja nicht anders möglich; durch Kette und Schuß sind ja im Tuche die Abstände der einzelnen Punkte entlang der Tuchfläche gemessen vollkommen festgelegt, jeder Punkt muß beim Fortschreiten der Falte aus dem Hangendschenkel in den Mittelschenkel übergehen, was eben durch das Wälzen im Scheitel geschieht. Und diese Vorstellung des Wälzens in der Stirnregion hat sich auch auf die Decken der Tektonik übertragen. Man trifft fortwährend Anschauungen, die das Niedersteigen von Punkten des Hangendschenkels in den Mittelschenkel betonen, auf Bahnen, die dem Umriß der Decke gleichlaufen. Die schön geschwungene Form der Deckenstirn nimmt so gefangen, daß es zunächst gar nicht einfällt, hier nicht bloß eine umgeformte vorgezeichnete Schicht zu sehen, sondern man faßt diese Kurve unwillkürlich als eine Bewegungsbahn auf. Dazu kommt noch die große Zahl der Einfaltungen, Einwicklungen etc., die scheinbar das Wälzen unmittelbar beweisen.

Wohl wäre auch das Wälzen eine Form einschariger Gleitung, die Bahnen durchschneiden sich dabei ja nicht, doch ist dies eine Form, die, wenn man einen einfachen Bewegungsplan aus einem einfachen Beanspruchungsplan erwartet, nicht gerade ansprechend ist. Es wirft sich daher die Frage auf, wieweit wir für die Stirnregion ein Wälzen annehmen können. Es hängt damit die Frage zusammen, wieweit eine Decke ein für sich abgeschlossener Bewegungskörper ist, denn eben durch das Wälzen um die Stirne erscheint der Bewegungsplan einer Decke scharf gegen die Umwelt abgesondert.

Es ist die Antwort schon durch die Besprechung der liegenden Falten gegeben, dort konnten wir feststellen, daß ein einfacher einschariger Gleitvorgang durchaus ausreicht, um das Faltenbild zu erzeugen, sofern nur die Gleitgeschwindigkeit sich nach einem naheliegenden Gesetze auf die einzelnen Flächen der Schar verteilt. Genau gleich können wir auch eine Schubdecke auffassen, die Deckenbahn ist dann die Hauptgleitfläche, begleitet im Hangenden von Nebenflächen, an denen der Gleitbetrag immer weiter abnimmt. Und die Art dieser Abnahme bedingt den Stil des betreffenden Deckenbaues, von dem Schollenstil der tirolischen Kalkalpen, wo von Nebenleitflächen fast keine Rede ist, zu dem weichen der helvetischen Serie, wo neben der kräftigen Hauptscherfläche die Nebenflächen schon stark entwickelt sind, zum Schlierenstil des Pennin, wo die Abnahme des Gleitbetrages von der Hauptfläche weg recht langsam erfolgt.

Und da die Gleitflächenschar die Schichtung spitz schnitt, so formte der Gleitvorgang die Schichtung in gerade derselben Weise zu einer liegenden Falte um, wie wir es früher gesehen haben, ohne daß im Scheitel ein Wälzen stattzufinden braucht, kein Gesteinspunkt braucht die Platte, in der er sich befindet, zu verlassen und in eine tiefere hinabzusteigen. Im Scheitel können die Bewegungen geradeso hinauslaufen wie im übrigen Teile, die Schichten schneidend und hinauszielend in die Füllmasse.

Es ist ein eigenartiges Ding, diese Füllmasse. Für die gewöhnliche Betrachtungsweise zählt eine Decke soweit als sie im Profil rot oder grün angestrichen ist, soweit als sie im Felde massige trennbare Gesteine zeigt, an denen eine Form erkennbar ist. Und davor liegt eine Masse violett oder gelb, eine Masse, die im Felde nur Ärger und Unbefriedigung erzeugt, weil in ihr Trennungen zu ziehen fast unmöglich ist. Von ihr sieht man gerne weg, die Decken haben sich in sie „hineingebohrt“. Es sind aber dies ausnahmslos Massen, die dem Deckenbaue selbst angehören, die als hangendste Glieder der einzelnen Decken selbst gebracht worden sind; bevor man also Aussagen über den Bewegungsvorgang selbst macht, sollte eine Trennung dieser Füllmasse, ihre Aufteilung auf die einzelnen Decken des Gebirges erfolgt sein, wie es die Schweizer mit der Zuteilung des Prättigauer Flysches zur Margna

schon gemacht haben. Dann sieht man aber, daß das, was man gemeiniglich Deckenstirne nennt, ein recht weit zurückliegender Teil der Decke ist, für den eine Wälzbewegung schon gar nicht mehr am Platze ist. Eine andere Frage ist, was an der eigentlichen Stirne vor sich ging, draußen, wo der Kopf aus Flysch in die Luft hinausfuhr, welche Stelle im Gebirgsbau kaum je erhalten ist. An dieser Stelle haben unsere Ableitungen über einschariges Gleiten keine Berechtigung mehr. Es ist die Bewegung hier nicht mehr einem stationären Fließen zu vergleichen, sondern dem vorschreitenden Kopfe einer Mure.

Hier könnte man noch am besten ein Wälzen sich vorstellen, aber gerade das Bild eines Murenkopfes zeigt eigentlich nicht das Bild des Wälzens, sondern nur das Bewegungsbild eines Sammels der Gleitflächenschar nach unten zur Hauptgleitfläche; am Kopfe ist die Bewegung keine differentielle, sondern eine un stetig gegen den Untergrund abgesehene. Dafür spricht insbesondere, daß aus dem Murenkopf so gut als kein Geröll auf der Murbahn zurückgelassen wird, sie ist immer reingefegt. Ähnliches möchte ich auch für den Deckenkopf annehmen, auch für ihn erscheint nicht das Wälzen das Wahrscheinliche, sonst müßten wir viel mehr Gestein von ihm in dem Mittelschenkel vorhanden sehen, als es in der Regel der Fall ist. Wie gesagt, gilt dies aber für die eigentliche Stirne der Deckenmasse, deren Beobachtung für uns kaum möglich ist; das, was wir gemeiniglich Decke nennen, ist ein oft weit zurückliegender Teil, wo die Grenzbedingungen schon vollständig ausgeklungen sind, und hier reichen wir für die Erklärung mit einfacher einschariger Gleitung vollkommen aus. Dadurch wird die Deckenbewegung ein einfaches Fließen mit gleichlaufenden Stromfäden der Tiefstelle des Potentials zu.

Damit wird auch die Bewegungsform eines ganzen Deckengebirges eine durchaus andere als sonst. Gegenüber der Auffassung der Selbständigkeit der einzelnen Decke können wir ganze Deckenstöße zusammenfassen mit einheitlichem einscharigem Bewegungszustande, Bewegungshorizonte, in welchen jeweils die hangende Platte der liegenden in gleichem Sinne vorausleite. (Sander.) Nur hat auch in ihnen das Gesetz der Gleitbretter gewirkt, es wechseln Platten starker Durchbewegung mit solchen schwacher und diese Unterschiede formen erst die Schichten zu den liegenden Faltenformen um. Also die Faltenform nicht als Ausgang, sondern als Folge des Bewegungsvorganges gedacht. Daß mit dieser Anschauungsweise auch die ganze leidige Wurzelfrage gegenstandslos wird, sei in diesem Zusammenhange nur kurz erwähnt.

Betrachten wir die Profile, die Heims „Geologie der Schweiz“ liefert, so sehen wir, daß sie vollkommen als solche Endformen von Fließvorgängen empfunden sind, weitestgehend können wir ihre Decken zu solchen gleichsinnigen Bewegungshorizonten zusammenfassen, es gibt nur eine Stelle, die sich nicht in das Bild einfügt, wo wir einer Decke ein Eigenleben zusprechen müßten, und das ist die Monte Rosa-Surettadecke, die nach der Überdeckung der Bernhardecke durch die Dent Blanche-Magna zwischen diese beiden eingedrungen sein soll, wo also eine Platte rascher als Liegendes und Hangendes nach Norden vorgedrungen sei. Es ist nicht recht ersichtlich, was zu dieser Einstellung im Wallis geführt hat, da gerade die Mischabelrückfalte zusammen mit den Gneiszügen des Val-Tournanche eine Bewegungsform zeigen, die die hangende Dent-Blanchedecke nicht mitgemacht hat, die sich also leichter erklären lassen, wenn man das Eindringen der Monte Rosadecke vor das der Dent-Blanche setzt. Gewichtiger ist aber die Formgestaltung der Suretta in Graubünden. Nach Heims Profilen zeigt sich deutlich nicht bloß ein Voreilen vor dem Liegenden, sondern, wie es die nach Süden überliegenden hangenden Rofnagneisflammen im Avers, Rofna, Piz Grisch etc. zeigen, auch eines gegen das Hangende. Gerade für diese Stelle hat aber O. Wilhelm „Die Eisen-Manganerzlagerstätten des unteren Aversertales“, Zeitsch. f. Prakt. Geol. 1922, die Ansicht ausgesprochen, daß diese so widerhaarigen Gneislinsen gar nicht der Surettadecke angehören, sondern der Margna, wodurch es überflüssig wird, der Suretta — nach Wilhelm jetzt Timundecke geheißten — ein Voreilen gegenüber der Margna zuzuschreiben. Es zeigt sich also, daß eine Neuuntersuchung der Gründe, welche dazugeführt haben, der Monte Rosa-Surettadecke diese die Einheitlichkeit störende Sonderstellung zuzuschreiben, recht wohl am Platze wäre.

Es ist gerade bei diesen Deckenprofilen recht gut möglich, die Bewegungsbahnen, welche zu ihrer Ausbildung führen, in Stromlinien darzustellen. Siehe Tafel I, Fig. 3a und b, Fig. 4a und b.

Es ist klar, daß unser Wahrscheinlichkeitssatz von der Einscharigkeit der Gleitflächen bei einer Erscheinung von solcher Weitläufigkeit, wie die Deckenbewegung eine ist, sich gewissen verwickelnden Abänderungen unterwerfen muß. So sei hier hauptsächlich auf eine Erscheinung hingewiesen. Die Gleitflächenschar hat sich frühzeitig im Laufe des geologischen Geschehens entwickelt. Durch den Gleitvorgang ist der Gesteinskörper auf Wanderung gegangen, es ist dabei unvermeidlich, daß er bei den weiten Wegen auch in andere Lagen zu den angreifenden

Kräften gelangt, daß also sein Beanspruchungsplan sich ändert. Wenn er aus einer solchen Lage sich sein Gleitflächensystem neu ausbilden würde, würde dieses wahrscheinlich eine andere Lage annehmen. Wir sollten daher erwarten, daß im Laufe des Bewegungsvorganges an Stelle der ursprünglichen Gleitflächen neue herangezogen und die ursprünglichen stillgelegt werden. Die Natur zeigt aber etwas anderes, nämlich daß im Laufe eines andauernden Bewegungsvorganges einmal eingeschlagene Gleitwege zähe beibehalten werden — wenigstens gilt dies für nicht zu tiefliegende Tektonik, z. B. für die der helvetischen Serie (ob dasselbe auch für die Tiefentektonik des Pennin angenommen werden darf, steht noch aus). Man sieht aber, daß in diesem Falle die Unstimmigkeit des herrschenden Gleitflächensystems mit dem augenblicklichen Beanspruchungsplan dadurch wettgemacht wird, daß eine Hilfsgleitflächenschar auftritt, die mit demselben tektonischen Streichen, mit demselben Verschiebungssinn, aber mit anderer Lage wirkt, deren Aufgabe es ist, die örtlichen Unstimmigkeiten auszugleichen. *Minor thrusts*.

Besonders groß wird die Unstimmigkeit der Hauptgleitflächen mit der Anordnung der äußeren Kräfte dort werden, wo eine Gleitmasse zum Teile den Ort niedrigsten Potentials überschritten hat, wo der Sinn der wirkenden Kräfte sich umkehrt, also besonders im Übergange aus dem Deckenrücken in eine brandende Stirne. Regelmäßig sehen wir dort, wie die am Rücken schön einheitlichen Bewegungsbahnen verwickelt werden, wie neben den flachliegenden Hauptgleitflächen steilstehende Hilfsgleitflächen immer mehr Bedeutung erlangen, die in der Stirnregion dann die Hauptflächen an Wirksamkeit übertreffen und mit schön ausgebildeter Gleitbretterteilung die schrägere Falten der Stirne bilden. Durch die Zähigkeit, mit welcher einmal eingeschlagene Gleitbahnen beibehalten werden, werden vielleicht Fälle erklärlich, in welchen die Bewegungsbahnen in zwei Körpern, die erst im Laufe der geologischen Geschichte miteinander in Beziehung gekommen sind, auffällig verschieden sind, wenn der erste nämlich seine Gleitbahnen bereits mitgebracht hat, der zweite sie neu entwickelte. Die Profile der Glarneralpen zeigen schöne Beispiele hiefür. Wir haben den Bewegungskörper der helvetischen Decken mit einer Schar von sich flach nach N senkenden Gleitflächen. Darunter den Körper des Autochthon samt eingewickelter Wildflysch wieder sehr schön einscharig durchbewegt, aber seine Flächen haben eine durchaus andere Lage, sie steigen gegen N an. Es ist bezeichnend, daß gerade dort, wo die beiden Bewegungsbereiche mit verschiedener Bewegungsrichtung scharf zusammenstoßen, das Mischgestein des Lochseitenkalkes auftritt. Daß dabei die Beanspruchungspläne beider Felder nicht verschieden waren, zeigt sich insbesondere daran, daß dort, wo im Deckenteile Hilfsgleitflächen auftreten, wie z. B. im Profil des Faulen schön zu sehen, Tafel I, Fig. 4, sie genau die Lage der Gleitflächen im liegenden Flysche haben. Es ist die Vorstellung von den Hilfsgleitflächen eine aus der Induktion gewonnene Durchbrechung des Satzes von der Einscharigkeit der Umformung, diese findet aber nur dort statt, wo man annehmen muß, daß der Beanspruchungsplan sich wesentlich geändert hat, und zwar sei besonders betont, im Laufe eines ununterbrochenen Umformungsvorganges. Hat die Umbildung dagegen eine wesentliche Unterbrechung erfahren, so bietet sich ein anderes Bild.

Nicht alle tektonischen Profile lassen sich als das Ergebnis eines einscharigen Gleitvorganges, den wir bisher geschildert haben, erklären, so ist es z. B. vollkommen unmöglich, Spenglers Profil durch die Kalkalpen des Salzkammergutes auf diese Weise zu behandeln. Es ist aber bezeichnend für den Glauben der Tektonik an die Einfachheit des einzelnen Bewegungsvorganges, daß man in diesem Falle nicht zu einer einheitlichen verwickelten Bewegung greift, sondern zu mehreren Bewegungsphasen, die jede für sich einfach, nämlich einscharig, nacheinander denselben Körper erfaßt haben. Daß dieser Glaube auch in der Regel das Richtige trifft, sieht man aus den Bestätigungen, die sich für die Mehrphasigkeit aus der Fazieslehre, Geröllbildung etc. ergeben haben.

Daß aber die Mehrphasigkeit in diesen Fällen den durch einen einphasigen einscharigen Vorgang nicht aufhellbaren Bau erklären kann, kommt davon, daß die folgende Phase nicht den Bewegungsplan der vorigen wieder aufnimmt, sondern, da sich in der Zwischenzeit die äußeren Kräfte doch geändert haben, sich neue Bewegungsbahnen auswählt. Wenn wir also für den Einzelnvorgang irgendwelche Einflüsse erschlossen haben, die dahin wirken, daß eine einmal eingeschlagene Gleitfläche möglichst lange benützt wird, scheinen in der Zwischenzeit zwischen den Phasen Vorgänge zu wirken, die diese Bevorzugung wieder aufheben. Es liegt nahe, dabei an gewisse Rekristallisationsvorgänge zu denken, wie wir sie später bei der „Abbildung“ kennen lernen werden, die Sander richtig als Erstarrung des tektonischen Gefüges bezeichnet. Aus dem Grunde, weil bei Tiefentektonik vielleicht diese Rückbildungsvorgänge schon während der Dauer der Einzelbewegung beträchtliche Wirkung ausüben können, wurde der oben gestellte Vorbehalt ausgesprochen, daß in ihr vielleicht kein solches Festhalten der einmal eingeschlagenen Bewegungsbahn vorkommen dürfte.

Zu den bezeichnendsten Formen solchen mehrphasigen Baues möchte ich wenigstens einen Teil der „Einwicklungen“ zählen. Sie werden gewöhnlich als Folgen der Wälzbewegung an der Stirne der Decke angesehen, die wir, wenn auch nicht ganz ausschließen, doch als recht unwahrscheinlich bezeichnen mußten.

Der größte Teil der Einwicklungen scheint im Gegenteil durch eine Mehrphasigkeit des Vorganges hervorgerufen zu sein. Es hat die erste Phase einen Deckenstoß übereinander gebreitet. Eine folgende bildete sich ihren Bewegungsplan neu, wieder eine einscharige Gleitung, aber die Richtung der Gleitflächen ist eine andere, entsprechend den jetzt anderen Angriffen der äußeren Kräfte. (Es ist dabei eigenartig, daß diese neuen Flächen fast stets in der Bewegungsrichtung stärker ansteigen oder weniger sinken als die ursprünglichen.)

Wir haben oben ausgesprochen, daß nicht der Unterschied in der räumlichen Verteilung des Gesteins das Bedingende für die Bewegungsform der Decken sei, sondern daß die Bewegungsform das Ursprüngliche sei, nämlich die Gleitbretterbildung, und daß die Deckenform, die Form der Gesteinsgrenzen, erst eine Folge dieser Bewegungsform sei. Wir haben uns dabei also wieder auf den Standpunkt gestellt, daß der Einfluß des Stoffes auf die Wahl der Bewegungsbahnen gering sei, so gering, daß der für die Zwecke der Großtektonik, wenigstens der Tiefe, billig vernachlässigt werden kann.

Einen Beweis für die Zulässigkeit dieser Annahme sehe ich darin, daß bei einer Zweitphase, wenn neue Gleitflächenlagen erwählt werden, die Deckenkörper für den Geltungsbereich dieser neuen Scharen keine Bedeutung haben. Schräg durch verschiedene Decken werden die neuen Gleitbretter geschnitten, die in Zukunft jedes für sich gleiten. Wieder liefern hierfür die Schweizer Profile sehr schöne Beispiele. Siehe Tafel I, Fig. 3 u. 4.

Betrachten wir die für die Endphase aufgestellten Stromlinien der Glarner Profile, so zeigt sich eine eigenartige Stelle vor der Stirne der Axendecke. Es hat sich die Axendecke in die darüber und davor liegende Säntis-Drusbergdecke „hineingeböhrt“. Bestreben wir uns, diesen bildlichen Ausdruck des „Hineinbohrens“ geometrisch zu erfassen, so heißt dies, es gehen die Teile der Säntisdecke, die vor der Axenstirne liegen, mit dem Bewegungskörper der Axendecke mit, die ursprüngliche Gleitflächenschar der Säntisdecke ist abgestorben, die Falte des Breitkamm vor dem Deyenstock, vielleicht auch die des Brünnelstockes im Oberlappen der Säntisdecke sind eigentlich mechanisch Stirnübergangsbiegungen der Axendecke. Es gehen also die Stromlinien der Jungbewegung der Axendecke unbekümmert um alle Gesteinswechsel schräg durch die Säntisdecke durch.

Genau dasselbe sehen wir im Nachbarprofil durch den Faulen, auch hier setzt das Jungbewegungssystem der Axendecke durch die Säntisdecke durch, der Hangendlappen der letzteren, des Fläschberges-Fluhbrig, fügt sich so schön vor die Stirne der Axendecke an, daß wir nicht zweifeln können, daß dieselben Gleitbahnen aus der Axendecke schräg durch die Säntisdecke durchreichten.

Die Folge solchen Durchgreifens des neuen Bewegungsplanes durch mehrere Einheiten des alten sind nun die mannigfachsten Verwicklungen, Wiederfaltungen und insbesondere Einwicklungen. Schon jetzt zeigt das erste erwähnte Profil der Glarner Alpen unter dem Deyenstock eine kleine Einwicklung der Säntisdecke unter die Axendecke dadurch, daß der obere Teil der ersteren als Teil des neuen Bewegungskörpers der Axendecke nach Norden weiterfuhr, während der tiefere Teil liegen blieb. Und wäre diesem neuen Axendeckensystem weitere Wanderung beschieden gewesen, so wäre hier eine der so bezeichnenden zipfelartig nach Süden zurückreichenden Einwicklungen entstanden, wie wir sie gerade im helvetischen und ultrahelvetischen Gebiete in so schönen Beispielen verwirklicht haben, z. B. die Einwicklung des Wildflysches unter die helvetischen Decken, die Einwicklung des Cephalopodenneokoms der Bovindecke unter Wildstrubel- und Diableretdecke, ferner die Einwicklung der Bernharddecke als Lebendungneiss unter die Mt. Leonedecke. Alle diese Erscheinungen möchte ich daher darauf zurückführen, daß eine spätere Phase die Deckenkörper mit neuen Gleitflächenlagen auseinanderschneidet.

Die zweite Gleitbewegung kann wieder alle Formen einschariger Gleitung aufweisen, von rein einflächiger bis zu differentiell verteilter.

Bis jetzt sind wir auch für die Großformen der Tektonik von der Anschauung ausgegangen, daß der Stoffbestand keinen Einfluß auf die Anlage der Gleitflächen hatte, was auch besagt, daß an der Grenze zweier verschiedener Gesteinskörper keine besondere Änderung im Beanspruchungsplane auftrat. Es heißt dies, daß für alle hier in Betracht kommenden Gesteine die Elastizitätsgrenze schon weit überschritten war. Und es ist wirklich eigenartig, wie weit man mit der zunächst unwahrscheinlich dünkenden Annahme kommt; für die gesamten Schweizer Profile braucht man kaum an einer Stelle auf den Gesteinswechsel für die Ermittlung der Bewegungsbahnen Rücksicht zu nehmen, mit Ausnahme der romanischen Decken, wo die Kniefaltung zu berücksichtigen ist. Die ganzen Schweizer Profile sind rein „geflossene Formen“.

Natürlich müssen wir nun, gradeso wie wir es bei den liegenden Falten getan haben, auch die andere Möglichkeit noch in Betracht ziehen, daß auch bei Weitüberschiebungen die Elastizitätsgrenze für einzelne Gesteine gar nicht oder nur wenig überschritten war, für andere schon. Dann werden Gesteinsgrenzen bestimmenden Einfluß nehmen. Wenn wir, wie es in Großteilen der östlichen Kalkalpen der Fall ist, sehen, daß ausgewählte Schichten Gleithorizonte darstellen, daß sich so Stockwerke bilden, daß auf weite Strecken die Werfener die Gleitbahn bilden, anderweit daneben wieder die Raibler Schichten, so werden wir sagen, daß die dazwischen liegenden Kalkplatten noch zu wenig beansprucht waren, daß sie noch ihren Sonderbeanspruchungsplan gegenüber dem Schiefer hatten, so daß bei der Gleitflächenausbildung noch die Grenze zwischen beiden mitzureden hatte.

Und diese Räume, wo sich ein wesentlicher Einfluß des Stoffes auf die Bewegungsform offenbart, sind regelmäßig solche, denen man eine entsprechende Hochlage im tektonischen Baue zusprechen möchte.

Es erweist sich also der Vorgang einer Deckenbildung dem Gesetze der Einscharigkeit in weitem Maße als zugänglich. Dadurch erweist sich letzteres als eine deduktive Bestätigung der Richtigkeit dieser induktiv gewonnenen Anschauung.

Die Aufgabe, die Bewegungsform, die zu einer tektonischen Endform geführt hat, zu erkennen, ist also in vielen Fällen mit einer ziemlichen Wahrscheinlichkeit lösbar. Jetzt kommt aber die andere Aufgabe, die unweigerlich gestellt werden wird: welcher Art waren die Beanspruchungen, unter denen die einzelnen Punkte des umgeformten Körpers gestanden haben, und die fernere Frage: welches waren die äußeren Kräfte, die zu diesen Beanspruchungen führten?

Über die Größe der Beanspruchungen haben wir, soweit es sich um die Lage zu einer etwaigen Elastizitätsgrenze handelt, schon einige Aufschlüsse erhalten. Uns geht hier hauptsächlich die Lagerung des Beanspruchungszustandes zur Bewegungsrichtung an, die am besten beschreibbar ist durch die Lagen, die die Richtungen der Hauptkräfte des Beanspruchungszustandes zu Gleitebene und Gleitrichtung innehaben.

Wir haben gesehen, daß der Beanspruchungsplan sich den Bedürfnissen einer Gleitung in gewissen Grenzen entsprechend einregeln kann, natürlich nur soweit, als es die Anordnung der äußeren Kräfte gestattet, denn immer muß ja der Satz erfüllt sein, daß die an einem Schnitt angreifenden Spannungen den an dem einen Teil angreifenden äußeren Kräften das Gleichgewicht halten müssen.

Ist also eine Fläche Gleitfläche, so heißt das, es hat sich ein solcher Beanspruchungsplan eingestellt, daß alle Teile dieser Fläche Scherflächeneigenschaften haben, daß alle Körperelemente, die von dieser Gleitfläche durchschnitten werden, Scherbeanspruchungen in der Richtung der Gleitbewegung aufweisen. Das heißt, an keinem dieser Elemente kann eine Hauptbeanspruchung senkrecht auf die Gleitfläche stehen.

Es ist also der gerne gehörte Satz: „Der Hauptdruck steht senkrecht auf die Gleitfläche“ vollkommen unzulässig.

Wie stehen nun an einem solchen Körperelement die Hauptbeanspruchungen?

Wenn wir den einen Fall annehmen dürften, daß der Körper eine ausgesprochene Elastizitätsgrenze hätte und nur knapp ober diese beansprucht wäre, so wäre die Frage leicht zu beantworten. Denn wir haben ja oben gezeigt, daß dann die Gleitfläche an allen ihren Punkten Fläche größter Scherbeanspruchung sein muß, das heißt, größte und kleinste Hauptkraft stehen unter 45 Grad zu ihr, und zwar in der Ebene, die wir durch die Gleitrichtung senkrecht zur Gleitfläche legen. Dabei muß die größere dieser Hauptdruckkräfte eine Teilkraft im Sinne der Bewegungsrichtung haben. Die Richtung in der Gleitfläche senkrecht zur Bewegungsrichtung (also das tektonische Streichen) ergibt sich dann als Richtung der mittleren Hauptkraft.

Diese einfachen Annahmen sind aber bei Gesteinen in der Regel nicht zulässig, sie werden meistens ein Verhalten zeigen, das sie zwischen diesen rein festen Körpern und den Flüssigkeiten stellt, die Beanspruchungen werden in der Regel hoch über einer etwaigen Elastizitätsgrenze stehen. Es gilt dann wohl auch der Satz, daß die Gleitfläche nirgends senkrecht auf den Hauptkräften des Beanspruchungszustandes stehen kann. Jedoch haben wir oben gesehen, daß nicht unbedingt angenommen werden darf, daß die Gleitfläche an allen ihren Punkten Fläche größter Scherkräfte sein muß. Wir können in diesem Falle also nicht aussagen, daß größte und kleinste Scherkräfte gerade unter 45 Grad zur Gleitfläche stehen, es sind auch andere Winkel möglich mit Ausnahme eben der rechten.

In diesem Falle taucht eine andere Frage auf: ist es hier notwendig, daß die Gleitfläche in allen Körperelementen dem Büschel von Flächen angehört, das durch die Axe der mittleren Hauptbeanspruchung gelegt

ist. Denn wenn sie in dem Körperelement nicht den Schnitt größter Scherbeanspruchung bildet, Schnitte kleinerer Scherbeanspruchungen gibt es unendlich viele, natürlich auch solche, die nicht diesem Büschel angehören, die also schräg zu allen drei Hauptkräften liegen. Mit anderen Worten ist die Frage so ausgesprochen: darf man auch hier annehmen, daß die Richtung in der Gleitfläche senkrecht auf die Gleitrichtung, die wir das tektonische Streichen genannt haben, die Richtung der mittleren Hauptbeanspruchung darstellt, die also bei Verhältnissen der Gebirge ein immerhin in Betracht kommender Druck sein dürfte? Die Frage wird im Abschnitt über chemische Gefügebildung ihre besondere Bedeutung erlangen, nämlich ob wir in der Richtung des Streichens eine besonders niedrige Beanspruchung, vielleicht sogar Zug erwarten dürfen, die zu „Ausweichungen, Zerrungen“ und ähnlichem führte.

Eine Antwort gibt uns die Vorstellung der Auswahl der Bewegungsflächen. Nehmen wir wirklich an, es wäre in dieser Richtung des tektonischen Streichens eine besonders geringe Beanspruchung augenblicklich vorhanden, etwa die Richtung geringster Hauptbeanspruchung, so gibt es unbedingt eine Scherfläche größter Scherkraft unter 45 Grad zu ihr und der Richtung der größten Hauptkraft gelagert. (Es wäre das für die Alpen eine ziemlich steil stehende Fläche von Nord-West oder Nord-Ost Streichen, an der der eine Teil sich fast horizontal gegen den anderen verschöbe. Jedenfalls würde an dieser Fläche ein Gleitruck auftreten. Daß aber aus diesem Rucke kein größeres Gleiten erwuchs, besagt, daß mit dieser Anfangsbewegung eine Abänderung des Beanspruchungsplanes erfolgte, die die Bewegung zum Aufhören brachte, weil dabei Wege gegen einen Widerstand geleistet wurden. Das tektonische Streichen ist also eine Richtung, in welcher die Beanspruchung wächst, wenn die Bewegung eine andere Richtung hat als die tatsächlich erfolgende. Und da bei der Auswahl der Bewegungsflächen zunächst alle möglichen Richtungen eingeschlagen vorgestellt werden müssen, ist es unmöglich anzunehmen, daß diese Richtung die der geringsten Hauptbeanspruchung sei. Dagegen sagt die tatsächliche Bewegungsrichtung, die zu einer so weiten Bewegung geführt hat, daß in ihrem Sinne eine Teilkraft jener Hauptbeanspruchung gewirkt hat, die von Anfang an die größte war und die im Laufe der Bewegung keine Abnahme erfahren hat — das ist die größte Hauptbeanspruchung — ferner daß gegen ihren Sinn nur eine Teilkraft jener Hauptbeanspruchung wirkte, die, von Anfang an die kleinste, durch die Bewegung keine Zunahme erfuhr, das ist daher jedenfalls die kleinste Hauptbeanspruchung. Es ist also auch in diesem Falle notwendig anzunehmen, daß wenigstens angenähert die Beanspruchungszustände so gelagert sind, daß das tektonische Streichen die Richtung der mittleren Hauptbeanspruchung darstellt, daß dagegen in der auf der Gleitfläche senkrechten Ebene, die durch die Gleitrichtung gelegt ist, die beiden „äußersten“ Hauptbeanspruchungen liegen, und zwar unter einem nicht angebbaren Winkel so, daß der größte Hauptdruck für die Gleitrichtung eine Teilkraft im Sinne der Bewegung ergibt, der kleinste Hauptdruck dagegen eine gegen den Bewegungssinn.

Mehr über den Beanspruchungsplan auszusagen, wird kaum möglich sein. Da nun alle diese Beanspruchungen Teilkraft der äußeren Kräfte sind, wie sie eben auf die einzelnen Körperelemente entfallen, so heißt das auch, daß wir über die äußeren Kräfte nur sehr allgemeine Angaben machen können. Erkenntniswerte Angaben lassen sich nur aus der Weite der Bewegung machen für jenen Teil des beanspruchten Körpers, der sich gegen die Erde verschoben hat, also eben für das Gebirge. Es besagt da die ausgesprochen einheitliche Bewegungsrichtung, daß es eine wegefähige Kraft, eine Fernkraft war, die eine Teilkraft in der Bewegungsrichtung hatte, ferner daß wenigstens mit Ausnahme des Bewegungsschlusses keine nicht wegefähige Kraft, kein Widerstand gegen den Sinn der Bewegung wirkte, während die Richtungen, die von der Bewegung beharrlich gemieden werden, also für Deckengebirge die Tiefe, dann aber auch die Richtung des Streichens von Widerständen besetzt gewesen sein dürften.

## Mechanische Gefügeregelung.

Wir haben bisher die mechanische Großumformung besprochen. Wir kamen zu den Gesetzen der Einscharigkeit und dem der Gleitbretter. Wir konnten angeben, wie wir die Lager der Flächen finden, welche eine bestimmte Umformung hervorgebracht haben. Dies ging eindeutig, z. B. bei einer einflächigen Gleitung, bei welcher also diese sich nur an einer einzigen Fläche abspielt, es ging auch eindeutig bei einer Umformung unter ausgesprochener Gleitbretterbildung, z. B. bei der Phyllitfaltung, wo die Verbindungen der Mittelsenkelmitten der verschiedenen aufeinanderfolgenden Schichten unmittelbar die Lage der Hauptgleitflächen angibt. Würde aber ein Bewegungshorizont mit vollkommen gleichförmiger Verteilung der Gleitbeträge vorliegen, dann hätten

wir keinen Weg, aus der Form selbst festzustellen, Gleitflächen welcher Lage hier am Werke gewesen seien. Es wird daher stets ein Wunsch der Tektonik sein, auch auf anderem Wege Angaben über die Lage der umbildenden Gleitflächen zu erhalten.

Es ist daher für sie die Erkenntnis von großem Wert, daß die Umbildung der Gesteine sich auch im feineren Bau abspiegelt. Ein Großteil der Gesteine sind also „Tektonite“ (Sander), tragen in ihrem Kleinformbestande — dem Gefüge — eine Summe von Kennzeichen, die sie der gleichen Umformung verdanken, die auch die Großformen änderte. Die Bedeutung der Tektonik für das Gefüge der Gesteine tritt insbesondere im Gegensatz zu solchen Gesteinen hervor, die wohl Umbildungen ihres Mineralbestandes aber keine Umformungen im tektonischen Sinne erlitten haben. Es hat Sander auf den großen Gegensatz zwischen solchen Gesteinen, wie sie besonders im Grundgebirge Finnlands vertreten sind, und den alpinen Gesteinen hingewiesen. (Sander, „Studienreisen im Grundgebirge Finnlands“, Verh. G. R. A. 1914.)

Ein einschäriger Umformungsvorgang, wie wir ihn schilderten, ist anisotrop, es ist von allen möglichen Ebenen eine ausgezeichnet, die Gleitebene, von allen möglichen Richtungen eine, die Gleitrichtung in der Gleitebene. Andererseits ist in Tektoniten fast ausnahmslos eine Fläche ausgezeichnet, die „s“-Fläche, vielfach auch eine Richtung in ihr, eine Streckungsaxe oder ähnliches.

Es wäre also außerordentlich naheliegend, eine unmittelbare Aufeinanderbeziehung beider Erscheinungen durchzuführen und zu sagen, die „s“-Flächen eines Gesteines stellen unmittelbar die Lage der Gleitflächen dar, wie ich es in der Arbeit, Mech. Probleme der Gebirgsbildung, Mitt. Geol. Ges. Wien, 1915 getan habe.

Doch lassen zwei Erscheinungen es notwendig erscheinen, diese kurze Schlußfolgerung genauer auf Zulässigkeit und Geltungsbereich zu untersuchen.

Zum ersten zeigt sich, daß vielfach das Gestein schon vor der Umformung eine ausgesprochene Anisotropie besessen hat, wir haben uns auch bei den Großformen schon damit befaßt. Dann wird aber im Gefüge nicht die reine Formwirkung der letzten Durchbewegung, sondern ein Ausgleich zwischen neuer und vorhergehender Anisotropie zu beobachten sein.

Zum zweiten kommt man zur Erkenntnis, daß für die Umbildung der Kleinformen vielfach die mechanischen Vorgänge nicht die einzigen bestimmenden Einflüsse darstellten, daß daneben die chemische Umformung, die freie Beweglichkeit der Moleküle vielfach ganz maßgebend mitwirkte. Damit ist aber die Möglichkeit gegeben, daß auch andere gerichtete Einflüsse als die Durchbewegung bestimmend auf die Richtungsgebundenheit des Gefüges wirkten, ich erinnere hier an die Beeke-Grubemannsche Anschauung, daß es die Hauptebenen des Spannungszustandes seien, die sich in den „s“-Flächen abbilden.

Es wäre sehr wichtig, daß man einmal die letzteren Einflüsse ausschalten könnte, daß man Fälle feststellen könnte, in welchen die Umgestaltung des Gefüges sicher nicht durch die Bewegung der einzelnen Moleküle für sich, sondern allein durch die Gleitbewegung erfolgte. Dort könnten wir den gefügebestimmenden Einfluß der Tektonik am ungestörtesten untersuchen.

Es gibt nun solche Fälle, die sicher frei sind von solcher molekularer Teilbewegung. Ich hatte für diese Fälle in den Mitt. Geol. Ges. Wien 15 den Namen Kaltreckung vorgeschlagen.

Es sei zunächst eine Art der Umgestaltung des Gefüges besprochen, die auch hierhereinfällt, und rein mechanischer Natur ist. Bei ihr bilden die Körner des Gesteines selbst die Differentiale in der differentiellen Verteilung der Gleitbewegung auf den Raum. Die einzelnen Gleitflächen setzen daher nicht durch die Körner selbst durch, oder wo sie dies tun, ist eine deutliche Trennung des Zusammenhanges, ein Bruch zu sehen. Im allgemeinen verschieben sich dabei aber die Körner selbst gegeneinander, die Gleitbahnen sind also aus Kornrenzflächen zusammengesetzt. Es ist dies die intergranuläre Formänderung Karmans, „Festigkeitsversuche unter allgemeinem Druck“, Zeitschr. d. Ver. d. Ing. 1911. Da aber die Oberflächen der Körner keine zum Gleiten taugliche Gestalt haben — eine Gleitfläche soll ja in kleinem Bereiche eine Regelfläche sein, ein allgemeiner Zylinder mit der Erzeugenden in der — Richtung der Gleitung, so werden daraus an den vorspringenden Ecken die mannigfachsten Sonderbeanspruchungen entstehen, die zur Zertrümmerung, Mehlbildung etc. führen. Auf diese Weise werden allgemein die Erscheinungen der Mörtelkränze erklärt. Karman hat l. c. nachgewiesen, daß diese Art der Formänderung nur unter geringem Normaldruck auf die Gleitfläche auftreten kann. Sie ist in der Geologie auch nicht häufig zu sehen, am ehesten noch bei Myloniten, die dann durch die Lockerung des Verbandes an den Korngrenzen staubig zerfallen.

Dagegen sind häufig Übergänge dieser Art der Formänderung in eine andere auch rein mechanische zu sehen, welche für die Geologie weit wichtiger ist. Sie zeichnet sich dadurch aus, daß bei ihr die Gleitung auch

durch die Körner geht, die kleinste sich verschiebenden Einheiten sind also hier nicht die Körner, sondern noch kleinere, die bis zu einzelnen Punktschichten der Raumgitter herabsteigen mögen. Dabei tritt auch keine Trennung im inneren Zusammenhange der Körner auf. Sie ist also eine Umformung ohne Ausbildung von Unstetigkeiten, eine bruchlose Umformung im Sinne Heims.

Es hat die Anschauung Heims, daß solche rein mechanische Umformungen bruchlos möglich sind, das heißt, ohne weitere Unstetigkeiten, als sie ohnedies durch den Raumgitteraufbau gegeben sind, in neuerer Zeit Widerspruch gefunden. — Siehe Heritsch, Grundl. der alpinen Tektonik — wobei meist der Mangel an deutlichen Unstetigkeitsflächen auf nachträgliche Molekularumlagerungen, Sammelkristallisationen etc. zurückgeführt wird. Es hätten die verschiedenen Translationsversuche von Mügge und anderen hier wohl zur Vorsicht verleiten sollen, die Tatsache, daß es auch im Versuche gelingt, Formänderungen von Körnern rein mechanisch zustandezubringen, die ohne jede erkennbare Unstetigkeit verlaufen. Daß es sich aber um rein mechanische Umformungen handelt, sehe ich besonders aus den Erfahrungen, die die Technologie in den sogenannten Kaltreckungserscheinungen zutage förderte. Es ist eine kurze Befassung mit den Erscheinungen der Kaltreckung geboten, für genaueres Eingehen muß auf die umfangreiche Literatur über diesen Zweig hingewiesen werden.

Ludwik, Elemente der technologischen Meehanik, 1909.

Martens Heyn, Materialienkunde für den Maschinenbau. II. 1912.

Möllendorf und Czochralski, Technologische Schlüsse aus der Kristallographie der Metalle, Zeitschr. d. Ver. d. Ing., 1913.

Tammann, Metallographie.

Ludwik, Verfestigung und Glühwirkung. Int. Zeitschr. f. Metallographie, 1916.

Ludwik, Über die Änderung der Metalle durch Kaltreckung und Legierung. Zeitschr. d. Ver. d. Ing., 1919.

Czochralski, Die Grundlagen der Verfestigungsvorgänge, Zeitschr. f. Metallkunde, 1923.

Czochralski, Verlagerungshypothese und Röntgenforschung, Zeitschrift f. Metallkunde, 1923.

Masing, Rekristallisation von Metallen. Naturwissenschaften 23.

Die mechanischen Umformungen der Metalle gehen nur in seltenen Fällen, die technologisch gänzlich unverwertbar sind, nach der oben geschilderten Art vor sich, daß die Verschiebung an den Kornflächen erfolgt, meist ist die Gleitflächenverteilung viel enger als die Korngröße, so daß auch die einzelnen Schichten der Körner sich aneinander verschieben müssen.

Der Raumgitteraufbau der Körner bringt es mit sich, daß dieses Verschieben nicht nach beliebigen Ebenen im Korne verlaufen kann, sondern nur nach rationalen Richtungen, nach den Richtungen der „Translationen“, die dem betreffenden Raumgitter eigentümlich sind.

Nun zeigt die Metallkunde, daß solche Formänderungen, wenn sie unterhalb einer gewissen Temperaturgrenze erfolgen, mit sehr auffälligen Eigenschaftsänderungen verbunden sind, deshalb unterscheidet sie diese in der „Kälte“ erfolgten Umformungen als „Kaltreckung“ von der Warmreckung oberhalb der Grenze.

Für die Technik besonders wichtig sind die Änderungen der Festigkeitseigenschaften. Ganz übereinstimmend für alle Metalle erhöht die Kaltreckung die Festigkeit, die Elastizitätsgrenze, die Härte, setzt aber die Dehnbarkeit herab, und zwar können diese Abweichungen recht beträchtlich sein.

Man sieht diesen Einfluß sehr schön bei Messing. Kaltgewalzter Messingdraht hat eine so hohe Elastizitätsgrenze, daß man ihn zu Federn verwenden kann, während geglühter Draht derselben Dicke sich noch ganz mühelos wickeln lassen mag. Doch schon nach wenig Biegungen eines Weichmessingdrahtes merkt man wie er steif wird, wie diese Kaltreckung durch das Biegen die Elastizitätsgrenze hinaufsetzt. Es ist ganz natürlich, daß diese Änderungen der Festigkeit durch die Kaltreckung in der Technik die genaueste Beachtung finden muß. So muß bei der Herstellung von Konstruktionsteilen Kaltreckung gewissenhaft vermieden, oder wieder durch Ausglühen beseitigt werden, denn bei ihnen wird der Vorteil der höheren Festigkeit durch die Gefahr der geringeren Dehnbarkeit vor Eintritt des Bruches weit überwogen. Neben diesen Festigkeitseigenschaften ändern auch alle übrigen Eigenschaften ab. Es nimmt z. B. die elektrische Leitfähigkeit ab, es wächst die chemische Angreifbarkeit. Bezeichnend ist, daß solche Kaltreckungen unter Bindung von Energie vor sich gehen, es muß mehr Arbeit aufgewendet werden als wieder in Form von Formänderungswärme erscheint.

Diese Kaltreckungserscheinungen sind gering bei geringen Formänderungen, wachsen mit weitergehender Formänderung an, aber nicht unbegrenzt. Der Einfluß der Formänderung auf die Eigenschaften nähert sich einer Grenze, die auch bei weitestgehender Umformung nicht überschritten werden kann. Diese Grenze ist nun von der Temperatur abhängig. Umformungen bei geringen Wärmegraden können die Eigenschaften stark ab-

wandeln, bei je höheren ich die Umformung vornehme, desto kleiner sind die Abweichungen, die ich durch weitgehende Formänderung in den Eigenschaften erzielen kann. Endlich gibt es eine Temperatur, von der nach aufwärts Umformungen keine Eigenschaftsänderungen mehr hervorbringen, die Grenze der „Warmreckung“. Bei Metallen liegt diese Grenze nur einige hundert Grade unter dem Schmelzpunkte.

Diese Eigenschaftsänderungen sind beständig; bei Aufhören der Durchbewegung gehen sie nicht mit merklicher Geschwindigkeit zurück, sie bleiben auch erhalten, wenn ich die Temperatur unter die der Umformung sinke lasse. Steigere ich aber die Temperatur, so zeigt sich die Folge, daß die Einflüsse der vorhergegangenen Kaltreckung sich abschwächen und zwar ungefähr auf die Größe, die ich erreicht hätte, wenn die Reckung bei diesen höheren Wärmegraden vor sich gegangen wäre; die Folge davon ist auch, daß, wenn die Temperatur über die Grenze der Warmreckung gestiegen ist, die ganzen Eigenschaftsänderungen durch vorhergegangene Kaltreckung geschwunden sind. Ich kann also durch „Ausglühen“ nachträglich die Kaltreckfolgen wieder beseitigen.

Nun ist mit Kaltreckung stets auch eine andere Veränderung verbunden, die für uns wichtig ist, nämlich eine des Gefüges und des Baues des Einzelkornes. Schon bei geringen Graden der Formänderung sehen wir nicht bloß eine Veränderung der Kornumrisse, sie werden gestreckt, sondern auch Veränderungen, die im Innenbau des Kornes begründet sein müssen. Die vorbildliche Ordnung des Raumgitters wird getrübt. Bei ungestörten Metallkörnern sehen wir die bei einer Ätzung entstandenen gleichen Flächen der Ätzgruben alle gleichzeitig einspiegeln, bei geringen Kaltreckungsgraden schon sehen wir diese Erscheinung gestört, wir sehen deutlich, daß gleichartige Richtungen an verschiedenen Stellen des Kornes verschiedene Lagen haben, das Raumgitter erscheint verborgen, bei stärkeren Reckgraden führt dies bald soweit, daß von einem einheitlichen Ätzdamast überhaupt keine Rede mehr ist. Bei Warmreckung sind derartige Erscheinungen unbekannt.

Störungen des Raumgitters zeigen auch die Laueaufnahmen sogereckter Körper an, siehe die Aufnahmen Rinnes an Steinsalzkristallen und die Czochralskis, Verlagerungshypothese und Röntgenforschung, Zeitschr. f. Metallkunde 1923, 60.

Es ist klar, daß eine derartige Form der Umbildung, die Verbiegung des Raumgitters hervorbringt, eine, die Energie bindet, eine, die die Eigenschaften verändert, keine reine Translation im Sinne der Kristallographie sein kann, also keine reine Gleitung nach rationalen Richtungen und in rationalen Schritten, denn dadurch würde ja begriffsgemäß das Innere des Kornes ungeändert gelassen werden, gerade Richtungen wären wieder gerade, der Energieinhalt wäre derselbe usw. Wir müssen im Bereiche der Kaltreckung Abweichungen vom Vorgang der reinen Translation zulassen, die zu beständigen Zuständen führen. Die Anschauungen, welcher Art diese Kaltreckvorgänge sind, gehen auseinander, eine Erörterung ist an dieser Stelle kaum möglich.

Siehe Czochralski, „Die Grundlagen der Verfestigungsvorgänge“, Zeitschr. f. Metallkunde 23. 11.

Masing, „Rekristallisation von Metallen“, Naturwissenschaften 23.

Tammann, „Metallographie.“

Schmidt, „Über Kaltreckvorgänge“ Jahrb. d. Mont. Hochsch. Leoben, 23.

Ludwik, „Elemente d. technolog. Mechanik etc.“

Es ist für uns die Frage, was bei dieser Kaltreckung eigentlich vorgeht, nicht so wichtig, auch nicht die Frage, ob die Verbiegungen wirklich stetige Verbiegungen sind, oder kryptoklastische, schließlich und endlich hat die Stetigkeit im Kristall immer eine Grenze, wenn man nämlich zur Größenordnung der Identitätsabstände herabsteigt. Wichtig ist für uns die Erkenntnis, daß es einen Umformungsvorgang mit genau begrenztem Bedingungsgebiete gibt, der einen tiefen Eingriff in die physikalischen Eigenschaften des Stoffes darstellt und der auch stets mit Gestaltsänderungen des Raumgitters verbunden ist, die wenigstens für unsere Erkenntnis als stetige erscheinen.

Wichtig ist auch eine andere Erkenntnis. Wir sahen, daß bei der Erwärmung eines kaltgereckten Stoffes die Eigenschaftsänderungen zurückgehen. Betrachten wir die zugleich damit ablaufenden Vorgänge im Gefüge, so sehen wir, daß gleichzeitig auch die sichtbaren Störungen der Raumgitter zurückgebildet werden. Und zwar bilden sich aus dem gestörten Korne zunächst kleine, aber völlig ungestörte Körner aus (Kornzerfall). Offenbar ist bei erhöhter Temperatur die freie Beweglichkeit der Moleküle so groß geworden, daß sie aus dem unter Zwang stehenden Verbände austreten und neue unbehinderte Verbände einzugehen vermochten.

Wo freie Molekularbeweglichkeit herrscht, also wo nach unserer Festlegung auch chemische Umformung mitspielt, sieht sie ihre erste Aufgabe darin, Raumgitterstörungen abzubauen, noch nie ist ein derartiger Vorgang etwa eine Sammelkristallisation beobachtet worden, der mehrere gestörte Körner zu einem größeren gestörten vereinigt hätte.

Nun haben wir in vielen Fällen umgeformter Gesteine Erscheinungen, die wir sehr gut diesen Kaltreckungserscheinungen bei Metallen an die Seite stellen können. Ich sprach daher in den Mitt. d. geol. Gesellschaft 15 von Kaltgereckten Gesteinen als einer gesonderten, wohl von anderen unterscheidbaren Umformungsart, die den Schluß auf ganz bestimmte Bedingungen zulasse. (Es ist mit Recht vorgeworfen worden, daß die Bezeichnung, ein Gestein sei kaltgereckt, eine Ungenauigkeit sei. Ein Gestein besteht ja in der Regel nicht aus einem einzigen Mineral, es ist sehr gut möglich, daß bei den Umformungsbedingungen das eine Mineral kaltgereckt, ein anderes warmgereckt wurde. Es müßte sich die Beschreibung also auf die einzelnen Mineralien erstrecken. Es wird aber hier die Bezeichnung kaltgerecktes Gestein der Kürze wegen beibehalten, so ähnlich wie man auch von einem kristalloblastischen Schiefer sprechen kann.) Wir können allerdings bei den Körnern eines Gesteines, das wir als kaltgereckt ansprechen, nicht die Abweichungen der Festigkeitseigenschaften untersuchen wie bei Metallen, wohl aber die Veränderungen anderer, insbesondere optischer Eigenschaften. So werden die Brechungsexponenten verändert, damit auch der optische Charakter, der gestörte Quarz wird zweiachsig. Dabei befolgt auch diese Abweichung das Gesetz, das wir früher aufgestellt haben, die Veränderung übersteigt nicht eine gewisse Grenze, bei dem Quarze kann der Axenwinkel nicht eine gewisse, nicht bedeutende Größe übersteigen.

Stets mit diesen Erscheinungen verbunden finden wir nun die, daß die Körner innerlich gestört sind, daß die gleichwertigen Gitterrichtungen an verschiedenen Stellen des Kornes verschiedene Lagen haben, daß die Körner „verbogen“ sind mit wenigstens für unsere Untersuchungsweisen vollkommener Stetigkeit.

Es sind diese Verbiegungen außerordentlich eindrucksvoll beim Glimmer, sie finden sich sehr häufig beim Quarz als „undulöser“ Quarz, dessen Überzeugungskraft allerdings meist dadurch herabgemindert wird, daß er sehr leicht Zerspaltungen gleichlaufend zu seinem  $\gamma$  unterliegt. Sehr schöne Verbiegungen sehen wir bei den Karbonaten, in schwereren Fällen bei Feldspaten, Hornblendern usw.

Bei dieser Übereinstimmung der Erscheinungen dieser Gesteine mit denen der kaltgereckten Metalle können wir die Erfahrungen der Metallkunde auch für die Geologie herübernehmen, wir werden daraus in erster Linie den Schluß ziehen, daß die Umformungen, die solche Raumbgitterstörungen hervorbrachten, unterhalb einer gewissen Temperaturgrenze vor sich gegangen sind, die von dem betreffenden Mineral abhängig ist. Wenn uns diese Grenze selbst auch nicht bekannt ist, ermöglicht es uns doch die Feststellung, inwieweit die Umformungsbedingungen zweier verschiedener Gesteine gleich oder ungleich waren.

Wir können aber die zweite Erfahrung herübernehmen, daß bei einer solchen Umformung freier Molekülumsatz keine Rolle gespielt haben kann, denn seine erste Wirkung ist die, daß Störungen abgebaut werden. Es ist daher nicht zulässig, anzunehmen, daß Sammelkristallisation aus einem zu Grus zermahlenden Quarze wieder ein einheitliches und zwar undulöses Korn aufgebaut habe, es könnte dies nur zu einem vollkommen ungestörten Quarzkristall führen.

Dies ist die große Bedeutung der kaltgereckten Gesteine für unsere Untersuchung, wir können bei ihnen mit Sicherheit chemische Umformung ausschließen, für die Erklärung ihrer Gefügebildung steht nur mechanische Umformung zur Verfügung. (Natürlich gilt diese Feststellung nur für die Umbildungsphase, die die Verbiegungen schuf, es ist damit nicht ausgeschlossen, daß vorgehende Umformungen unter kräftigem Molekülumsatz sich abspielten.)

Welcher Art kann nun die Gefügeumbildung sein, die durch eine rein mechanische Formänderung dem Gestein aufgeprägt werden kann. Dabei wollen wir letztere uns als eine einscharige, differentiell das Gestein ergreifende Gleitung vorstellen.

Eine Art der Regelung des Gefüges durch eine einscharige Gleitung ist die nach der äußeren Form der Mineralkörner. Denken wir uns ein Korn, welches eine längliche Gestalt besitze, im Gesteine eingelagert. Wir können dieses genau so behandeln, wie wir es früher mit der Schieferung oder der Schichtung getan haben, wir können es als reine „Zeichnung“ betrachten. Wir werden auch hier dasselbe sehen wie früher bei der Besprechung der Falten, nämlich das Hineindrehen der Längsrichtung in die Gleitrichtung, die aber nie zu einem vollkommenen Zusammenfallen führen kann, aber schon bei nicht gar weitgehenden Durchbewegungen zu einem recht vollkommenen Anschließen der Längsausdehnung des Kornes an die Gleitflächenrichtung führen kann.

Es würde also hier die Gleitfläche zur Schieferfläche werden. Diese an und für sich mögliche Erklärung dürfte aber nur in seltenen Fällen zutreffend sein. Sie kann nur für solche Mineralien angewendet werden, die in allen Körnern ausgesprochene Langformen aufweisen, ferner ist Voraussetzung für diese Erklärungsweise, daß die Gleitung eben sich um das Korn herum abspielt, nicht das Korn durchsetzt. Wir wollen aber gerade diese letzteren Fälle betrachten.

Die Untersuchungen der Formänderungen an Kristallen haben ergeben, daß sie durch Gleitung nach rationalen Richtungen vor sich geht. Ich glaube, daß man auch für die Fälle der Kaltreckung nicht von der Vorstellung abzuweichen braucht, daß die Richtungen der Gleitung rational sind, denn nur für solche ist es gewährleistet, daß alle Punkte diesseits und jenseits der Gleitfläche auch nach der Formänderung auch wieder ein annähernd gleichgestaltetes Gegenüber finden, daß also der Zusammenhang gewahrt bleibe. Dagegen muß dann angenommen werden, daß die Forderung nach rationalen Schritten nicht eingehalten werden muß, um die Störungen bei der Kaltreckung erklären zu können.

Dabei zeigt sich — es scheint dies besonders für niedrigere Wärmegrade zuzutreffen — daß nicht alle unendlich vielen Möglichkeiten der Translation sich gleich gut zur Gleitung eignen, sondern daß einige ganz besonders darin bevorzugt sind.

So kann man für die verschiedenen Mineralien mit einer oder je nach ihrem Symmetriegrad mehreren als günstige Gleitflächen ausgezeichneten Flächenlagen rechnen, während andere sehr zurücktreten. Für die Mineralien mit niedrigem Symmetriegrade wie die meisten Silikate dürfte nur eine einzige solche Translationsfläche — Korngleitfläche — in Betracht zu ziehen sein.

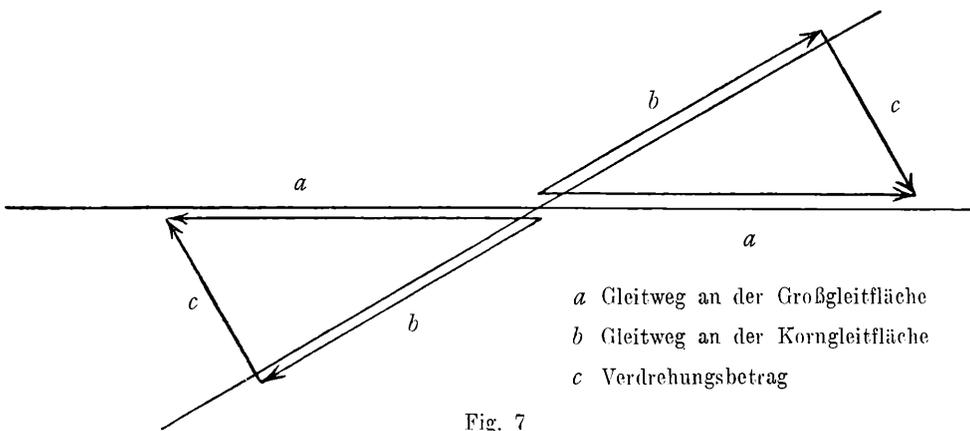


Fig. 7

- a* Gleitweg an der Großgleitfläche
- b* Gleitweg an der Korngleitfläche
- c* Verdrehungsbetrag

Nun stelle man sich ein derartiges Korn vor in einem Gestein, dem durch äußere Kräfte eine nach einem bestimmten Plane, nach bestimmten einschärigen Großgleitflächen ablaufende Umformung aufgezwungen werde. Korngleitflächen und Großgleitflächen werden zu Beginne im allgemeinen nicht zusammenfallen, sondern einen Winkel miteinander einschließen. Fig. 7.

Es muß sich nun das Korn, so gut es geht, der Großbewegung anpassen; man sieht, daß es nur den in die Richtung seiner Korngleitflächen entfallenden Anteil der allgemeinen Durchbewegung durch Gleiten an diesen erledigen kann, es bleibt ein Rest vorhanden, den das Korn nicht in sich aufnehmen kann und dieser Restanteil erzeugt ein Wälzen des Kornes. Dieser Rest wird umso größer sein, je größer der Winkel zwischen Korngleitfläche und Großgleitfläche ist, er wird andererseits auf 0 sinken, wenn beide zusammenfallen. Man sieht: es werden die Körner so lange verdreht, bis die ausgezeichnete Fläche des Raumgitters mit der Gleitfläche zusammenfällt. Auch hier entsteht eine Regelung des Gefüges, aber keine nach der äußeren Form der Körner, sondern nach kristallographischen Richtungen, es ist eine Richtungsregelung. Auch das Hineindreuen dieser Richtungen in die Großgleitfläche wird erst dann vollständig sein, wenn der Weg an dieser Einzelfläche unendlich groß geworden ist. Da aber das Hineindreuen der Korngleitfläche in die Großgleitfläche, wenn die Lagen beider sich schon sehr genähert haben, nur mehr ein sehr langsames ist, so sieht man, daß schon bei verhältnismäßig nicht sehr weitgehenden Gleitungen der Zusammenschluß beider Richtungen schon ein recht weitgehender sein wird. Es gilt dies für Mineralien mit einer einzigen ausgezeichneten Gleitrichtung. Sind deren zwei oder gar drei vorhanden, wie bei tetragonalen und tesseraleen, so kann der Vorgang mit der Einschleiftung einer dieser enden. Hat es dagegen keine Fläche, die bei den gegebenen Bedingungen Gleitfläche sein kann, so kann sich das Mineral nur unter andauerndem Wälzen mit der Durchbewegung abfinden, wie es an Granaten schön zu sehen ist, wenn nicht eine Einregelung nach der äußeren Form erfolgen kann.

Haben wir in einem Gestein vor der Durchbewegung verschiedene Körner desselben Minerals in den verschiedensten Lagen, so werden sie nach Beendigung des Vorganges eine Gleichschichtung zeigen, die umso vollkommener sein wird, je weiter die Durchbewegung gegangen ist. Für diesen Fall können wir also sagen, es entsteht eine Schieferung, und zwar ist die Schieferungsebene die Gleitfläche.

Dieser Schluß läßt sich aber nicht in der Schärfe aufrechterhalten, wenn das Gestein schon vor der Durchbewegung eine ausgesprochene Schieferung hatte. Da in der Ausgangslage alle einzelnen Körner schon übereinstimmend gelagert waren, werden die Körner derselben Großgleitschichte auch nach Beendigung der Bewegung

gleichgelagert sein, sich der neuen Großgleitfläche in gleichem Maße angenähert haben. Jetzt kann man nicht mehr sagen, die Ursache der Gleichschichtung ist die neue Durchbewegung, sie war ja schon vorher vorhanden, aber das alte „s“ hat sich in seiner Lage der neuen Gleitfläche angenähert, würde vollkommen mit ihm zusammenfallen, wenn die Durchbewegung sehr weit gegangen wäre. Die Formen, die dieser Anschluß annehmen kann, haben wir bei der Umfaltung (Sander) kennen gelernt. In diesem Falle einer vorher bestehenden Schieferung ist das sich ergebende „s“ die alte Schieferung in mehr oder weniger weitgehendem Anschluß an die neue Großgleitflächenlage.

In beiden Fällen sehen wir aber, daß die Großgleitfläche dasjenige ist, welches die Richtung der Gefügeumbildung beherrscht.

Nun gibt es aber Fälle, die zeigen, daß dieser Weg der Regelung nicht der einzige ist, daß es noch leistungsfähigere geben muß. Wenn wir verschiedene auf diese Weise regelfähige Mineralien hätten, die alle schon vor der Umformung geregelt gewesen sein sollen, z. B. ein Gestein aus Glimmerlagen und Quarz, in dem der Quarz nach der später zu besprechenden Trenerschen Regel mit der Fläche 0001 gleichlaufend mit dem durch die Glimmerblättchen bezeichneten „s“ angeordnet gewesen sein soll, so sollte nach unserer Ableitung nach der Durchbewegung das gegenseitige Verhältnis von Quarz und Glimmer an jedem Punkte wieder dasselbe sein, Quarz wieder mit 0001 gleichlaufend der Glimmerspaltung, da beide nur dieselbe Verdrehung erfahren haben können.

Doch sehen wir, daß dies durchaus nicht immer zutrifft, sehr häufig sehen wir, daß der Quarz sich rascher in die Gleitfläche einregelt als der Glimmer, wir haben dann den Fall, daß zwei verschiedene „s“-Flächen das Gefüge beherrschen, eine auffällige, die des Glimmers und eine versteckte, meist nur mit besonderen Beobachtungsweisen erkennbare, z. B. mit dem Gipsblättchen, die des Quarzes. Ein besonders schönes Beispiel hierfür ist bei Sander, Beiträge aus den Zentralalpen zur Deutung des Gesteinsgefüges beschrieben. Jahrb. B. R. A. 1915, 627. Es ist eine Falte sehr schön in dem „s“ durch Glimmer ausgedrückt. Fig. 8. Wir werden nach dem vorigen sagen, ein altes „s“ nähert sich auf dem Wege der Umfaltung der neuen Gleitflächenlage. Es ist aber nicht bloß der Glimmer geregelt, sondern auch der Quarz, aber nicht nach derselben Richtung wie der Glimmer, sondern alle 0001 Flächen, alle  $\alpha'$  gehören einer Parallelschar an, und zwar hat diese gerade die Lage, die wir für jene Gleitflächen voraussetzen möchten, die nach unserer Ableitung (siehe S. 21) die Bildung der Falte veranlaßt haben könnte. Wir sehen daher: Während sich der Glimmer allmählich der neuen Gleitflächenlage anschloß, so daß wir an den verschiedenen Stellen der Falte seine Schuppen eben in den verschiedenen Zuständen des Anschlusses vorfinden, erscheint der Quarz schon vollkommen eingeregelt. Es mußte daher für diesen ein Einfluß gewirkt haben, das ein besonders rasches Einstellen in die Gleitfläche ermöglichte. Ich möchte die Erklärung hierfür in einer bemerkenswerten Erkenntnis sehen, die die Versuche an Einkristalldrähten von Zink geliefert haben.

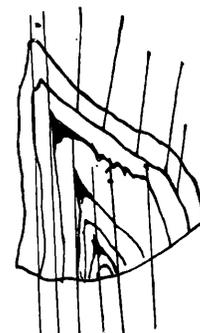


Fig. 8

Mark, Polanyi, Schmid, „Vorgänge bei der Dehnung von Zinkkristallen“, Zeitschr. f. Physik, Bd. 12, 1/2 1922.

Es zeigt sich nämlich, daß die einzelnen, von zwei Korngleitflächen begrenzten Gleitschichten, vielleicht also einzelne Punktschichten des Raumgitters nicht biegeungssteif sind, sie können sich verknüllen, wieder gerade-gestreckt werden und sich dann wieder zu Raumgittern, mit anderen zusammenfügen. Bei der gewählten Versuchsanordnung biegen sie sich im Laufe des Gleitvorganges um einen recht scharfen Winkel ab, fügen sich aber dann wieder vollkommen gerade zu einem Kristallbande zusammen. Fig. 9. Wir können ähnliche Fähigkeiten auch für Mineralien in größerem oder geringerem Ausmaße in Anspruch nehmen. Wir können annehmen, daß bei einem Mineral, das diese Eignung in ausreichendem Maße besitzt, die einzelnen Gleitschichten, wie sie beim Gleiten über den Umriß des Kornes hinauswandern, einfach in die Richtung der Großgleitflächen umgebogen werden, und dann mit anderen gleichfalls umgebogenen wieder zu einem einheitlichen Gitter verwachsen. In diesem werden dann die Korngleitflächen nicht mehr oder weniger angenähert, sondern vollkommen mit der Großgleitfläche zusammenfallen. Man sieht sehr häufig Fälle, die als nicht vollendete derartige Vorgänge aufzufassen sind, besonders bei Quarz, wo ein Korn manchmal im Kerne noch nicht vollkommene Einregelung zur Großgleitfläche zeigt, von ihm gehen aber zwei Schwänze in entgegengesetzter Richtung aus, die vollkommen in die allgemeine Bewegungsform eingestellt sind, die wir aus den anderen Körnern der Umgebung entnehmen. Die Schwänze sind diejenigen Teile der Gleitschichten, die den Umriß schon überstiegen haben und in die Großgleitfläche hineingebogen wurden. Fig. 9a.

Nun kommt diese Eigenschaft der Verbiegbarkeit der Gleitschicht scheinbar den verschiedenen Mineralien in verschiedenem Grade zu. Es ist insbesondere auffallend, daß nach meiner Erfahrung Glimmer sich stets nach dem vorhergehenden Falle regelt, wonach für ihn keine Verbiegung der Gleitflächen möglich ist, daher sich seine

Einstellung nur langsam der Endlage nähert, während dem Quarze scheinbar die Schmiegsamkeit der Gleitschichten in hohem Maße zukommt. Dadurch erklärt sich eben das Vorkommen zweier verschiedener „s“-Flächenscharen bei nicht vollkommener Einregelung eines früheren Glimmer „s“.

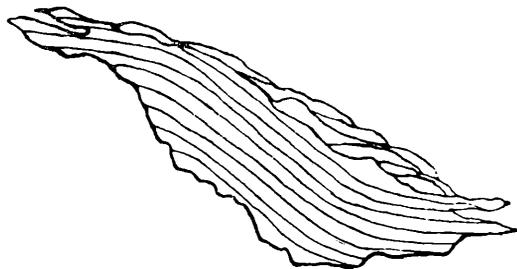
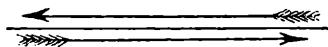


Fig. 9 a

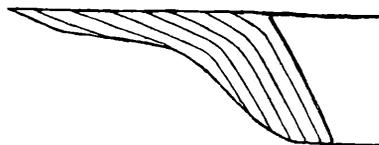


Fig. 9 b \*)

Damit erscheint der Quarz als eines der schieferholdesten Mineralien bei Kaltreckung, viel empfindlicher als Glimmer, der dafür eine früher bestandene Regelung viel treuer, auch durch eine nachfolgende Umformung durch aufbewahrt. Dabei haben wir bei Quarz den Satz, daß die Fläche 0001 die Gleitfläche sein muß. Damit ergibt sich, daß bei einer solchen Regelung das  $\gamma$  des Quarzes im Schiffe senkrecht zur Schieferung stehen wird. Eine Regel, die als Trenersche Regel wohlbekannt ist, sie ist in Sanders Arbeiten durch zahlreiche Beispiele belegt und bildet einen Teil seiner Quarzgefügeregel.

(Sander führt daneben für Quarz auch eine andere Art der Regelung an, die sogenannte Gammaregel, wonach diese Axe sich in „s“ einrichten kann, und zwar in einer ausgezeichneten Richtung derselben. Ich kann nach den hier geschilderten Anschauungen über den Weg der Einregelung mich seiner Ansicht hierüber nicht anschließen, daß es eine Regelung nach den Haupttaxen des Beanspruchungszustandes sei, kann aber mangels eigener Erfahrung über solche Fälle keinen Erklärungsversuch für diese jedenfalls auffällige Regelung geben. Vergl. Sander „Über einige Gesteinsgruppen des Tauernwestendes“ Jb. G. R. A. 1912, 258.)

So erweist sich die Gefügeregelung nach kristallographischen Richtungen als viel bedeutungsvoller als die Regelung nach Form. Von der Regelung nach Form zu unterscheiden ist aber die Ausgestaltung der Form der Körner durch die Gleitung. Die Gleitung bildet die Form der Körner um, wenn sie die Körner selbst durchsetzt. Die Art dieser Formveränderung ergibt sich am besten aus der Darstellungsweise, die Becker dafür gegeben hat. „Experiments on schistosity and slaty cleavage“. U. S. G. Geol. Surv. Bull. 241, aus der Form, die eine Kugel bei derselben Umformung erhalten würde. Sie wird durch einen einscharigen Gleitvorgang zu einem Ellipsoid, dessen große Achse umso länger wird, dessen kurze Achse desto kürzer, je weiter die Durchbewegung geht. Die mittlere Hauptachse behält dauernd den Radius der Kugel als Länge. Längste und kürzeste Achse liegen dauernd in der Vertikalebene durch die Gleitrichtung auf der Gleitfläche, dabei wird der Winkel zwischen Gleitfläche immer geringer, aber erst bei unendlich langdauernder Durchbewegung null. Als Gleitflächen sind dabei zunächst die Korngleitflächen zu verstehen, da aber daneben der Vorgang vor sich geht, daß diese sich den Großgleitflächen nähern, so ergibt sich dabei, daß bei dieser mechanischen Gefügeregelung gleichzeitig auch die Körner gestreckt werden und zwar angenähert in der Gleitrichtung. Es ist also so, als ob eine Regelung nach der Form stattgefunden hätte, der Vorgang ist aber der entgegengesetzte, die Form regelte sich nach der Gleitung.

So können wir eine geschlossene Gruppe von Gesteinen unterscheiden, die durch Störungserscheinungen in den Raumgittern ihrer wichtigsten Bestandteile bezeugen, daß bei ihrer letzten Gefügebildung wesentlich nur mechanische Vorgänge tätig waren. Diese Gesteine tragen unverkennbar die Anzeichen kristalliner Schiefer, die Regelung nach ausgezeichneten Flächen und Richtungen. Wir können sie daher als kaltgereckte Schiefer bezeichnen. Es kann also auch reine Durchbewegung ohne Molekülsatz Schieferung hervorbringen.

Es wurden diese Gesteine bisher zum Großteil unter die kristalle klastische Gefüge gerechnet, sie erscheinen in Heritsch „Grundlagen der alpinen Tektonik“ zum Großteil unter dem Kapitel: „Umformung unter Bruch“ Es erscheint aber jener Begriff nicht umfassend genug, es gehören zu den kaltgereckten Schiefen genugsam solche, die keine wesentlich unstetigen Umformungen zeigen, aber doch alle Kennzeichen der mechanischen Umformung tragen, wie viele Quarzites der unterostalpinen Serie.

Es rührt die bisherige Betonung des „Brechens“, der unstetigen Umformung hauptsächlich von der Eigenschaft eines der häufigsten gesteinsbildenden Minerals, des Quarzes, her, während oder nach der Umformung leicht in Scherben zerlegt zu werden, wodurch es leicht den Anschein haben kann, als ob die Formänderung nur durch Verschiebung an diesen Sprüngen vor sich gegangen wäre.

\*) Nach Polanyi.

So finden wir bei Heritsch l. c. unter den Umformungen unter Bruch die sogenannten Granitmylonite angeführt. Es ist diese Bezeichnung für viele der angeführten Fälle zum mindesten der Vorstellung nicht entgegenkommend, wäre besser durch eine andere Bezeichnung zu ersetzen, ist aber schon weitgehend in den Sprachgebrauch eingeführt. (Staub, Termier.) Die naheliegende Vorstellung von Mylonit ist die eines zermahlene Gesteines, eines Gesteines, wo in oben geschilderter Weise die Durchbewegung um die Mineralien herumgegangen ist, sie zu Mehl zermalmend, den Verband lockernd, man mag daneben an das Vorkommen an höchst durchbewegten Stellen denken, an das Vorkommen von Mischbewegungen etc.

Es wird aber dieser Vorstellung wenig entsprechen, wenn so verbandsfeste, mächtige Gesteinsplatten wie der Kellerjochgneis unter den Granitmyloniten geführt werden. Wohl aber fallen alle diese Gesteine in unsere Gruppe der kaltgereckten hinein. (In dieser Hinsicht erscheinen die Einwürfe Heritsch l. c. 120 gegenstandslos. Es wird dort meine Bezeichnung der Sekkauer Gneise als kaltgereckte Gesteine beanstandet. Diese zeigen aber genau dieselben Erscheinungen, die bei ihm 62 beim Granitmylonit des Kellerjochgneises angeführt sind, hätten also an dieser Stelle berücksichtigt werden müssen. Eine Kristalloblastese der Feldspate ist für die letzte Phase ausgeschlossen.)

Gerade bei diesen Granitmyloniten verlohnt es sich, den Umformungsvorgang näher zu betrachten.

Wohl sehen wir den Quarz dieser Gesteine vielfach von scharfen Grenzen durchzogen, welche Felder verschiedener, aber ineinander überführender optischer Einstellung voneinander scheiden, so daß man zugeben könnte, daß auch in den durchaus nicht seltenen Fällen, wo eine Unstetigkeit in der undulösen Auslöschung nicht zu erkennen ist, dies nur vorgetäuscht ist.

Doch sind in allen diesen Fällen die Quarze zweiachsig, die Raumbitter erscheinen also in jedem optisch getrennten Punkte schon als gestört. Was aber das Auffälligste ist, die Quarze erscheinen in allen diesen Fällen auffällig gut, der Richtung nach geregelt, nach dem Trenersehen Satze, daß 0001 in der Ebene liegt, die auch nach der Lage der Glimmer etc. als die Großgleitfläche des Umformungsvorganges wahrscheinlich ist. Diese Erscheinung durch diese Sprünge erklären zu wollen, geht wirklich nicht an, dies verlangt eine differentiell im Korne verteilte Durchbewegung. Es stimmt damit auch, daß die Quarze gerade jene Form zeigen, die aus einer differentiell verteilten Durchbewegung nach der durch Glimmer etc. nahegelegten Gleitflächenschar zu erwarten ist, wie wir oben am Deformationsellipsoid zeigten, diese langgeschwänzten, weichen Formen, die sich wie die Glimmer um Unebenheiten der Bahn herumschmiegen, wie sie durch Feldspate und anderes gebildet sein können.

Gerade Granitmylonite zeigen in den Quarzen oft Formen, die man nur durch Fließvorgänge, durch Verzerrung von Schlieren während des Fließens bildlich darstellen kann.

Versuchen wir festzustellen, welche Rolle die zunächst auffälligen Sprünge für die Gestaltung der Quarzkörner hatten. Wir sehen wohl, wie sie Felder trennen, die sich in ihrer kristallographischen Lage unterscheiden, es sind also sicher Verlagerungen an ihnen eingetreten. Forschen wir aber nach den Wegen, die bei diesen Verlagerungen zurückgelegt wurden. Es ist dabei zu bedenken, daß bei solch unstetiger Verteilung der Umformung auf die einzelnen Sprünge, auf den einzelnen davon unbedingt eine endliche Verschiebungsgröße entfallen müßte, wenn die Summe aller einen endlichen tektonischen Wert haben sollte. Wir müßten daher dort, wo diese Sprünge an die Korngrenze heraustreten, unbedingt die Stufen im Umriss bemerken, die durch diese Verschiebungen erzeugt worden sind. Davon ist aber wohl ausnahmslos keine Spur zu sehen. Beachte man ferner noch die Lage dieser Sprünge daraufhin, wieweit sie zuständig sein können, um die Formausbildung der Körner zu ermöglichen. Zur Erklärung der langgestreckten Form der Quarzkörner sowie übereinstimmend damit, zur Erklärung des übrigen Gefüges brauche ich Gleitflächen, die ziemlich genau mit der langen Achse der Körner übereinstimmen. Die Sprünge dagegen haben fast alle eine Lage, die mit der gestellten Forderung schon gar nicht übereinstimmen, sie laufen annähernd gleich mit der Lage von  $\gamma$  und wie wir erwähnt, steht dieses meist senkrecht zur Schieferung. Wir sind daher überhaupt nicht in der Lage, mit der häufigsten Art dieser Sprünge die Erklärung der Langgestalt dieser Quarzkörner zu geben. (Es sei aber darauf hingewiesen, daß unter Umständen auch Trennungen vorkommen, die die verlangte Lage haben, die also nicht entlang  $\gamma$ , sondern entlang  $\alpha$  verlaufen. An diesen haben sich dann stets gut erkennbare Verschiebungen vollzogen, sie sind nichts anderes als 0001 Gleitflächen, an denen bei der Verschiebung der Zusammenhang getrennt wurde, dürften nur unter Bedingungen auftreten, die der oben besprochenen Durchbewegung um die Körner herum nahestehen.)

Der naheliegende Schluß für die Umformung von Quarz geht also dahin: Quarz hat unter den Umständen, wie sie bei den meisten Kaltreckungen von Gesteinen vorlagen, eine einzige ausgezeichnete Gleitfläche, die Fläche 0001. Äußere Umstände, Unebenheiten der Bewegungsbahn können nun bewirkt haben, daß mit dieser ebenen Gleitung

nach einer Fläche das Auskommen nicht gefunden werden kann. So paßt sich denn das Korn (vielleicht erst nachträglich) durch Sprünge diesem Zwänge an; als Sprungrichtungen kommen insbesondere Flächen der Prismenzone in Betracht. Es würden also die Sprünge im Quarz die Rolle wie die Hilfgleitflächen der Großumformung spielen.

Ich bin der Ansicht, daß der Quarz, der in neuerer Zeit gerne zur Zweifeln an der bruchlosen Umformung herangezogen wird, eines der schönsten Beispiele für dieselbe ist, sobald man sich einmal davon überzeugt hat, wie wenig seine Sprünge geeignet sind, die so auffälligen Strähnformen seiner Körner z. B. im Lagenquarz zu erklären. (Sander, Über einige Gesteinsgruppen des Tauernwestendes, Jb. G. R. A. 1912, 280.)

Die gereckten Granite bieten sehr schöne Gelegenheit, Einblicke in das verschiedene Verhalten der einzelnen Mineralien gegen mechanische Umformung zu machen. Der Glimmer ist widerstandlos in „s“ zu Serizit verschmiert, der Quarz zu langen Fasern in „s“ ausgewalzt, dagegen der Feldspat, dem man doch nach Härte und Spaltbarkeit geringere Widerstandskraft zumuten möchte, als dem Quarz, dieser ist vollkommen ablehnend gegen eine Durchbewegung. Es muß schon eine ganz grobe Beanspruchung gewesen sein, insbesondere muß es in dem Gestein an genügend Quarz und Glimmer ermangeln, zur Ausbildung durchlaufender gleitfähiger Bahnen, um auch im Feldspat merkbare Verformung zu erzeugen. So sehen wir die großen Feldspate dieser Granitgneiße mit allen Anzeichen, daß sie sich der allgemeinen Durchbewegung nur durch fortwährendes Wälzen einfügen konnten; bezeichnend ist der ungemein häufige Fall, wo der Feldspat ein Eck in die Bewegungsbahnen des Quarzes und Glimmers hinausstreckt, diese zum Umfließen zwingend, was vollkommen unvereinbar ist mit einer Durchbewegung im Feldspate, was auch nur als ein festgelegter Augenblickszustand im Verlaufe der Wälzung zu verstehen ist.

Es ist die Möglichkeit vorhanden, daß in diesem Unvermögen des Orthoklases, wenigstens bei geringen Temperaturen, sich mechanischen Umformungen durch innere Gleitung anzupassen, die Ursache seiner Unbeständigkeit in höheren Tiefenstufen liegt. Es gibt ja für denselben Stoffbestand die ungleich gleitfähigere Gruppe Muskovit-Quarz. Es wäre das ein Einfluß der Durchbewegung auf den Phasenbestand des Systems, wie es von Sander in seinem Begriff der Deformationsmetasomatose, hier Deformationsverglimmerung, ausgesprochen wird. Es ist im Vergleich mit dem Orthoklas das Verhalten des Albits bedeutungsvoll, auch er kann der Durchbewegung nur durch andauerndes Wälzen nachkommen, wie es sich in den gerade bei Albiten häufigen Fällen von verdrehter in ihnen eingeschlossener Schieferung zeigt, („verlagertes si“ nach Sander). Er ist aber noch bestandfähig, wo Orthoklas vielfach schon vollkommen verglimmert ist, wohl deshalb, weil es für seinen Stoffbestand nicht ein entsprechendes gleitfähiges und bestandfähiges Glimmerraumgitter gibt.

Es sei hier noch eine Erscheinung besprochen, die sehr allgemein ist, die Mörtelbildung, die besonders in gereckten Graniten oft sehr schön zu sehen ist. Sie führt eigentlich schon in den nächsten Abschnitt hinüber. Wir haben eine Art der Mörtelbildung schon besprochen, die rein mechanische Zermalmung der Körner bei Durchbewegungen, die um die Körner herumgehen. Was aber in den meisten Fällen als Mörtelbildung geht, trägt durchwegs andere Züge. Wir erwarten von der Mörtelbildung der erwähnten Art, daß sie die Spuren der Bewegung noch an sich trägt, daß von den Körnern Scherben abgesprengt und verschleppt werden, wir erwarten von der Grenze des Mehls gegen die Körner, daß sie halbwegs als Bewegungsfläche möglichst ist. Die häufige Form der Mörtelbildung zeigt dem gegenüber merkwürdig „untechnologische“ Formen, man kann sich kaum vorstellen, daß sie das Ergebnis eines Durchbewegungsvorganges sind. Wir sehen sehr häufig inmitten eines gequälten Kornes oder randlich in Nischen eingelagert, einzelne oder Gruppen kleiner Körner; so daß es unmöglich ist, sich vorzustellen, daß diese wesentliche Wege gegen das Großkorn zurückgelegt haben, andererseits vereinigen sich diese Körner wieder zu geschlossenen Zügen und Strömen, die wieder oft spitzkeilförmig in zusammenhängende Großkörner eingreifen, auch hier ist dann eine Verschiebung gegen das Großkorn nicht vorstellbar. Die Kleinkörner haben meist merklich gleiche Größe, ihre Umrisse sind, wo sie einzeln auftreten, meist rundlich, wo sie gruppenweise auftreten, bilden sie oft ein ganz ausgezeichnetes Pflaster von Vieleckkörnern ohne daß eine Ausdehnung besonders bevorzugt wäre. Soweit die Untersuchung mit stärkster Vergrößerung möglich war, konnte noch nie eine optische Störung in ihnen nachgewiesen werden. Alles in allem ist dies ein Gefüge, das nicht den Eindruck eines mechanischen macht.

Dagegen ist es auffällig, welche Übereinstimmung dieses Gefüge mit dem besitzt, das beginnende Rekristallisation in einem kaltgereckten Metalle schafft. Vergleiche das Bild, das Masing, Rekristallisation v. Metallen, Naturwissenschaften 23, von einem solchen Falle gibt.

Wir haben schon erwähnt, daß bei der Erwärmung eines kaltgereckten Metalles die Störungerscheinungen zurückgehen. Es ist damit eine bezeichnende Rückformung des Gefüges verbunden, es zerfallen die gequälten

großen Körner in ein Haufwerk kleiner ungestörter. Dieser Vorgang hält sich nicht mehr an die Durchbewegung, er kann ihr ja beliebig lange Zeit nachfolgen.

Es liegt doch nahe bei dieser großen Übereinstimmung der Form bei Quarz und bei Metall, daß man es bei dieser Art der Mörtelbildung nicht mit einer mechanischen Zertrümmerung, sondern mit der Erscheinung des Kornzerfalles zu tun hat, es gehört also dieser Fall schon in den nächsten Abschnitt, Umformung unter Mitwirkung der molekularen Beweglichkeit. Bestärkt wird man in dieser Anschauung, daß diese Art der Mörtelbildung vielfach unter Umständen auftritt, wo auch andere Mineralien zeigen, daß an ihrer Umformung nicht mehr nur mechanische Einflüsse mitgespielt haben, wo z. B. Glimmer kaum mehr Störungen aufweisen. (Vergleiche das Beispiel, das Sander beim „Lagenquarz mit Zerfall“ gibt. Jb. G. R. A. 1912, 280.)

Die Ergebnisse zusammenfassend, sahen wir in den Schiefen mit Kaltreckung schiefrißes Gefüge auf rein mechanischer Art zustandekommen. Und zwar hat diese Regelung nicht bloß sich auf die Form beschränkt, sondern war eine ausgesprochene Richtungsregelung. Wie haben besonders darauf hingewiesen, welche große Bedeutung für diese mechanische Gefügebildung die stetige, die „bruchlose“ Umgestaltung hat.

Die geologische Bedeutung dieses Begriffes der kaltgereckten Gesteine ist die, daß man für sie bestimmte äußere Umformungsbedingungen, also insbesondere geringe molekulare Beweglichkeit ansprechen darf, wodurch die Räume, wo diese herrschte, scharf gegen andere abgrenzbar sind.

Da in reinen Fällen die Durchbewegung allein die Gefüge ausbildete, kann man annehmen, daß die dieser entsprechende Großbewegung die reine Summe aller Bewegungsvorgänge im Gefüge darstellt. Gefügeentwicklung unter Kaltreckung hat daher mit dem Ausdrucke Sanders ein vollkommenes tektonisches Korrelat.

## Chemische Umformung.

Bei der Besprechung der mechanischen Umformung haben wir diejenigen Umgestaltungen besprochen, bei denen nur eben die mechanischen Wirkungen der äußeren Kräfte im Spiele waren und nicht anderes.

Für die Besprechung der chemischen Umformung wird sich zeigen, daß wir eine derartige Ausschaltung anderer Umgestaltungsvorgänge in den meisten Fällen nicht machen können, meist werden wir neben dieser noch eine mehr oder weniger kräftige mechanische zulassen müssen. Es sollte daher die Überschrift über diesem Teil eigentlich heißen: „Umgestaltung unter Mitwirkung der chemischen Umformung“

Wir haben am Schlusse des vorigen Abschnittes in der Art der Mörtelbildung, die als Kornzerfallerscheinung gedeutet wurde, eine hier hereinreichende Erscheinung gesehen. Nun gibt es neben den besprochenen Gefügen rein mechanischer Natur, in der großen Gruppe der veränderten Gesteine eine, jene an geologischer Bedeutung noch weit übertreffende Schar von Gesteinen, in welchen, wenn auch mechanische Umformung auf sie eingewirkt hat, die Freiheit der Moleküle eine so große war, daß die Züge ihres Gefüges in weitestem Maße von ihr beherrscht wurden. Es ist bei diesen daher vielfach schwer, den Einfluß der mechanischen Umformung an ihnen nachzuweisen, also den Nachweis zu erbringen, daß die „Tektonite“ im Sinne Sanders sind.

Es ist dies diejenige große Gruppe kristalliner Schiefer, für die Becke den Namen Kristallisationsschieferung prägte, damit ausdrückend, daß das Wesentliche an ihrem Gefüge die Neubildung von Kristallen war.

Ich habe seinerzeit für dieses Gebiet den Ausdruck „Warmreckung“ aus der Metallkunde herübergenommen, als Ausdruck des Glaubens, daß auch für diesen Erscheinungsbereich das maßgebende die „Reckung“, die mechanische Durcharbeitung sei.

Wir haben der Warmreckung schon als Gegensatz zur Kaltreckung Erwähnung getan, es bezeichnet dieser Begriff jene mechanische Umformungsart bei höheren Temperaturen, wo keine Störungen der Raumgitter, keine Abänderung der physikalischen Eigenschaften mit der Durchbewegung verbunden sind. Sie zeitigt reichlich ähnliche Erscheinungsformen, wie sie bei der Kristallisationsschieferung der Gesteine auch auftreten. Ich halte diese Bezeichnung daher für recht passend, wenigstens für eine Reihe hierher rein gehöriger Gesteine, die Umformung zu bezeichnen.

Es deckt aber diese Bezeichnung nicht die ganze Erscheinungsmannigfaltigkeit der kristallinen Schiefer. Wir werden sehen, daß die Warmreckung hauptsächlich mit der Freiheit der Moleküle arbeitet, neue Bindungen einzugehen, ohne dabei aber die Lage zu Nachbarmolekülen wesentlich zu ändern, was ich als Bindungsfreiheit bezeichnen möchte. Wir werden im Gegensatz dazu sehen, daß wir bei vielen kristallisationsschieferigen Gesteinen den Molekülen auch Lagefreiheit zuschreiben müssen, nämlich die Fähigkeit, aus ihrem Verbande vollkommen

auszutreten, für sich auszuwandern, sich in eine neue Umgebung einzufügen. Auch hierfür gibt es in der Metallkunde genugsam Fälle, die „Diffusionen“ im Festen. Es wandert Kohlenstoff im Eisen z. B. beim „Härten im Einsatz“ und beim „Tempern“, es wandert Gold im Blei usw. Nur für den eigentlichen Warmreckungsvorgang hat diese Erscheinung wenig Bedeutung.

Immerhin erscheint es gut, zu untersuchen, ob und welche Gefüge der Gesteine der Warmreckung der Metalle entsprechen, für welche Gesteine man also nicht Lagenfreiheit, sondern nur Bindungsfreiheit der Massenpunkte anzunehmen braucht. Es ist dazu ein Eingehen auf die Erscheinungen der Warmreckung notwendig. Wird ein Metall z. B. Eisen oberhalb der Warmreckungsgrenze, also etwa bei Rotglut gereckt, so sehen wir im Gegensatz zur Kaltreckung keine Eigenschaftsänderungen mit dieser Durchbewegung verbunden, Härte, Festigkeit, Dehnung bleiben vollständig gleich. Betrachten wir das Gefüge, so sehen wir als erstes keine Störung der Körner, keine Spur einer Verbiegung. Über das ganze Korn spiegeln gleichzeitig die gleichen Flächen der zahllosen Ätzgruben ein. Auffällig ist ferner das Formgefüge, die Anordnung der Kornumrisse zueinander. Bei kaltgereckten Metallen sehen wir deutlich die Beziehbarkeit von Formgefüge zur Durchbewegung. Die Körner sind langgezogen, mit ihren Zipfeln zwischeneinander eingeklemt, ihr Umriss ist so, wie wir ihn aus dem Deformationsellipsoid erwarten können. Kaltgereckte Metalle zeigen ihre Tektonitnatur sofort im Gefüge, bei warmgereckten ist das Gefüge ganz anders. Bei Eisen, das glühend unter der Walze eine sehr hohe Streckung erfahren hat, sehen wir ein Gefüge, das wir auch gar nicht anders erwarten könnten, wenn es frisch vom Gusse her käme, die Umrisse der Körner zeigen keine Spur einer Beziehung zur Durcharbeitung, die Kornausmaße sind nach allen Richtungen annähernd dieselben (das Eisen ist ja tesseral), die Körner stoßen in Verlegenheitsgrenzen aneinander, kurz, wir würden nicht dieses Metall als Tektonit anerkennen, der es ja wirklich ist, wenn wir nicht an anderen Erscheinungen, gestreckten Schlackeneinschlüssen und Saigerungen, an Zeilenstruktur und ähnlichem die Wirkung der Durcharbeitung sehen würden.

Diese Unabhängigkeit der Kornform von der Durcharbeitung bei Warmreckung ist so scharf, daß das Vorhandensein in einer geringfügigen aber bei allen Körnern gleichartigen Streckung eines der schärfsten Kennzeichen einer für viele technische Zwecke schon unzulässigen Kaltreckung ist.

Die gleichen Erscheinungen wie bei Eisen finden wir auch bei allen anderen Metallen im Bereiche der Warmreckung.

Man sieht, daß bei Warmreckung neben der Durchbewegung auch noch andere Vorgänge ablaufen müssen, welche die Durchbewegungsfolgen zum Teile wieder wettmachen. Einen Aufschluß geben vielleicht die Änderungen, die ein kaltgerecktes Gefüge durchläuft, wenn es geglüht wird, also wenn die Kaltreckfolgen durch Erhöhung der Temperatur beseitigt werden. Die erste Erscheinung ist der Kornzerfall, dessen wir ja schon bei der Besprechung der Mörtelstruktur Erwähnung getan haben. Es richten sich die verzerrten Raumgitter wieder zu unverzerrten. Da dies aber nicht möglich ist, ohne daß die Korngrenzen Verschiebungen gegen die Umgebung durchführen, was also das Korn unbedingt wieder unter Zwang gegen die umgebenden Körner setzen müßte, zerlegt es sich lieber in so kleine Bereiche, daß deren Einrenkung ohne zu große Arbeitsleistung gegen die Umgebung möglich ist. Dieser Kornzerfall ist eine technologisch sehr wichtige Erscheinung, er ist das beste Mittel, ein Gefüge zu verfeinern, indem man das Stück bis unter die Grenze der Warmreckung herunter schmiedet und dann kurz nochmals über diese Grenze erhitzt.

Als zweiten Vorgang, der einsetzt, sobald die Raumgitter in Ordnung gebracht sind, haben wir die Sammelkristallisation (Kernverschmelzung) besonders bei höheren Temperaturen.

Die kleinen Körner aus dem Kornzerfall haben in ihrer großen Oberfläche eine zu große potentielle Energie. Wir sehen daher einen Vorgang ablaufend, der die Oberflächen einschränkt, es fressen die zufällig größeren Körner die kleineren auf, also dieselbe Erscheinung, die wir auch im Anwachsen des Gletscherkornes sehen. Es scheint aber der Vorgang nicht so einfach zu sein, wie er so gewöhnlich geschildert wird. Denn nach dieser Erklärung müßte die Korngröße ins Unbegrenzte wachsen können. Die Erfahrung aber zeigt, daß es für jede Temperatur eine Grenze der Korngröße gibt, die nicht überschritten wird. Es muß daher noch ein bis jetzt noch unbekannter Vorgang daneben verlaufen, der die Korngröße herabzusetzen bestrebt ist, so daß sich für jede Temperatur eine Gleichgewichtskorngröße ausbilden kann.

Kornzerfall und Kornwachstum setzen Freiheit der Stoffpunkte voraus, es ist aber ersichtlich, daß man dabei keine freien Wanderungen annehmen muß, man kommt vollkommen damit aus, den Punkten Bindungsfreiheit zuzuschreiben, die Fähigkeit aus einem Gitter aus- und in ein anderes einzutreten, wobei aber Punkte, die vorher benachbart waren, auch nachher wieder benachbart sind. Es verlegen sich bloß die Grenzen der verschiedenen Raumgitter.

Es ist nun durchaus möglich, die Warmreckung einfach als Kaltreckung zu betrachten, bei der sich diese Folgen des Kornzerfalles und der Sammelkristallisation unmittelbar im Verlaufe der Durchbewegung abspielen (Sander). Es ist aber dabei auch die Möglichkeit in Erwägung zu ziehen, daß die Gleitfähigkeit bei höheren Temperaturen so groß ist, daß Störungen überhaupt nicht mehr entstehen. Ein Anzeichen dafür, daß erstere Erklärung zulässig ist, sehe ich darin, daß bei Warmreckung gleich wie bei Kaltreckung differentielle Verteilung der Gleitung auf die verschiedenen Gleitflächen einer Schär die Regel ist. Erinnern wir uns an die Erklärung, die Karman für diese Erscheinung gibt, so besagt das, daß an der Gleitfläche, an welcher Verschiebung herrscht, die Reibung gewachsen sei. Das besagt aber, daß an dieser auch bei höheren Wärmegraden augenblickliche Kaltreckfolgen auftreten, die erst nachher wieder ausgeglichen werden.

Eine andere Frage ist die, ob mit Warmreckung der Metalle auch Gefügeregelungen verbunden sind. Es sind in dieser Beziehung Metalle nicht recht ergiebig, da wegen des tesseralen Kristallbaues der Metalle, andererseits wegen der Unzugänglichkeit für die Beobachtung im polarisierten Lichte die Beobachtung erschwert ist. Hier hat die Untersuchung mit Röntgenlicht wertvolle Ergebnisse geliefert, und zwar die Methode der Faserdiagramme von Marc, Polanyi, Schmid. (Siehe Polanyi: „Röntgenographische Bestimmungen von Kristallanordnungen“, Naturwissenschaften 1922.) Es zeigt sich, daß kaltgerekte Metalle eine ausgezeichnete Regelung besitzen, Gleichlagerung gleicher Kristallrichtungen, während zum mindesten bei gegliihten eine Regelung nicht bemerkbar ist.

Es kann dies mehrere Ursachen haben. Für die Kaltreckung ersahen wir die Ursache der Regelung darin, daß nur wenige Translationen des Gitters tatsächlich gleitfähig waren. Sobald nur eine solche Korngleitfläche in die Großgleitfläche hineingedreht war, entfiel jeder weitere Anlaß zur Verdrehung; und da nur wenige oder nur eine solcher Korngleitflächen bestand, gab es nur wenige oder nur eine Endlage der Regelung. Darf man nun annehmen, daß bei höheren Wärmegraden entsprechend der erhöhten Beweglichkeit der Massenpunkte auch noch andere Translationen gleitfähig werden, so ergeben sich eine solche Zahl verschiedener Endlagen, daß eine besondere Regelung nicht mehr erkennbar ist.

Ein anderer Einfluß, der die Schärfe der Regelung herabsetzt, wird in dem Kornzerfall und der Sammelkristallisation zu suchen sein. Es ist dadurch dem Zufalle Zutritt gewährt. Ein Kleinkorn, das durch Zerfall eines Großkornes entstanden ist, kann in seiner Lage von ersterem erfahrungsgemäß recht weit abweichen. Tritt nun Sammelkristallisation ein, so kann es vorkommen, daß gerade ein solch recht weit abweichend gelagertes die anderen aufzehrt. Der Einfluß dieser beiden Vorgänge wird daher in einer Streuung im Richtungsgefüge sich aussprechen.

Es ist nun außerordentlich naheliegend, daß dieser Umformungsvorgang der für Metalle eine solche Bedeutung besitzt, auch in der Umformung der Gesteine eine Rolle spielt, daß es daher auch warmgerekte Gesteine gibt, in dem Sinne, daß bei ihrer Gefügeausbildung neben der Durchbewegung nur Bindungsfreiheit und nicht Lagenfreiheit der Massenpunkte mitwirkte. Bis jetzt wurden solche Gesteine immer unter dem allgemeinen Begriff der kristallisationsschiefriigen Gesteine untergebracht und zu ihrer Erklärung die Möglichkeit des freien Molekülumsatzes betont. Es ist ja richtig, daß sich eine große Anzahl der Eigenschaften mit diesem Wege auch erklären lassen, es erscheint aber als eine unerwünschte Beschränkung, auf eine Erklärungsweise zu verzichten, die sich in der Metallkunde so gut bewährt hat, und dafür sofort mit dem allerdings leicht zu handhabenden Auswege des Lösungsumsatzes zu kommen.

Es gibt genugsam kristalline Schiefer, die sich vollkommen durch die einfachen oben geschilderten Vorgänge der Warmreckung erfassen lassen. Ich denke dabei besonders an eine bedeutende Gruppe der sogenannten Phyllite der Grauwackenzone, es gehören hieher vielfach Glimmerschiefer, besonders in den Übergängen zu Phylliten, während andere „tiefere“ zunehmend mehr den Lösungsumsatz zur Erklärung benötigen.

Auch diese warmgerekten Schiefer zeigen Regelung, und zwar ein ausgesprochenes Richtungsgefüge. Es zeigt sich aber gegenüber den kaltgerekten, daß der Grad der Regelung bei den verschiedenen Mineralien ein durchaus verschiedener ist. Bleiben wir bei dem Beispiele des Glimmerschiefers. Vollkommen geregelt ist der Glimmer, und nehmen wir geradeso wie bei den kaltgerekten Gesteinen an, daß das Regelnde die Durchbewegung sei, so werden wir finden, daß der Glimmer seine Eigenschaft nach 001 zu gleiten auch bei höheren Temperaturen nicht verloren hat. Dagegen ist es auffällig, daß der Quarz, dessen auffällige Regelbarkeit nach 0001 wir bei der Kaltreckung erwähnt haben, diese Eigenschaft weitgehend verliert. Es hat den Anschein, als ob bei höheren Temperaturen auch andere Flächen als 0001 bei ihm zu gleitfähigen werden.

Ein auffälliger Gegensatz zu den kaltgerekten Gesteinen zeigt sich auch im Formgefüge, bei jenen zeigten sich auffällige auch in den Kornumrissen „tektonische“ Formen, ausgezogen, langgeschwänzt, mit den Zipfeln ineinander verkeilt; ihre Großdurchmesser können wir leicht nach dem Gesetze des Deformationsellipsoides auf die Gleitflächenlage beziehen; bei warmgerekten dagegen sehen wir in der Form keine Tektonik mehr, geradeso wie bei den Metallen dringt jetzt das Streben nach der dem Kristalle eigentümlichen Tracht hervor. Bei Glimmern, Hornblenden etc., ist dies die Schuppenform, bei anderen insbesondere Quarz, Feldspat, bei welchen nicht eine Abmessung in der Tracht besonders betont ist, sehen wir nur das Streben nach allseitiger Konvexität. Bei ihnen sind die Grenzen Zufallsgrenzen, sehr oft gegen die im Glimmer herrschende Schieferung steil gestellt. Wo bei den genannten eine besondere Einstellung der Form zur Schieferung vorhanden ist, verdankt dies meist einer anderen Ursache ihre Entstehung, die schon unter das fällt, was Sander „Erhöhte Wegsamkeit des Schiefers in „s““ nennt. Wenn nämlich die Glimmerlagen eines Schiefers eng gestellt sind, so kommt es häufig vor, daß die Mineralien der dazwischenliegenden Lagen nicht allseitig das ihnen durch die Temperatur vorgeschriebene Ausmaß erreichen können, sie können sich nur in einer Richtung ausbreiten. So finden wir dann zwischen Glimmerlagen Zeilen langgestreckter Quarzkörner. Ihre Grenzen stehen meist auffällig senkrecht zur Schieferung.

Dabei ist alles spiegelblank, ohne Anzeichen einer Störung.

Man ist bei solchen Gesteinen, die außerordentlich häufig sind, wirklich nicht in der Lage, anzugeben, wozu man bei ihnen einen freien Molekülumsatz bemüßigen sollte, man kommt für sie vollkommen mit den Vorgängen aus, die wir als Durchbewegung, Kornzerfall und Kornverschmelzung kennen gelernt haben. Die Durchbewegung gestaltet das Gefüge um, die beiden anderen rücken aber die gequälten Körner sofort wieder zurecht.

Von diesen drei Einflüssen ist nur die Durchbewegung ein gerichteter. Wir werden daher alles, was ausgesprochenes Richtungsgefüge ist, auf die Durchbewegung zurückführen. Wir werden daher geradeso wie bei der Kaltreckung in der Schieferung die Darstellung der Gleitflächen sehen, wenn nicht, geradeso wie bei jener der Fall vorliegt, daß es alte „s“-Flächen sind, die in einer den neuen Gleitflächen angenäherten Lage weiterdauern.

Dagegen werden wir in bezug auf die Beziehbarkeit des Formgefüges auf die Umformung des ganzen Gesteines nicht denselben Schluß ziehen, wie bei der Kaltreckung. Dort war die Großumformung das Integrale aus allen Umformungen der einzelnen Körner. Hier wirken bei der Umformung der Korngestalt sowohl die Durchbewegung mit, als auch die an keine Richtung gehaltenen Vorgänge des Kornzerfalls und des Kornwachstums, die der Größe nach die Wirkung der Durchbewegung für das Einzelkorn vollkommen verwischen können. Die Großumformung ist aber nur die Summe aller Teildurchbewegungen, die beiden anderen Einflüsse summieren sich ja nicht, da sie keine einheitliche Richtung innehalten. Es hat in diesem Sinne das Formgefüge bei Warmreckung kein tektonisches Korrelat.

Ist dagegen eine Form gleichgültig gegen Kornzerfall und Kornwachstum, so zeigt sich, daß deren Veränderung sehr wohl der Großumformung korrelat ist. Ein Beispiel dafür ist das, wenn in dem Schiefer ein Gerölle eingeschlossen liegt; dann sieht man, daß die beiden Einflüsse aus seinem Quarz wohl ein Vieleckpflaster schaffen können, wie auch aus anderen Quarzen, auf die Grenze haben sie aber so gut wie keinen Einfluß, können sie nur zu einer feingezackten Form umschaffen. So sehen wir, daß solche Gerölle in einem kristallisationsschiefrigen Gesteine, in dem sonst die Durchbewegung ganz verhüllt ist, die Ellipsoidformen zeigen, die bei einer Gleitung aus ihnen entstehen müßte.

(Siehe Sander: „Beitr. aus den Zentralalpen zur Deutung der Gesteinsgefüge“. Jb. G. R. A. 1914, 588.)

Andere derartige Fälle werden uns noch später beschäftigen.

Wenn ich so zu zeigen versuchte, daß für einen Großteil der kristallisationsschiefrigen Gesteine es nicht notwendig ist, zu Vorgängen der Lagenfreiheit der Massenpunkte zu greifen, etwa zu freiem Molekülumsatz, zu Lösungsumsatz, so soll damit dessen Bedeutung nicht geleugnet werden; es gibt zahlreiche Fälle, wo man ohne ihn nicht auskommen kann. Nur möchte ich damit zu einer vorsichtigeren Verwendung dieses Begriffes geraten haben.

Wenn wir uns also jetzt diesem Vorgange zuwenden, dem Einflusse der vollkommenen Molekülfreiheit auf Gestalt und Gefüge der geologischen Körper, so wollen wir zunächst die Wege dieses Stoffumsatzes betrachten.

In der Arbeit „Mechanische Probleme der Gebirgsbildung“, Mitt. Geol. Ges. Wien 15, habe ich, vom Studium der Metalle herkommend, die Ansicht ausgesprochen, daß der in der Geologie beliebte Weg, für diesen Stoffumsatz

die Lösungen als Übertragungsmittel zu benutzen, also vom Lösungsumsatz zu sprechen, eigentlich überflüssig sei. Bei Metallen sehen wir die Moleküle, wie schon an Beispielen gezeigt wurde, ohne weiteres Hilfsmittel durch die festen Kristalle wandern. Ich glaubte, daß dies auch bei Gesteinen geradeso möglich sei, glaubte daher den Lösungsumsatz als Gedankenkrücke behandeln zu können.

Doch sprechen Erscheinungen dafür, daß dem nicht so sei, daß bei Gesteinen der Weg durch das Feste wesentlich reibungsvoller sei, so daß wirklich dem Lösungsumsatze der Hauptanteil der Stoffwanderung zufiele.

Bestimmend hiefür ist insbesondere die Häufigkeit der gesteinsbildenden Mineralien, der bei Plagioklasen, Hornblenden, Zoisit-Epidoten, Turmalinen eine ganz allgemeine Erscheinung ist. Es ist für die Betrachtung jetzt ganz gleichgültig, ob wir von Schiefen oder Eruptivgesteinen ausgehen. Betrachten wir einen zonar gebauten Kristall, der aus einer Schmelze entstanden sei. Mit einer Schmelze von bestimmter Zusammensetzung kann nur ein Mischkristall einer bestimmten Zusammensetzung im Gleichgewicht sein. Ein Zonarbau sagt, daß das Ausfallen so rasch gegangen sei, daß das Korn sich nicht bis in sein Innere mit der Schmelze ausgleichen kann\*).

Dies besagt, daß ein solcher Kristall nicht bloß seiner Schmelze gegenüber, sondern auch in sich selbst nicht im Gleichgewicht sein kann, daß das Streben herrschen muß, die Stoffunterschiede an seinen verschiedenen Stellen auszugleichen.

Zonarbau kommt auch bei Metallen vor, ist z. B. bei den Mischkristallen im Gußmessing etwas ganz allgemeines. Es genügt aber hier ein nur einige Stunden währendes Glühen, um die Stoffunterschiede in demselben Korne vollkommen auszugleichen.

Daß wir bei Silikaten Zonarbau so häufig sehen, sagt uns, daß zum mindesten für die genannten Mineralien die freie Wandermöglichkeit der Moleküle so gering war, daß ein Ausgleich dieser Unterschiede bis jetzt nicht erfolgt ist, trotzdem gerade bei Eruptivgesteinen genügend lang eine solche Temperatur geherrscht haben mag, die den Austausch eigentlich begünstigt hätte.

Was für diese Mineralien gilt, muß nicht gleicherweise für alle gelten. Vielleicht sind die isomorphgemischten Minerale, bei denen man einen Zonarbau nicht erkennt, — meiner Erfahrung nach gehört Olivin dazu — solche, bei welchen diese Stoffwanderung im Festen leichter verläuft.

Sichere Anzeichen einer Molekularwanderung im Festen finden wir bei Entmischungen, z. B., beim Perthit. Wir sehen, wie die aus dem Anorthoklas austretenden Natronfeldspatmoleküle sich durch den Orthoklas hindurch zu den Perthitspindeln sammeln, aber auch hier sagen die kleinen Abstände der Spindeln, daß jede nur einen beschränkten Bereich beherrschte; auch hier war die Wanderfähigkeit beschränkt. Will man also den Weg der Stoffwanderung ohne Hilfsmittel auch nicht ganz versperren, jedenfalls sehen wir, daß er für Silikatgesteine so reibungsvoll ist, daß er kaum auslangt, den verlangten Stoffumsatz zu bewältigen. Es erscheint also die Heranziehung des Umsatzes durch Lösung als gerechtfertigt.

Dieser Lösungsumsatz hat aber als Angriffsflächen nur die Kornoberfläche, als Bewegungsbahn nur die Kornzwischenräume.

Es ist ersichtlich, daß wir für sein Wirken andere Erscheinungsformen werden erwarten müssen, als für vollkommen freie Stoffwanderung. So sind bezeichnende Formen für ihn die des Ersatzes des Kalifeldspates durch Natronkalkfeldspat die Myrmekitformen, die von außen herein blumenkohlartig in den Orthoklas hineinwuchern.

Bei den geringen Mengen, in denen das Lösungsmittel in den Kornzwischenräumen sich aufhält, kann man erwarten, daß es jeweils gegen die Umgebung vollkommen gesättigt ist.

Damit nun ein Lösungsumsatz zustandekommt, ist ein Gefälle des chemischen Potentials notwendig.

Hiefür ist zunächst zu bemerken, daß in einer Lösung die osmotischen Drucke der verschiedenen Bestandteile voneinander unabhängig sind, geradeso wie in einem Gasgemenge die verschiedenen Gase ganz voneinander unabhängig sein können. Es kann also auch das Gefälle des chemischen Potentials für jeden Bestandteil ein verschiedenes sein.

Sehr schöne Beispiele, wie sich gerade für einen einzigen Bestandteil Sondergefälle ausbilden, unabhängig davon, was sonst vorgeht, sehen wir in der Bildung der Porphyroblasten. Es ist eine eigenartige Erscheinung dieses Sonderwachstums einzelner Mineralien. Man sieht, wie jedem Keim ein bestimmter Hof zugewiesen ist, aus

\*) Vergleiche auch Boeke, Eitel „Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie“ 515.

dem er sich seinen Stoff zusammengelohnt hat. In auffallend unregelmäßig-regelmäßiger Anordnung sind Granaten über den Hauptbruch eines Schiefers verstreut, mit großen Abständen dort, wo die Granaten groß wuchsen, mit kleinen, wo sie winzig blieben. Untersucht man die Verteilung im Querbruch, so findet man, daß die Granatabstände hier viel geringer sind, die Reichweite eines Keimes war quer zur Schieferung viel kleiner als entlang der Schieferung. Die Wegsamkeit der Schiefer ist in „s“ bedeutend größer als quer dazu. (Sander.) So hat sich hier gerade für die Granatsubstanz ein sehr verwickeltes Potentialfeld ausbilden können und das in einem Gestein, das vielleicht in keinem anderen Bestandteil einen Lösungsumsatz mit Sicherheit erkennen läßt, das wir sonst ganz ruhig in unsere Gruppe der warmgerekten Gesteine rechnen könnten.

Der Lösungsumsatz ist in hohem Maße auswählend.

Nun lautet die Frage: Wodurch werden solche chemische Potentialgefälle hervorgerufen?

Insbesondere wichtig ist diese Frage für die Bewertung der tektonischen Bedeutung des Lösungsumsatzes. Es kann nicht abgeleugnet werden, daß ein Lösungsumsatz, der nach einem großzügigen Plane vor sich geht, auch tektonische Wirkung hervorbringen kann, wir haben ja an einer Stelle Stoffabbau, an einer anderen Stoffabsatz, dort Volumsverminderung, hier Volumszunahme, was jedenfalls auch die Gestalt der geologischen Körper verändern kann.

Es läßt sich für unseren Zweck die Frage noch schärfer fassen: Ist es zulässig anzunehmen, daß das Wirken des Lösungsumsatzes der Wirkung der äußeren mechanischen Kräfte korrelat ist? Mit anderen Worten: Darf ich annehmen, daß ein Körper durch den Lösungsumsatz annähernd an denselben Ort gebracht wird, an den er auch gelangen würde, wenn die angreifenden Kräfte die Verlagerung rein mechanisch durchführen würden? Dann wäre dieser Vorgang des Lösungsumsatzes nichts anderes als eine „andere Form des Gesteinsfließens nach dem Druckminimum“. Es hat diese Anschauung in der neueren Betrachtungsweise der Kristallgesteine einen großen Raum gefunden. Sie geht aus von der Becke-Grubenmannschen Vorstellung über Kristallisationschieferung, in ihrer äußersten Anwendung ist sie in Lachmanns Gebirgsbildungshypothese durch Kristallokinese enthalten. (Zur Beurteilung des Gesteinsfließens durch Lösungsumsatz ist es gleichgültig, ob man annimmt, daß ein Molekül von der Entnahmestelle weg den ganzen Weg in einem Zuge in gelöstem Zustande durchläuft, oder ob es sich gleich wieder an einer Stelle niedrigeren Potentials niedersetzt, dafür ein anderes gleiches von dort auf die Wanderung geht, wie es in der Becke-Grubenmannschen Darstellung geschildert ist.)

Wir haben das Wirken der mechanischen äußeren Kräfte der Gebirgsbildung durch ein Potentialfeld beschreiben können. Eine Gesteinsmasse, die diesem Felde ausgesetzt ist, strebt dem Minimum zu, das es auch erreicht, soweit es nicht durch die Reibung daran gehindert wird. Unsere schärfere Fassung der Frage läßt sich auch so ausdrücken: Läßt sich annehmen, daß das chemische Potentialfeld sich mit diesem mechanischen soweit deckt, daß in jedem Punkte der Sinn der Gefälle beider Felder derselbe ist? Dann wird das Großergebnis beider Wege der Umlagerung dasselbe sein, wenn auch in den Einzelnerscheinungen große Unterschiede zu erwarten sein werden, da ja die hemmenden Einflüsse bei beiden grundverschieden sind.

Das Verbindungsglied zwischen der chemischen und der mechanischen Umformung bildet für die genannten Anschauungen das Rieckesche Prinzip. Es lautet in seiner einfachsten Fassung: Der unter Zwang stehende Körper ist leichter löslich als der zwanglose.

Der Satz ist unbedingt richtig. Und wenn er allein herrschen würde, dann fielen auch das Minimum des chemischen Potentials mit dem des mechanischen zusammen, denn dort ist sicher der Zwang am geringsten. Dann wäre es auch für den Großbau gleichgültig, ob nur mechanische oder auch chemische Vorgänge die Umformung bewirkten, auch durch reinen Lösungsumsatz würden sich zum Schlusse alle Stoffe, die einen langsameren, die anderen rascher, in diesem Minimum wieder zusammenfinden.

Es ist aber nicht richtig, daß nur das Rieckesche Prinzip das chemische Gefälle beherrscht; sobald ein Stoff in Lösung ist, wirken auch andere Einflüsse darauf ein, die nichts mit der mechanischen Beanspruchung zu tun haben.

So können wir annehmen, daß das Temperaturgefälle Einfluß auf das Gefälle des osmotischen Druckes hat. (Soret's Satz.) Wenn die Lösung unter Volumsveränderung stattfindet, z. B. Volumsverminderung durch Elektrostriktion, dann hat auch der hydrostatische Anteil der Beanspruchung, unter dem jeweils auch die Lösung stehen muß, Einfluß auf jenen.

Dann werden die Stellen mit hohem hydrostatischen Druck übersättigt sein gegenüber jenen mit geringem, und diese Stellen fallen durchaus nicht mit jenen größten mechanischen Zwanges zusammen, es ist im Gegenteil wahrscheinlich, daß die Stellen geringsten mechanischen Potentials zugleich auch recht tief liegen, daher großen hydrostatischen Druck aufweisen.

Es ist aber schwer, eine Schätzung der einzelnen Einflüsse durchzuführen. Jedenfalls muß man sich aber gefaßt machen, daß der Lösungsumsatz eine Stoffverlagerung in ganz anderer Richtung zustande bringen würde, als es durch die mechanischen Kräfte zustande käme. Es ist vielleicht das die Ursache, daß die Salzlagerstätten einen so seltsam untechnologischen Eindruck machen, sie sind Umformungen nicht nach dem mechanischen Potential, sondern nach dem chemischen.

So ist die tektonische Wirkung des Lösungsumsatzes jedenfalls sehr mit Vorsicht zu behandeln, seine Gleichsinnigkeit mit dem mechanischen ist mehr als zweifelhaft. Wenn das aber nicht zutrifft, werden wir aber in den seltensten Fällen seine Wirkung in der Großtektonik erkennen können, denn neben mechanischer Formveränderung die Wirkungen des Umsatzes, die nur in Änderungen der Volumina bestehen können, auszuschneiden, werden wir kaum in der Lage sein.

Was mich aber am meisten veranlaßt, einem allgemeinen molekularen Verlagerungsvorgang auf größere Entfernung hin Mißtrauen entgegenzubringen, ist eine induktive Erfahrung. Jedes Gestein hat seine ihm eigentümliche Lösung. Wir haben besonders in einem Sediment- oder in einem Paragesteingebiet nebeneinander die größten Unterschiede im chemischen Gesteinsbestande. Es sind sicher hier Konzentrationsgefälle in den Lösungen vorhanden, die diejenigen weit übersteigen müssen, die durch das Rieckesche Prinzip verursacht sein können. Wenn Lösungsumsatz etwas so einfaches wäre, müßte er längst schon zu einem vollständigen Stoffausgleich über weite Gebiete geführt haben.

Wir sehen aber sehr wenig derartiges. Wir sehen mit später zu besprechenden Ausnahmen, daß die Neubildungen in einem Gestein immer wieder derart sind, wie sie nur aus dem Stoffbestand eben dieses Gesteines zu erwarten sind, wir sehen, daß dort, wo die Lösung aus einem Gesteine in Spalten ausfiel, der Stoffbestand dieser Gangfüllung eben wieder dem Gesteine entspricht. In den Radstätter Tauern führen die Spalten Quarz, soweit sie im Quarzit verlaufen, wie sie in den Kalk hineinsetzen, verschwindet nach wenigen Metern der Quarz vollständig vor dem Kalkspat.

Es ist doch auffallend, daß bei den großen Unterschieden, die der osmotische Druck desselben Bestandteiles in den verschiedenen Gesteinen haben muß, ausgiebige Ausgleicherscheinungen so selten sind. Es gibt nur einige Erscheinungen, die vielleicht als solche Ausgleichsgebilde deutbar sind, vielleicht gehört hieher das Amphibolitband, das in den Glimmerschiefergebieten der Alpen so häufig die Marmorzüge begleitet. Aber auch dieses zeugt mit seiner Schwächigkeit eher für die Unzulänglichkeit dieses Ausgleichsvorganges.

Man gewinnt den Eindruck, daß auch der Weg des gewöhnlichen Lösungsumsatzes außerordentlich reibungsvoll ist, so daß auch große Unterschiede in den Sättigungen keine nennenswerten Stoffverfrachtungen zuwegebrachten. Und da soll man dem sicher sehr geringen Rieckeschen Einfluß auf die Sättigung eine derartige Wirkung zuschreiben?

Nun ist es eigenartig, daß neben dieser allgemeinen Seßhaftigkeit des Stoffes Fälle von zügellosem Wandertrieb vorkommen, ohne daß man Ursache und Herkunft kennt. Wohl immer sind es Wanderungen einzelner Stoffe oder Kerne. Diese Überschwemmungen mit solchen Fremdstoffen sind die Ursache, daß man vielfach in der Systematik der kristallinen Schiefer mit dem Grundsatz der Erhaltung des Stoffbestandes nicht durchkommt, sie sind auch wohl die Ursachen der manchmal so rätselvollen plötzlichen „kristallinen Mobilisierungen“, die nicht immer auf Durchbewegungen zurückzuführen sind, sondern ihnen manchmal merklich nachfolgen, wie wir es bei der „Abbildung“ sehen werden.

Ein hervorragendes Kennzeichen dieses Lösungsumsatzes möchte ich in der Porphyroblastenbildung sehen, in der so merklichen und auffälligen Beweglichkeit eines einzigen Bestandteiles in einem Gestein, das vielfach im übrigen Bestande unserem Bilde eines warmgerekten Gesteines ohne weiteren Umsatz außerordentlich entspricht. Ich möchte dabei nicht annehmen, daß regelmäßig der ganze Stoff des Porphyroblasten von fernher gebracht wurde — vielfach entspricht er wie gerade Granat dem Bestande der Umgebung sehr gut — sondern an die Bringung von Mineralisatoren, die gerade einen einzigen Bestandteil eines Gesteines beweglich machen. In anderen Fällen erscheint aber der ganze Porphyroblast gesteinsfremd; meiner Ansicht nach gilt dies für viele Biotite in Gesteinen, denen man sonst diesen Magnesia-Eisengehalt nicht zusprechen möchte.

Zu solchen Überschwemmungen gehören z. B. die Durchtränkungen der Gesteine mit Albit, Biotit, überhaupt die für die Grauwackenzone so bezeichnende Zufuhr von Magnesiaverbindungen, Bildung von Magnesit, Dolomit-Talk. Hiezu gehört die von Weinschenk und Heritsch beobachtete weitgehende Durchsetzung des alpinen Kristallins mit Turmalin, hieher auch wahrscheinlich der Ersatz des Kaliums der Gesteine durch Natrium, der so vielfach zu bemerken ist. (Becke.)

Das Rieckesehe Prinzip, das tektonische Potentialgefälle war sicher nicht die Ursache dieser Wanderungen, dafür spricht schon die Raumverteilung dieser Einbrüche. Unbekümmert um die tektonischen Bewegungsbahnen dringen sie wie Batholiten wohl aus der Tiefe hervor, durchtränken fleckweise, randlich verlaufend, die Gesteine.

Geradeso wie wir aus der Füllung der meisten Adern in den Gesteinen auf die Seßhaftigkeit der Stammlösung in diesen schlossen, gibt es nun auch Gangfüllungen, die solchen wandernden Lösungen entstammen, die wesensfremd sind den angrenzenden Gesteinen, die gerade wegen dieser Fremdheit, weil sie nicht die alltäglichen Stoffe führen, für uns wichtig sind, es sind die Träger der Lagerstätten.

Wir können wohl mit großer Wahrscheinlichkeit diese Art des Lösungsumsatzes als Ausfluß eines Magmenherdos betrachten, geradeso wie wir es für diese Lagerstätten tun, müssen aber sagen, daß sein Wirken für uns noch ein Rätsel ist, dessen Lösung noch viel zu fern ist, als daß wir seinen Einfluß auf die Tektonik erkennen oder beschreiben könnten. Es wird also hier eine Ansicht vertreten, die in Bezug auf den Lösungsumsatz den Anschauungen Termiers, teilweise auch Weinschenks nahesteht, die aber diesen Umsatz nur als eine Sondererscheinung betrachten will, während der Hauptteil der Metamorphose im Wesentlichen ohne Lösungsbetätigung als „Warmreckung“ vor sich ging.

Betrachten wir die Bedeutung des Lösungsumsatzes für die Kleinformen des Gesteines.

Wieder ist es das Rieckesehe Prinzip, welches zur Erklärung der Einwirkung des Lösungsumsatzes auf das Gesteinsgefüge herangezogen wird. Aus der Anschauung heraus, daß dieser Satz zu allgemein zur Erklärung der verschiedensten Erscheinungen herangezogen wird, wird es gut sein, über die Grenzen und Möglichkeiten seines Wirkens sich ein Urteil zu schaffen.

Die Fassung dieses Gesetzes nach Riecke hat nur die elastischen Formbeanspruchungen, also die elastischen Winkeländerungen des Raumgitters im Auge gehabt, tritt doch in der Formel Rieckes der Elastizitätskoeffizient auf. Es ist nun jedenfalls eine Erweiterung des Gesetzes dahin erwünscht, daß nicht bloß dieser, sondern ein jeder mechanische Zwang die Löslichkeit erhöht, so auch der, welcher durch die Kaltreckung verursacht ist, ist ja doch bei Kaltreckung die Erhöhung der Löslichkeit sicher festgestellt.

Es ist ein wesentlicher Unterschied des Lösungsumsatzes gegen die anderen Arten molekularer Beweglichkeit, daß er unabhängiger von der Temperatur ist. Es ist ein allgemeiner Satz, daß die Vorgänge in einer Lösung denen in einer Schmelze vergleichbar sind, wenn nicht Sondervorgänge zwischen Lösungsmittel und Gelöstem auftreten, nur erscheint alles in ein tieferes Temperaturgebiet gerückt. Wir sollten daher den Lösungsumsatz im Gefüge auch bei den kaltgereckten Gesteinen sehen, wir sollten erkennen, daß die unter Zwang stehenden Körner schwinden und neue zwanglose aufgebaut werden. Und dieser Umbau sollte gerade bei diesen kaltgereckten Gesteinen bedeutend sein, denn hier wirkt nicht bloß der Zwang der elastischen Beanspruchung fördernd auf die Löslichkeit ein, sondern noch der aus der bleibenden Störung.

Was wir sehen ist ein ziemlich grobes Bild, wenigstens für Silikatgesteine. Wir sehen im Innern kaum ein Anzeichen eines gerichteten Umsatzes, nur dort, wo Hohlräume die Lösung weitgehend von der Belastung befreit haben, finden wir die entsprechenden Absätze. Also eine bemerkenswerte Unempfindlichkeit dieses Einflusses, wenn man bedenkt, daß er auf die feinen Unterschiede, die zur Gefügeregelung notwendig sind, ansprechen soll. Nur für Karbonatgesteine scheint der Unterschied zwischen der Löslichkeit des Beanspruchten und nicht Beanspruchten größer zu sein, hier sind Umlagerungen, die wir als Lösungsumlagerungen nach der Beanspruchung deuten könnten, häufiger.

Nun ist die Frage, ob dieser Rieckesehe Einfluß bei höheren Wärmegraden größer ist als bei niedrigen. Wohlbemerkt, es handelt sich hier nicht um die Löslichkeit, diese ist sicher bei höheren Temperaturen größer als bei niedrigen, sondern um den Unterschied der Löslichkeiten von beanspruchten und nicht beanspruchten. Hier im Gebiete der Warmreckung entfallen aber die bleibenden Störungen, die einen wesentlichen Anteil des Zwanges bei niedrigen Temperaturen gebildet haben mögen, nur mehr die elastischen Formänderungen können für die Erhöhung der Löslichkeit nach Riecke in Betracht gezogen werden. Wie weit können aber hier elastische Beanspruchungen überhaupt auftreten? Haben wir doch eingangs ernstlich die Frage gestellt, ob es, besonders bei höheren Temperaturen, eine Elastizitätsgrenze überhaupt gibt, jedenfalls aber liegt sie sehr tief. Das heißt, ein Korn kann hier nur eine sehr niedrige elastische Beanspruchung erhalten. Daher liegen hier die Verhältnisse für einen gerichteten Lösungsumsatz nach Riecke noch ungünstiger, es kommt jeweils die mechanische Umformung der durch Lösungsumsatz zuvor, die gerichteten Beanspruchungen schwinden durch Gleitbewegung und nicht durch Lösungsumsatz.

Dann ist aber hier noch die Frage, die zu wenig gestellt wird, wie das Gelöste Gelegenheit haben soll, frei von Beanspruchung wieder auszufallen. Jedes ausfallende Korn wächst ja wieder in das Beanspruchungsfeld hinein, muß sofort wieder seinen Anteil an der allgemeinen Beanspruchung auf sich nehmen. Es gibt nur wenige Fälle, wo man eine zeitweilige Entlastung annehmen kann, z. B. in den Winkeln, die sich zwischen Porphyroblasten und der auseinandergezwängten Schieferung bilden, die sich mit neugebildeten Kristallen füllen.

So bin ich sehr zweifelnd gegen die Anwendung des Rieckeschen Satzes für den Lösungsumsatz, kenne nur eine Erscheinung, wo man ohne ihn kaum durchkommt, und das ist die Platzfrage bei Porphyroblasten. Wie kommt es, daß im festen Gestein unvermittelt ein Kristall wächst, vielfach mit ausgezeichneter Innehaltung der ihm zukommenden Form? Wir können oft keine schönere und vollkommener Form von ihm verlangen, wenn er in einer Flüssigkeit gewachsen wäre, die ihm bereitwilligst Platz machte. Hier aber mußte er sich den Platz dazu erst schaffen. Wo ist das, was früher an dieser Stelle war, hingekommen, und wie hat er es fortgeschafft? Nur zum Teile können wir annehmen, daß er die Stoffe zu seinem eigenen Aufbau mitverwendet hat.

In diesem Falle kann man wohl annehmen, daß sein Wachstumsdruck um ihn herum eine Sonderbeanspruchung erzeugte, die, wo sie sich nicht in mechanischer Umformung auslöste, wie man an den auseinandergetriebenen Glimmerlagen sieht, die Löslichkeit erhöhte, so daß die im Wege liegenden Körner weggeschafft wurden. Dabei geschieht dieses Weglösen auswählend, ein Granat kann einen Quarz, einen Feldspat zur Auflösung zwingen, die Beanspruchung erhöht also die Löslichkeit für diese mehr als für den Granat. Einem Glimmer kann er aber nichts anhaben, entweder er drängt ihn auf die Seite oder er umwächst ihn. Nicht weggeschaffen kann er auch Erz, kohlige Stoffe etc. Sie werden umwachsen, behalten ihre Lage bei, so daß sie als eingeschlossenes "si" die alte Schieferung an dieser Stelle noch kennzeichnen. Häufig gesellen sich dazu noch Reste von Quarzkörnern, mit denen der Granat in der Schnelligkeit nicht fertig wurde.

Es müssen also sicher in Betracht kommende Stoffmengen hier zum Wandern gebracht worden sein und eine Mitwirkung des Rieckeschen Einflusses ist hier sehr naheliegend.

Auf dem Rieckeschen Satze beruht nun die Erklärungsweise des Richtungsgefüges kristallisationsschiefriger Gesteine nach Becke-Grubenmann. Trotzdem uns unsere obige Untersuchung zu Zweifeln an der Zulänglichkeit dieses Einflusses für den Lösungsumsatz geführt hat, verdient doch diese Theorie als erste und wegen ihrer folgerichtigen Durchführung eindrucksvollste, ein genaueres Eingehen, wobei unsere Zweifel an der Zulänglichkeit der Grundlage vorerst nicht in Betracht gezogen werden möge.

Die Theorie baut auf der Vorstellung vom Beanspruchungszustand am Körperelement auf, die wir ja eingangs kennen gelernt haben.

Wir hatten dort die Vorstellung von den drei Hauptbeanspruchungen gewonnen, deren Richtungen aufeinander senkrecht stehen. Von ihnen ist die eine die größte, die andere die kleinste Normalbeanspruchung dieses Elementes, die dritte hat eine mittlere Größe. Senkrecht auf jeder dieser Beanspruchungen stehen die drei Hauptebenen, in jeder von ihnen liegen also jeweils die beiden anderen Hauptbeanspruchungen. Es sind das jene Ebenen, für die die Beanspruchung keine scherende Wirkung hat.

Nun macht die geläufige Handhabung des Rieckeschen Satzes folgende Ableitung. Siehe Grubenmann „Krist Schiefer“, S. 60. In der Achse des größten Druckes sei die Löslichkeit durch eben diese Beanspruchung größer, es erfolge also in dieser Richtung Auflösung. Dagegen sei in der Richtung des geringeren oder geringsten Druckes die Löslichkeit geringer. Die Lösung, die sich dort gesättigt hat, sei also für diese Kornrichtung übersättigt; daher erfolgt hier Anwachsen, dort Auflösung. Die Folge sei ein Auswachsen des Kornes in der Richtung geringsten Druckes, wodurch eine Regelung erzielt werde.

Es wird also angenommen, daß durch die gerichtete Beanspruchung die Löslichkeit des Kornes ein Vektor geworden sei. Es kann diese Möglichkeit nicht abgewiesen werden. Aber das Rieckesche Prinzip gibt keine Handhabe dazu. Denn da es thermodynamisch abgeleitet ist, da in seinen Grundlagen keine Richtungsgrößen vorkommen, darf man auch nichts Derartiges aus ihm herauslesen.

Welche Widersprüche herauskommen, wenn man an diesen Satz derartige Zumutungen stellt, lehrt ein einfacher Gedankenversuch. Wir denken beim Rieckeschen Satz in der Geologie nur an Druckbeanspruchungen, tatsächlich behandelt er Zugbeanspruchungen genau gleich. Auch eine Zugbeanspruchung erhöht die Löslichkeit genau gleichviel wie die gleiche Druckbeanspruchung. Hätten wir also das Gestein unter einem Beanspruchungszustande, mit lauter Zugkräften als Hauptspannungen, von denen eine die größte, die beiden anderen kleiner wären, dann müßten wir in genau gleichem Gedankengange wie früher schließen, daß sich die Körner in der Richtung der größten Zugkraft auflösen, dafür in der Richtung der kleineren durch Anwachsen ausdehnen. Wir

bekämen eine Schieferung senkrecht auf die größte Zugbeanspruchung. Nun können wir aber, ohne etwas für uns Wesentliches daran zu ändern, diesen Zugbeanspruchungszustand in einen Druckzustand überführen, indem wir einfach einen hydrostatischen Druck-Beanspruchungszustand von genügender Größe darüberlegen. Dadurch bleibt die Art des Zwanges unbeeinflusst. Dadurch wird aber die Richtung des größten Zuges zur Richtung des kleinsten Druckes, die frühere Richtung des kleinsten Zuges wird jetzt die des größten Druckes. Würde jetzt die Umlagerung stattfinden, so müßte offenbar die Richtung der Schieferung senkrecht auf die letztere Richtung liegen, senkrecht zu jener Lage, die wir früher für sie erhalten hätten. Durch Hinzufügen eines richtungslosen Einflusses hätte sich also dieser Vektor Schieferung um 90 Grad verdreht. Dies besagt, daß es unmöglich ist, auf dem Rieckeschen Satze in dieser Fassung Vektoreigenschaften der Löslichkeit herauszulesen.

Es soll aber damit nicht das Kind mit dem Bade ausgegossen werden und geleugnet werden, daß gerichtete Beanspruchung nicht auch die Löslichkeit gerichtet beeinflussen könne, sie bringt ja sonst auch, z. B. in Gläsern die schönsten Anisotropien zustande. Nur ist die Thermodynamik mit ihren Werkzeugen nicht imstande, solche Richtungsgebundenheiten zu behandeln. Diese Erscheinungen müssen erst auf einem anderen Wege untersucht werden, und da wird sich jedenfalls ein Gesetz ergeben, das Zugspannungen entgegengesetzt beurteilt, wie Druckspannungen.

Die Erklärung der Kristallisationsschieferung nach Becke-Grubenmann ergibt nur die Möglichkeit einer Formregelung, derart, daß die größte Erstreckung eines Kornes zum Beanspruchungszustande, damit auch zum Gesteinskörper eine bestimmte Lage einnimmt, gleichgültig, welche Lage diese Größterstreckung zum Raumgitter des Kornes hat. Sie versagt gegenüber der Erklärung der Richtungsregelung, gegenüber der Tatsache, daß in kristallinen Schiefen das Auffällige das ist, daß Raumgitterrichtungen geregelt sind.

Eine genauere Untersuchung des Einflusses des Beanspruchungszwanges auf die Löslichkeit müßte daher von den Veränderungen des Raumgitters ausgehen, sie kann recht wohl zu Ergebnissen führen, daß die Löslichkeit nach Richtungen verschieden beeinflußt wird, daß es also eine günstigste Lage des Raumgitters im Beanspruchungszustande gibt, die das Korn einzunehmen trachtet, wenn nichts anderes eine andere Lage von ihm verlangt. Auf Grund dieses Satzes wäre dann ein widerspruchsloser Aufbau nach den Gedankengängen der Becke-Grubenmannschen Ableitung durchaus möglich, man hat daher als möglich ins Auge zu fassen, daß die Richtungsgebundenheit, die diese verlangt, tatsächlich wirkt, daß also das, was die krist. Schiefer in ihrer Richtung beherrscht, die Hauptflächen oder wenigstens die Hauptfläche senkrecht auf die größte Druckkraft ist.

Wir sind dadurch in eine eigenartige Lage gekommen.

Haben wir einen Beanspruchungszustand, der nicht allseitig gleichartig ist, so haben wir als wahrscheinliche Folge eine mechanische Formänderung. Wir haben oben abgeleitet, daß Gleiten nach einer einzigen Schar Gleitflächen die wahrscheinliche Bewegungsform ist, in welcher sich diese Beanspruchung auslöst. Für die Lage dieser Gleitflächen zum örtlichen Beanspruchungszustande haben wir wohl keine strenge Verknüpfung feststellen können, soviel aber ist sicher, daß sie nirgends mit den Hauptflächen des Beanspruchungszustandes zusammenfallen können, weil an diesen eben keine Scherkraft wirkt.

Wir haben aber bei der Besprechung der Gefügebildung durch Kaltreckung gesehen, fanden es auch für Warmreckung gültig, daß ein Mineralkorn so lange keine Ruhe hat, als es nicht mit einer ausgezeichneten Korngleitfläche in die Großgleitfläche sich eingelagert hat. Solange also Gleitung vor sich geht, muß die Gleitfläche die bestimmende Richtung der Anisotropie des Gefüges sein. Gleichzeitig aber sehen wir, daß derselbe nicht hydrostatische Beanspruchungszustand nach der Becke-Grubenmannschen Ableitung eine Regelung der Mineralien nach den Hauptflächen erschließen läßt. Diese beiden Bezugsflächen müssen aber nach dem obigen stets einen Winkel miteinander einschließen. Wir müssen also entweder in einem solchen Gestein zwei verschiedene sich kreuzende bestimmende Ebenen finden, oder, wo das nicht vorkommt, annehmen, daß einer der beiden Einflüsse seiner Größe nach unzulänglich ist, um sich im Gefüge auszudrücken. Und bei kristallisationsschieferigen Gesteinen ist es nun eben die Regel, daß man nur eine bestimmende Ebene erkennt.

Für die Regelung nach dem Rieckeschen Prinzip sei darauf hingewiesen, daß wir zu gewichtigen Zweifeln, nicht an seiner theoretischen Gültigkeit, wohl aber an seiner Wirksamkeit, besonders für Silikatgesteine gekommen sind.

Dagegen erscheint es mir unmöglich, der Durchbewegung Einfluß auf das Gefüge abzuspochen, da sie ja, solange sie andauert, schon aus rein geometrischen Gründen, immer wieder alles, was im Gesteine gerichtet ist, durch Umfaltung etc. in ihre Richtung hinüberzwingt.

Es ist die Regelung nach dem Rieckeschen Satze eine statische, dagegen die Regelung nach den Gleitflächen eine dynamische, begabt mit einer sehr großen Leistungsfähigkeit.

Sobald wir also annehmen können, daß ein Gestein Durchbewegungen ausgesetzt war, können wir in der Schieferung nur Gleitflächen oder ältere Schieferung in größerer oder geringerer Annäherung an die Gleitflächenlage sehen. Die Entscheidung für Regelung nach Hauptflächen oder Gleitflächen liegt also im Nachweise einer erfolgten Durchbewegung.

Um aber den Vorstellungen Becke-Grubenmann Gerechtigkeit zu erweisen, sei zuvor ein Fall besprochen, in dem wirklich eine Regelung nach den Hauptflächen erfolgt sein dürfte, wo wir wirklich die beiden sich schneidenden Schieferungen sehen, allerdings nacheinander entstanden, wo wir für die eine nicht den richtenden Einfluß einer Gleitung annehmen dürfen.

Es betrifft dies die Regelung von Porphyroblasten, insbesondere die Regelung der Querbiotite.

Wir sehen oft in einem außerordentlich straffen Glimmerschiefer, in dem die Muskovite auf das schönste gleichlaufend geordnet sind, neugebildete Biotite, die sich um die Ordnung der anderen Glimmer durchaus nicht kümmern, steil zu ihrem „s“ stehen. (Becke hat gezeigt, wie mit diesem Querstand auch meist eine gedrungene Form verbunden ist.) Nun zeigt genauere Untersuchung, daß vielfach die Lage dieser Biotite nicht vollkommen frei ist, sondern daß sie einander mehr oder weniger gleichlaufend angeordnet sind. Es ist oft nicht leicht, diese Feststellung zu machen, da bei dem großen Abstände der Stücke oft nur einer oder ein paar in einem Schlicke gewöhnlichen Ausmaßes auftreten. Verfolgt man aber ihre Lage in einem größeren Bereiche, etwa auf einem größeren Anschlicke, so findet man, daß die Querbiotite untereinander oft eine manchmal recht vollkommene Schieferung bilden, die die andere Schieferung schneidet. Ein sehr schönes Beispiel hiefür, schon im Dünnschliff erkennbar, fand ich in der Sammlung von Dünnschliffen krist. Schiefer nach Grubenmann Voigt und Hochgesang, „Glimmerschiefer von St. Gotthard“, dessen Querbiotitschieferung in der Arbeit Schmidt „Statistische Methoden zur Untersuchung krist. Schiefer“, Sitz der. Ak. d. Wiss., Wien, 1917, dargestellt ist.

Hier haben wir die zwei sich kreuzenden Schieferungen, eine, die die Hauptmasse beherrscht, die ich als einfache Schieferung durch Warmreckung ohne wesentlichen Lösungsumsatz beschreiben möchte, dann die zweite unter einem recht bedeutenden Winkel dazu, sie betrifft nur ein einziges Mineral, den Biotit. Sie ist jünger als die erstere, da die Biotite „si“ zeigen, sie haben die ältere Schieferung in sich in Form von Lagen von Erz, Epidot, Chlorit, Muskovit eingeschlossen.

Für diese Schieferung eine neuerliche Durchbewegung anzunehmen, ist nicht angängig, da sie nur ein einziges Mineral beherrscht, eine Gleitung müßte den ganzen Mineralbestand ergreifen, wir müßten auch im Muskovit den regelnden Einfluß dieser Durchbewegung sehen. Für die Regelung dieser Querbiotite kommt wohl nur eine nach den Hauptebenen in Betracht.

Es sagt uns diese Erscheinung, daß es tatsächlich einzelne Mineralien gibt, die im Augenblicke ihrer Bildung so empfindlich gegen den Rieckeschen Einfluß sind, daß sie sich bei Abwesenheit von Durchbewegung nach den Hauptebenen einstellen. Gleichzeitig können wir aber auch für die anderen Mineralien die Unempfindlichkeit gegen denselben feststellen. Erstere werden es sein, die in solchen Gesteinen die so auffälligen Querlagen bevorzugen.

Uns obliegt es nun nach dieser Abschweifung, nach Kennzeichen zu suchen, die feststellen lassen, ob ein Gestein im Zusammenhang mit der Ausbildung seines Gefüges eine Durchbewegung mitgemacht hat. Es könnte der Beweis ja aus der Großtektonik gebracht werden, jedoch ist es leider nicht immer möglich, beim Studium seines Gefüges schon eine Übersicht über die großtektonische Geschichte zu haben, dann ist es auch nicht möglich, aus den Großerscheinungen den Zusammenhang zwischen Durchbewegung und Gefügebildung jeden Zweifel ausschließend festzustellen. Daher lautet die Frage so: wie kann aus dem Gefüge nachgewiesen werden, daß ein Gestein eine Durchbewegung erlitten hat?

Ich möchte zu diesem Zwecke auf eine Eigenheit des Gefüges näher eingehen, die Gefügesymmetrie\*).

Betrachten wir den Querschlicke eines kristallisationschiefrigen Gesteines, etwa eines Glimmerschiefers, so haben wir ein Bild, das einer gewissen Symmetrie nicht entbehrt. Wir haben eine ausgezeichnete Richtung, die der Schieferung, und können in diese eine Symmetrieebene senkrecht auf den Schlicke hineinlegen, etwa so wie bei einem Kristall, wo es uns bei der Festlegung einer Spiegelebene nur auf deren Richtung und nicht auf den Punkt, durch welchen wir sie legen, ankommt. Diese Symmetrie ist dadurch gebildet, daß wir, falls z. B. ein Glimmerblättchen eine von der Spiegelebene abweichende Lage hat, auch solche von zur Spiegelebene gegen gleicher Lage ebenso häufig finden. Fig. 10.

\*) Vergl. Sander „Zur petrogr.-tektonischen Analyse“ Ib G. B. A. 23, 206, Becke in Fortschritten der Min. u. Petr. 24.

Da es sich nur um Richtungen ohne Polarität handelt, hat das Bild ferner von selbst eine zweizählige Drehachse senkrecht auf die Bildebene. Die Folge davon ist, daß mit der einen Spiegelebene der Schieferung gleichzeitig auch eine zweite senkrecht dazu auftritt.

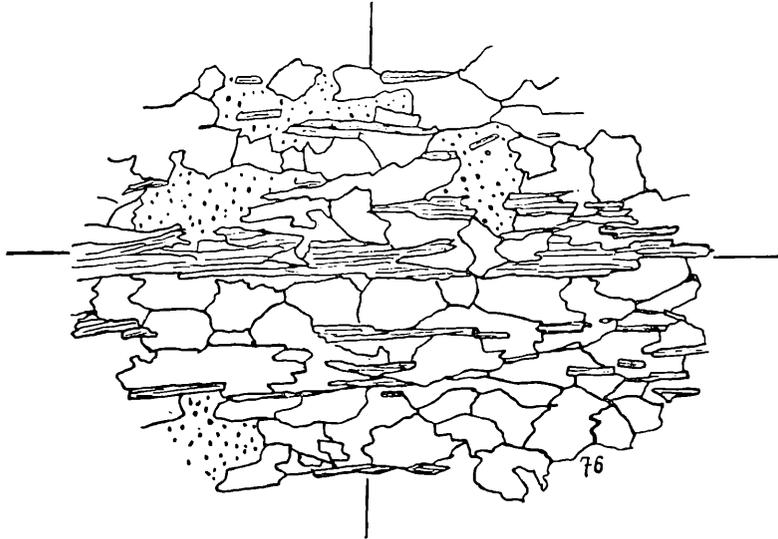


Fig. 10

Machen wir die Untersuchung am Längsschliff, so sehen wir dieselbe Erscheinung; wieder zwei aufeinander senkrecht stehende Spiegelebenen.

Gehen wir also von diesen beiden Schliffen auf den Symmetriegrad des ganzen Gesteines über, so können wir ihm drei Symmetrieebenen zusprechen, die aufeinander senkrecht stehen, wir können daher sagen, ein vollkommen kristallisationschiefriges Gestein hat rhombische Symmetrie.

Es ist nun sehr naheliegend anzunehmen, daß dasjenige, was dieses Bild erzeugt hat, eben derselben Symmetrie unterworfen war, wie das Bild selbst.

Betrachten wir daraufhin die beiden Anschauungen über die Entstehung der Kristallisationschieferung.

Die Becke-Grubenmannsche Theorie sieht das Bestimmende im Beanspruchungszustande, die Schieferung ist eine Hauptebene. Der Beanspruchungszustand ist nun selbst rhombisch symmetrisch, er besitzt in den drei Hauptebenen drei aufeinander senkrecht stehende Symmetrieebenen. Es ist also durchaus möglich, die drei Hauptebenen mit den drei Spiegelebenen des Gefüges zusammenfallend sich vorzustellen.

Diese Übereinstimmung von Ursache und Ergebnis im Ordnungsgrad wäre eine der stärksten Befürwortungen der Anschauung Becke-Grubenmann.

Betrachten wir daraufhin die zweite Vorstellung, daß die Schieferung durch den Gleitvorgang bedingt sei. Welchen Ordnungsgrad hat ein einfacher Gleitvorgang? Betrachten wir einen Schnitt durch einen von einem solchen betroffenen Körper, und zwar verlaufe er senkrecht zur Gleitfläche und entlang der Gleitrichtung. Können wir hier annehmen, daß die Spur der Gleitfläche auf unserem Schnitte eine Spiegelachse ist? Nein, das ersieht man schon aus der üblichen Darstellung der Bewegungsrichtung der Gleitung durch zwei Pfeile beiderseits der Gleitfläche die in entgegengesetzter Richtung zeigen. Wohl aber können wir dem Bilde eine zweizählige Drehachse senkrecht auf den Schnitt zuschreiben.

Dagegen hat ein Schnitt senkrecht zur Gleitfläche und senkrecht zur Gleitrichtung wohl eine Spiegelebene senkrecht zur Spur der Gleitfläche mit unserem Schnitte. Dagegen ist die Spur der Gleitfläche selbst keine Spiegelachse, denn man beachte, daß oberhalb der Spur die Bewegungsrichtung z. B. in den Schnitt hinein, unterhalb aber heraus geht. Fügen wir die Ergebnisse dieser beiden Schnitte zu einem Raumbilde zusammen, so können wir dem Gleitvorgang nur eine monokline Symmetrie zuschreiben, eine zweizählige Drehachse und eine Spiegelebene senkrecht dazu.

Diesen Ordnungsgrad können wir nicht so ohneweiters mit dem Ordnungsgrade der Kristallisationschieferung in Einklang bringen. Es sei denn, daß wir annehmen dürfen, daß die letztere in Wirklichkeit nicht rhombisch sei, sondern monoklin-pseudorhombisch.

Daß ein reines Durchbewegungsgefüge monoklin ist, im Schnitte entlang der Durchbewegungsrichtung nur die darauf senkrecht stehende zweizählige Drehachse zeigt, sehen wir an vielen kaltgereckten, also rein mechanischen Gefügen. Wohl sehen wir das Vorragen des Wertes der Schieferungsebene, versuchen wir aber diese sowie die Senkrechte dazu zu Spiegelebenen zu ernennen, so versagt dies an dem Verhalten der anderen Richtungen. Betrachten wir die Zerspaltungen der Quarze so stehen diese wohl in der Regel steil zur Schieferung, wir sehen aber, daß diese Sprünge oft alle im selben Sinne von der Senkrechten abweichen, sie sind durch nachfolgende Bewegung alle in selbem Sinne umgelegt. Es findet also eine ausgesprochene Richtung nicht ihre Gegengleiche. Das gleiche gilt für die Kornform. Sehr häufig, gerade bei Graniten finden wir schief rautenförmige Korngestalten, alle nach derselben Seite schief gelagert, es ist das nichts anderes als die Schräglage des Defor-

mationsellipsoides, von der wir oben sprachen. Wir können diesem Längsschnitte also nicht die beiden Spiegelebenen zuweisen, wohl aber erfüllt er die Bedingungen für eine zweizählige Drehachse senkrecht zu ihm. Ein solches mechanisches Gefüge ist also tatsächlich monoklin. Fig. 11.

Aber schon bei solchen mechanischen Vorgängen sieht man wie ein solches monoklines Gefüge in ein pseudorhombisches umgewandelt werden kann. Wir haben gesehen, daß mit weitergehender Umformung immer mehr alle Gefügelinien in die Lage der Gleitfläche hineingedreht werden. Denkt man sich den Vorgang sehr weit vorgeschritten, so wird uns nichts mehr hindern, die Gleitflächenspur als gerade so auch die Senkrechte zur Gleitflächenspur, Spiegelebenenspur aufzufassen, weil es in dem Gefüge eben keine Linie mehr gibt, die von dieser Lage so merklich abweicht, daß man an ihr nachweisen kann, daß die rhombische Symmetrie nicht zutrifft. Dann ist das Gefüge rhombisch, weil es sich aber aus einem monoklinen stetig herausgebildet hat, darf man es nur als pseudorhombisch bezeichnen.

Gehen wir zu den kristallisationsschieferigen Gesteinen über. Wie gesagt sind diese es, bei denen man so leicht den Eindruck der rhombischen Gefügeordnung erhält. Es finden sich aber gerade in solchen Gesteinen oft Stellen, welche zeigen, daß der eigentliche Bau nur monoklin sein kann, daß aber etwas mitwirkte, welches seine Abweichungen vom rhombischen eben bis auf jene Stellen vollkommen verwischte.

Die auffälligsten Beispiele liefern die Fälle des „verlagerten si“, die Zeugnisse der in Porphyroblasten eingeschlossenen Schieferung. Die Erscheinung ist ja genügend bekannt. Viele Porphyroblasten konnten bei ihrem Wachstum nicht alles, was früher den Platz einnahm, verdrängen, sie mußten Teile des Gesteines in sich aufnehmen.

Dabei blieben meist diese Reste in ihrer gegenseitigen Anordnung erhalten, zeichnen daher noch immer die ursprüngliche Schieferung nach, es ist das die eingeschlossene Schieferung, nach Sanders Bezeichnung „si“. Man findet diese Erscheinung sehr häufig bei Granaten, Biotiten, Albiten, Chloritoiden.

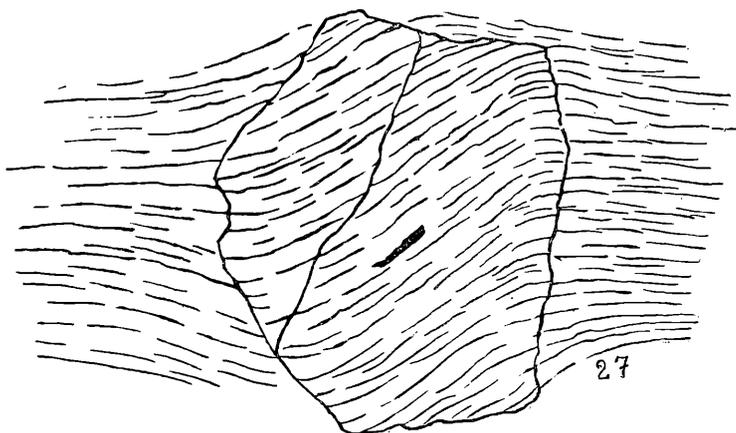


Fig. 12

das verlagerte „si“ schließt es vollkommen aus, daß Schieferungsfläche und Senkrechte darauf Spiegeflächen sind, tatsächlich läßt sich das Gefüge nur durch eine zweizählige Drehachse senkrecht zum Schriff beschreiben. Diese Erkenntnis der monoklinen Ordnung des Gefüges war in diesem Falle nur durch das Vorhandensein der Porphyroblasten ermöglicht. Dies legt aber außerordentlich nahe, daß auch in solchen Fällen, wo nicht eine solche Erscheinung uns aufklärt, die rhombische Ordnung nur eine vorgetäuschte ist, daß tatsächlich monoklines Gefüge vorliegt.



Fig. 11

In den meisten Fällen hat aber dieses „si“ nicht mehr die Lage, wie die Schieferung außerhalb, also wie auch die Schieferung gelegen sein dürfte, deren Abbild sie ist, sie ist verdreht „verlagert“. Fig. 12. Vielfach ist sie dabei auch S-förmig verkrümmt. Siehe die Darstellungen in Heim, Geol. d. Schweiz II 101 und Schmidt, „Bewegungsspuren in Porphyroblasten kristalliner Schiefer“, Sitz.-Ber. Ak. d. Wiss. Wien, 18.

Dabei gilt als Regel, von der ich bisher keine Ausnahme kenne, daß die Verlagerung bei allen Porphyroblasten desselben Stückes im selben Sinne erfolgt.

Für die Grundmasse eines solchen Gesteines mag die schönste rhombische Symmetrie gelten,

Versuche, die Gefügeordnung messend zu erfassen, haben gezeigt, wie häufig solche Abweichungen von rhombischer Symmetrie sind. Schmidt, Statische Methoden zur Gefügeuntersuchung kristalliner Schiefer, Sitz.-Ber. Ak. d. Wiss. Wien, 17. Anm. (Es muß hier beigefügt werden, daß monokline Gefügeordnung auch dadurch erzeugt werden kann, daß zwei Schieferungen sich schneiden, wie es das obige Beispiel der Querbiotite betrifft, diese Fälle sind also aus unserer Überlegung auszuschalten, was nach dem ganzen Bau sehr leicht möglich ist.)

Die Erklärung des Bewegungsvorganges, der die Verlagerungen bewirkte, ist sehr einfach, er ist einfach das Wälzen des Kornes bei einer differentiellen Durchbewegung, das wir bei der Kaltreckung beschrieben haben, die dann besonders andauernd sein wird, wenn, wie bei Granat, das Korn keine ausgesprochene Eigengleitfläche besitzt, die eine Festlegung zur Großgleitfläche erwirkt. Wir sehen in diesen Fällen den unmittelbaren Nachweis, daß das Gestein einer Durchbewegung nach oder während der Bildung dieser Porphyroblasten unterlegen ist. Wer die Häufigkeit dieser Erscheinungen erkannt hat, wird geradeso wie der Geologe, der die Großverlagerungen gesehen hat, sagen, daß der Großteil der Gesteine großer Gebiete, es gilt das nicht für alle Bereiche, z. B. nicht für Finnland, im Zusammenhang mit der Ausbildung kristallinen Gefüges Durchbewegung mitgemacht hat. Für diese ist es dann aber ausgeschlossen, in der Schieferung Hauptebenen zu sehen, sondern es bleibt allein die Annahme möglich, daß die Schieferung entweder die Darstellung der Gleitflächen sei oder ein älteres „s“ in Anschluß an die Gleitflächenlage.

Was ist aber dasjenige, was in kristallisationsschieferigen Gesteinen die monokline Ordnung durch die rhombische verdeckt hat? Es kann nur das sein, was jene von den kaltgereckten Gesteinen unterscheidet, nämlich das Mitwirken der chemischen Umformung, die größere oder geringere Freiheit der Moleküle, die Bindungen, vielleicht selbst den Platz zu wechseln. Das sind Einflüsse, die wohl eine vorgeschriebene Richtung, eine vorgeschriebene Ebene nachzuzeichnen im Stande sind, nicht aber, da ihnen keine polaren Eigenschaften zukommen, das Bezeichnende einer Gleitbewegung, daß nämlich beiderseits einer Ebene die Bewegung entgegengesetzten Sinn hat, wodurch ja die Drehsymmetrie des Bewegungszustandes hervorgerufen wird. Deshalb stellen sie nur das dar, was ihnen erreichbar ist, also die Gleitfläche, lassen den Gleitsinn ganz unbeachtet. Es ist bezeichnend, daß alle Formen, die der chemischen Umformung nicht erreichbar sind, immer noch die Drehungssymmetrie anzeigen, wo in den anderen Formen schon längst nur mehr die rhombische übrig geblieben ist. So ist nicht erreichbar eben das „si“ in den Porphyroblasten, nicht oder nur in verschwindendem Maße erreichbar ist auch die Gestalt eines Gerölles in einem solchen kristalloblastischen Schiefer, wovon wir schon gesprochen haben, das dann als schräggelagertes Ellipsoid nur mehr eine monokline Symmetrie des Gefüges zuläßt, nicht erreichbar sind ferner größere Formen, die schon bei Schlißgröße beginnend, dann zu den tektonischen Großformen hinaufführen, z. B. liegende Fältelung, die auch in Gesteinen, deren Kleingefüge sehr schön rhombisch ist, sehr häufig sind. Eine liegende Falte ist aber ein ausgezeichnet monoklines Gebilde mit zweizähligen Drehachsenstellen in den Mittelpunkten der Haupt- und der Mittelschenkel.

So erscheint für einen Großteil der kristallisationsschieferigen Gesteine es wahrscheinlich, es gilt dies insbesondere von den alpinen, daß ihre scheinbar rhombische Symmetrie nur vorgetäuscht ist, daß sie tatsächlich monoklin ist. Damit ist gesagt, daß bei ihrer Gefügebildung Durchbewegung wesentlich beteiligt ist. Für diese besteht dann aber nicht mehr die Möglichkeit, in der Schieferung die Darstellung der Hauptflächen zu sehen, die sich nach dem ausgebauten Rieckeschen Satz so ausgedrückt hätten, sondern nur die Möglichkeit, die Gleitflächen als Bezugsflächen für das „s“ anzunehmen.

Überblicken wir nun, zu was für einer Stellungnahme wir dem Lösungsumsatz gegenüber gekommen sind. Eigentlich zu einer recht zweifelnden, was die bisherigen Anschauungen über die Bedeutung seines Wirkens und die Bedingungen seines Auftretens anbelangt. Insbesondere mußten wir seinen Zusammenhang mit den mechanischen Beanspruchungen nach dem Satze Rieckes fast vollkommen streichen. In seiner Wirkung für die Großformen erschien er nicht als unmittelbare Wirkung der mechanischen Beanspruchung, sondern als ein eigener Vorgang, dessen Zusammenhang mit der Gebirgsbildung vielleicht wohl ein mittelbarer ist, ebensoweit wie vulkanische Äußerungen an gebirgsbildende Vorgänge gebunden sind. Die Erkenntnisse aus den Tauern sagen geradeso wie manche aus der Schweiz, daß wohl die geologische Lage für ihn von Bedeutung ist, daß gegen die Tiefe, gegen die Wurzel hin sein Wirken zunimmt, nicht von Bedeutung war, dagegen der tektonische Vorgang selbst.

So werden wir auch sein Wirken für das Gefüge vorwiegend für diese Fälle der rätselhaften Einwanderungen von Stoffen anwenden, entweder Stoffe, deren Erscheinungsformen dann die Porphyroblasten sind, oder Stoffe, von denen wir in dem jetzigen Gestein kaum noch Spuren erhalten sehen, die aber als Mineralisatoren das Gestein beweglich machten, die ähnliche Bedingungen hervorriefen, wie sie eine erhöhte Temperatur

hervorbringen könnte, die dabei vielfach auch mitwirkte, die sich insbesondere in einer Erhöhung der Grenze des Kornwachstums ausspricht. (Ob man nun für dieses Wachsen der Korngröße jetzt Lösungsumsatz heranzieht oder einfaches Verschmelzen ist in diesem Falle eigentlich sehr gleichgültig.)

Solange aber während eines solchen Vorganges Durchbewegung fort dauert, wird immer sie es sein, die das Richtungsgefüge beherrscht.

Besonders von Bedeutung sind aber die Fälle, wo eine solche erhöhte Beweglichkeit eintrat, ohne daß Durchbewegung herrschte. Es sind dies die Fälle, die Sander als die Erscheinung der Abbildung zusammenfaßt.

Es kann nachgewiesen werden, daß oftmals losgelöst von vorhergehenden Umformungen aus irgendeinem der früher geschilderten Gründe die freie Molekülbeweglichkeit so erhöht wird, daß vollkommene Umkristallisation des Gesteines erfolgt. (Sander: Über Zusammenhang von Teilbewegung und Gefüge in Gesteinen, Tsch. Mitt. 1911, Beitr. aus den Zentralalpen zur Deutung des Gesteinsgefüges, Jb. G. R. A. 1914 und andere.) Dabei zeigt sich, daß alle anderen richtunggebenden Einflüsse vollkommen zurücktreten, auch der einer etwaigen statischen Beanspruchung, gegen einen nämlich, den der Keimwirkung schon vorhandener Körner. Der umgesetzte Stoff nimmt zur Ablagerungsstelle die Körner desselben Materials, setzt den Bau dieser Körner fort. Die entstehenden Kristalle haben die Lage, die ihnen jene vorschreiben, sie kann bedingt sein durch vorhergegangene mechanische Umbildung, sie kann aber auch noch aus der Zeit herstammen, als das Gestein als Sediment zum Absatze kam, wofür Sander aus den „Phylliten“ des finnischen Grundgebirges Beispiele gibt.

Die Form aber, zu denen dieses Anwachsen führt, kann weit von der sich entfernen, die diese abgelaufenen richtungsbestimmenden Einflüsse verlangen würden.

Dadurch unterscheidet sich die Abbildung von jener Art der Einrichtung des kristallinen Gefüges, das wir bei der Warmreckung besprochen haben, wo sich die Rückformung zu ungestörten Kristallen während der Fortdauer der Durchbewegung vollzog, wo also nicht bloß die Richtung, sondern auch die Form der Körner immer von der Durchbewegung überwacht wurde, wo jede Form, die nicht mit der Umgestaltung verträglich war, zerstört wurde. Häufig sieht man aber, daß ein derartiger Vorgang der Warmreckung ausläuft in einen Vorgang der Abbildung, daß also der mechanische Umformungsvorgang aussetzte, der chemische noch weiter dauerte. (Sander's Namegebung geht vom Verhältnis der mechanischen Umformung zum Zeitpunkte der chemischen aus. Also postkristalline Umformung, das Ergebnis der Durchbewegung ist nicht durch Kristallneubildung gestört, unsere Kaltreckung. Parakristalline Umformung, mechanische und chemische Umformung sind gleichzeitig, unsere Warmreckung, präkristalline Umformung, die chemische folgt entweder unmittelbar oder mit einem Zwischenraum der mechanischen, also im wesentlichen Abbildung.)

Zur Unterscheidung dieser zeitlichen Verhältnisse, von mechanischer und chemischer Umformung hat sich besonders die Untersuchung an Falten dienlich erwiesen (Sander). Es sind insbesondere Mineralien, deren Tracht im ungestörten Zustande langgestreckte. Schnitte liefert zum Aufschlusse in dieser Hinsicht dienlich, z. B. Glimmer, Hornblenden.

Betrachten wir den Scheitel einer Faltenkrümmung. Bei Kaltreckung werden die Glimmer einfach gebogen sein. Herrscht aber während der Umformung schon die kristalline Rückbildung — ist jene parakristalline Warmreckung — so sind gebogene Glimmer unmöglich, sie bilden sich durch Zerfall und Verschmelzung zu ungestörten zurück. Eine Bildung zu langen, geraden Großkristallen ist aber unmöglich, da die fortdauernde Umformung immer neue Störungen hincinträgt, immer zu neuem Kornzerfall reizt. Es kommen dadurch sehr bezeichnende Formen zustande. Die Glimmerlage ist sehr schön durch geschwungene Linien gegen die Nachbarschaft abgegrenzt, kaum daß da und dort ein Blättchen eine Ecke über sie hinausstreckt. In ihrem Innern sehen wir die Glimmer ohne Störung, aber in eigenartigen kurzen rautenförmigen Blättchen, die oft dachziegelartig aufeinandergepackt sind, sich tunlichst den Forderungen der mechanischen Umformung anpassen.

Ist aber die Umkristallisierung nach Vollendung der mechanischen Umformung vor sich gegangen, so entfällt die Ursache zum fortwährenden Kornzerfall, wir sehen die Blättchen sich groß entwickeln mit der Lage, die das Korn hatte, das sie als Keim nahmen. Und da dieses im Bogen meist tangential lag, entsteht das Bild der Tangentialbogen, die Falte dargestellt durch ihre Tangenten, nämlich Glimmerblättchen, die die Falte an einer Stelle berühren, sonst aber unbekümmert um die ehemaligen Grenzen der Glimmerlage oft weit in die Umgebung geradlinig hineinstechen.

Andere Feststellungen können aus dem in einen Porphyroblasten eingeschlossenen „si“ gemacht werden, wenigstens für die Einordnung seines Wachstums zur mechanischen Umformung.

Ist das Wachstum eines Granaten der Umformung vorausgegangen, so wird sein „si“ verlagert sein, aber es wird geradlinig verlaufen, ist es nachgefolgt, so wird es geradlinig und nicht verlagert sein. Waren dagegen Umformung und Granatwachstum gleichzeitig, so sehen wir, daß, da ja der Granat während des Wachstums fortwährend gewälzt wird, die weiteren Teile des „si“ jeweils in anderer Lage zu den früheren aufgenommen werden, das „si“ bekommt dann jene häufige S-Form. Wie aus dieser Kurve selbst feine Einzelheiten der Durchbewegungsgeschichte herausgelesen werden können, habe ich in der Arbeit „Bewegungsspuren in Porphyroblasten“ dargestellt. Sitz.-Ber. Ak. d. Wiss., Wien, 18. Daß reine Abbildung vorliegt, können wir auch feststellen, wenn in ganz untektonischen Großkörnern, z. B. von Albit, eine reiche Kleintektonik, z. B. dargestellt durch Falten von kohligem „si“ eingeschlossen ist. „Helizitstruktur“ Weinschenks.

Dieses Unberührtsein des Abbildungsgefüges von anderen richtenden Einflüssen läßt noch einen anderen sehr schön hervortreten, nämlich den der verschiedenen „Wegsamkeit“ des Gesteines in den verschiedensten Richtungen zum „s“. Besonders wenn die Abbildung auf das Ausfallen eines neuen zugewanderten Minerals begründet ist, sieht man in seinen Formen sehr schön, daß diese Wanderung in gewissen Richtungen sehr begünstigt war. Sehr schöne Beispiele geben hierfür die Formen der Albite in gewissen einer Albitüberschwemmung erlegenen Schiefern der Tauernschieferhülle.

Wir haben schon für die Warmreckung dargestellt, daß durch die Vorgänge des Kornzerfalls und der Kornverschmelzung eine Streuung der Richtungsregelung wahrscheinlich wird. Doch wird diese Streuung nicht allzuweit gehen, da bei andauernder Durchbewegung immer wieder Neuregelung eintritt. Wird das Gefüge hingegen durch Abbildung kristallin, so entfällt diese Neuregelung. Wir werden daher nicht verwundert sein, in Abbildungsgefügen noch weniger allgemeine Regelung zu sehen, tatsächlich ist bei diesen die Richtungsregelung fast nur auf einzelne Mineralien beschränkt, und zwar fast immer länglich ausgebildeten, wie Glimmer, Hornblenden, für die der Zufall scheinbar eine geringere Rolle spielt, während die anderen, insbesondere Quarz, Feldspat, kaum Spuren einer Richtungsregelung zeigen.

Wir haben uns bei der Besprechung kristallisationsschiefrigen Gefüges bis jetzt vorwiegend mit dem Richtungsgefüge befaßt, mit der Regelung der kristallographischen Richtungen der Körner im Gesteine.

Es bleiben noch gewisse höchst wichtige Erscheinungen des Formgefüges zur Besprechung übrig.

Wir erkennen in einem solchen Gesteine oft Mineralien, häufig als Porphyroblasten entwickelt, die auch im Gesteinsverbande auffällig gut die ihnen eigentümliche Kristalltracht entwickeln können, die sogenannten idioblastischen Mineralien der Becke-Grubenmannschen Darstellung, und wir werden für diese gern die von diesen Forschern gegebene Erklärung annehmen, daß es ihre besonders große Kristallisationskraft war, die ihnen die Erfüllung ihres Formbedürfnisses ermöglichte. Daneben gibt es andere, denen diese Kraft fehlt, Xenoblasten.

Wir werden uns daher nicht wundern, eine Hornblende als langen Stengel ausgebildet zu sehen. Sehen wir aber bei Quarz, Albit und anderen, die wir sonst nur in unbestimmten Formen zu sehen gewohnt sind, einmal das Vorwalten einer gewissen Ausdehnungsrichtung, besonders wenn dies für alle gleichen Körner in gleichem Maße zutrifft, so müssen wir nach der Ursache dieser Erscheinung fragen.

Besonders eine Art dieser Formregelung ist auffällig, nämlich die, daß eine einzige Erstreckungsrichtung ausgezeichnet ist. Es ist diese oft verbunden mit einer auffälligen Striung der Gesteine auf dem Hauptbruche. Es ist dies die sogenannte Streckung.

Eine solche Formregelung kann auch die Folge einer ausgesprochenen Richtungsregelung sein und Bevorzugung einer einzigen kristallographischen Richtung beim Wachstum; dieser Weg ist offenbar nur bei Idioblasten gangbar, z. B. bei Hornblenden. Andererseits kann diese Formregelung die unmittelbare Folge der Durchbewegung sein. Diese Erklärung ist die einzige, die für Xenoblasten anwendbar ist, insbesondere in den häufigen Fällen, wo mit der Formregelung so gut wie keine Richtungsregelung verbunden ist.

Die Becke-Grubenmannsche Anschauung ist in dieser Beziehung gut daran, sie liefert ja unmittelbar die Formregelung, das Auswachsen in der Richtung des geringsten Druckes. Dafür steht bei ihr ja die Erklärung der Richtungsregelung aus.

Bei der Erklärung der Kristallisationsschieferung als Gleitflächenfolge haben wir nur die Richtungsregelung besprochen.

Bei rein mechanischer Umformung hatten wir wohl eine Erklärung der Streckung sehr naheliegend, die Gleitung formt eben aus der Kugel das Ellipsoid, das umso länger wird, sich mit der langen Achse der Gleitrichtung nähernd, je weiter die Gleitung geht.

Herrscht aber chemische Umformung daneben, so können wir einen solchen Schluß nicht ziehen, denn der Kornzerfall zerstückelt ja immer das Ellipsoid, die Sammelkristallisation faßt die Bruchstücke in anderer Ordnung zusammen, das Korn, das entsteht, ist nicht mehr gleichwertig mit dem Ausgangskorn.

(Es sei ein Weg zur Erklärung solcher Formen vorausgenommen, der schon mehrere Male erwähnt wurde, der des Einflusses der größeren Wegsamkeit des Gesteines in „s“, dessen Anwendungsmöglichkeiten aber meistens sehr klar sind.)

Es bleiben aber viele Fälle übrig, denen auf diese Weise nicht beizukommen ist, für die noch ein Ausweg gefunden werden muß. Das Gewicht dieser Frage der tektonischen Bewertung der Streckrichtung der Körner ergibt sich aus dem geologischen Befunde. Es ist eine eigenartige Tatsache, daß die Kornstreckung vieler kristalliner Schiefer der Alpen im Streichen oder nahezu im Streichen verläuft. Becke und Sander haben wiederholt auf die Bedeutung dieser Erscheinung und auf die Wichtigkeit ihrer Kartierung hingewiesen.

Es wäre nun naheliegend, diese Streckung der kristallisationsschiefrigen Gesteine genau so zu behandeln, wie die der kaltgereckten, nämlich, in ihr nur die Darstellung der Gleitrichtung zu sehen. Damit aber wäre für Großteile der Alpen Gleitbewegung auf der West-Ost-Linie gefordert.

So lange diese Frage nicht geklärt ist, wird immer, und zwar mit dem Scheine vollen Rechtes die Ansicht, daß beim Baue der Alpen Ost-Westbewegung wesentlich war, auf diese Strömungserscheinungen als Beweis hinzeigen. Also es heißt entweder: Die Streckung und die damit gleichgerichtete Strömung sind nicht Darstellungen der Bewegungsrichtung, oder die Rotpletzvorstellung vom Schube der Alpen nach West besteht zurecht.

Diese Überlegung behält ihre Gültigkeit, gleichgültig ob man in der Schieferung die Gleitflächen sieht, oder nach Becke-Grubenmann die Hauptflächen. Denn nach letzterer würde die Streckungsrichtung die Richtung des kleinsten Hauptdruckes bedeuten. Es hieße also, in den Alpen geht die Richtung der kleinsten Beanspruchungen West-Ost. Wir haben aber S. 31 gesehen, daß mit diesem Beanspruchungsplane eine andauernde Gleitung nach Norden nicht verträglich ist, daß dann die Bewegung einen ganz bedeutenden Anteil nach Westen oder Osten haben müßte.

Wenn ich induktiv vorgehend aus diesen Schwierigkeiten schließe, daß diese Art Streckung nicht die Bewegungsrichtung ausdrückt, sondern die Senkrechte darauf in der Gleitfläche, also das tektonische Streichen, so tue ich dies nicht bloß deshalb, weil mir die Vorstellung, daß der Alpenbau wesentlich einer Bewegung nach Norden entstamme, so gesichert erscheint, unbeschadet aller mir bekannter und gewürdigter Abweichungen, sondern auch deshalb, weil an den Stellen, wo diese Streckungen vorkommen, andere Angaben zu entnehmen sind, die sicherer als die Streckungen die Bewegungsrichtungen erweisen und dann, mit den erwähnten Ausnahmen eben, immer die Richtung nach Norden als Gleitrichtung ergeben.

Insbesondere aus der Faltung können solche Angaben weitgehend gewonnen werden. Die Faltung als Gleitvorgang läßt ja keine andere Lage des Faltenscheitels zu als im Mittel senkrecht zur Bewegungsrichtung. Gerade in solchen Streckungsgebieten, ich denke da besonders an die Klammserie der Tauern, finden wir nun vielfach Phyllitfaltung, diese aber ausnahmslos mit den Faltenscheiteln gleichlaufend zur Streckung. Es sei auch darauf hingewiesen, daß vielfach auch die Strömung der Schieferflächen sich als Kleinfältelung erweist.

Wir haben aber jetzt die Aufgabe, eine Vorstellung zu entwickeln, wie eine derartige Streckung senkrecht zur Gleitrichtung zustandekommen kann.

Für diesen Zweck möchte ich hier einen Gedankengang bringen, die schon in den Mech. Problemen der Gebirgsbildung dargestellt ist, Mitt. Geol. Ges. Wien, 15., nämlich, daß die Streckung der Körner im tektonischen Streichen bedingt ist durch den Schnitt zweier Gleitflächenscharen.

Es ist schon bei der Besprechung der mechanischen Umformung S auf die Bedeutung der Hilfsflächen zu den Hauptflächen hingewiesen worden, die dort sich einstellen, wo infolge weitgehender Massenverlagerungen die Hauptflächen dem Beanspruchungsplane nicht mehr ganz angemessen waren. Auch sie werden als tätige Flächen dieselbe grundsätzliche Lage haben, wie die Hauptgleitflächen, sie werden dem Hauptscherflächenbüschel angehören, deren gemeinsamer Schnitt die Achse der mittleren Hauptbeanspruchung ist, auch bei ihnen wird die Gleitrichtung gegeben sein, durch ihren Schnitt mit der Ebene, die durch größte und kleinste Hauptbeanspruchung gelegt ist.

Der Schnitt der Hilfgleitfläche mit der Hauptgleitfläche wird daher auch der Richtung der mittleren Hauptbeanspruchung parallel laufen.

Diese Hilfgleitflächen werden bedeutend geringere Gleitbeträge aufweisen als die Hauptgleitflächen, immerhin genügend große, um auch im Gefüge von Einfluß zu sein.

Für die Gleitung nach einer Flächenschar gilt, daß alles, was in der Richtung dieser Flächen sich erstreckt, unverändert bleibt. Die Platte, die von zwei solchen zu einer Schar gehörigen Flächen begrenzt wird, erhält in

sich keine Verlagerung. Alle von dieser Flächenlage der Richtung nach abweichende Beziehungen werden durch die Gleitung verändert.

Haben wir zwei sich schneidende Flächenscharen, so sehen wir, daß nicht mehr eine Ebene des Gefüges keine mechanische Beeinflussung mehr enthält, sondern nur noch eine Gerade mechanisch unberührt bleibt, nämlich die Schnittlinie beider Flächen. In dem Augenblick also, wo zwei Flächenscharen wirksam sind, ist die Schnittlinie beider eine ausgezeichnete Richtung.

Es kann diese Eigenart nicht bloß für das Formgefüge, sondern auch für das Richtungsgefüge von Bedeutung sein. Denn es kann dann nicht mehr eine Raumgitterfläche ungestört erhalten bleiben, sondern nur mehr eine Raumgitterrichtung, und wir werden erwarten, daß Mineralien, denen eine Prismenzonenachse besonders wertvoll ist, diese in die Schnittgerade beider Flächen hineinlegen. Dieser Fall ist besonders bei Hornblenden ziemlich häufig. Siehe Sander, Jb. G. R. A. 1914, 605, wo Hornblendestengel gleichlaufend der Achse einer Falte verlaufen.

Betrachten wir die Bedeutung dieses Gleitflächenschnittes für das Formgefüge; in diesem Falle ist die Schnittgerade also die Richtung, die störungsfrei bleibt. Es läßt sich daher annehmen, daß, wenn Kornzerfall eintritt, für diese Richtung die Notwendigkeit einer Zerteilung zur Wiederherstellung der Ordnung nicht in dem Maße auftritt, wie für alle anderen Richtungen, wo aller Zuwachs sofort wieder durch die Durchbewegung und den daraus folgenden Kornzerfall abgeschnitten wird.

Dieser Einfluß wird besonders dadurch scharf, daß das Korn wohl in die Hauptgleitfläche eine günstige Korngleitfläche hineinlegen kann, dann aber wahrscheinlich nicht imstande ist, auch für die Hilfgleitfläche eine entsprechend günstige zur Verfügung zu stellen, so daß der Zwang gerade durch die Störungen durch die Hilfgleitfläche, auch wenn der Bewegungsbetrag an ihr nicht besonders groß sein dürfte, doch für den Kornbestand recht empfindlich sein dürfte. Auf diese Weise ist für das Korn ein größeres Wachstum nur nach der Schnittlinie beider Flächenscharen, nach dem tektonischen Streichen ermöglicht.

Dies wäre ein Versuch zur Erklärung der Streckungserscheinungen, der in unsere tektonischen Vorstellungen hineinpaßt. Ich sehe eine Bestätigung für ihn auch darin, daß solche Streckungserscheinungen besonders an solchen Stellen auftreten, wo man sich vorstellen kann, daß ein vorher bestandener Bewegungsplan unzulänglich wurde. Nicht auf glatten Rückenteilen von Decken finden wir Streckungen in den Gesteinen, sondern in den Stirnteilen, wo die Bewegung zu Ende ging, wo die letzten Wege zur Einordnung der Masse in das Potential minimum nicht mehr an den Hauptflächen vor sich ging, sondern schon Hilfsflächen benötigte. So sehen wir eine große Zone von Streckung am Nordrande der Tauern, im Westen von Sander verfolgt, im Osten besonders von Becke erwiesen.

Immerhin aber möchte ich betonen, daß diese Frage der Streckung noch zu den ungeklärtesten und dabei für die Geologie folgenschwersten der ganzen Gesteinstechnologie gehört.

Mit der Frage der Entstehung der Streckung steht die andere in enger Verbindung, was ich aus einer solchen Streckung herauslesen kann. Es ist hier ein Schluß nachliegend und auch vielfach gezogen worden, daß in dem Falle, wo die einzelnen Körner in einer gewissen Richtung ausgewachsen sind, auch der ganze Gesteinskörper eine Verlängerung nach derselben Richtung erlitten hat. Es ist dies der Weg, auf dem das Ausweichen des Gesteines nach der Richtung des geringsten Druckes durch den Lösungsumsatz mit Zuhilfenahme des Rieckeschen Satzes erschlossen wurde. Dementsprechend wurde auch angenommen, daß der Verschmälerung der Körner in der Richtung senkrecht darauf auch eine Verschmächtigung des Gesteines in dieser Richtung des größten Druckes entspreche.

Es sollte gegen diesen Schluß schon stutzig machen, daß bei Kristallisationsschieferung diese Streckung oft nur einzelne Mineralien betrifft, andere unberührt läßt.

Auch hier ergeben sich einmal Bedenken aus dem Geol. Befund. Es ist ja die allgemein streichende Lage der Streckung in den Alpen bekannt. Der obige Schluß würde also nicht bloß zum Ergebnis führen, daß die Alpen eine wesentliche Ost-Westbewegung erlitten haben, sondern daß ihre Gesteinskörper noch dazu eine ganz wesentliche Verlängerung in dieser Richtung erfahren haben.

Wir haben die Antwort schon bei der Warmreckung gegeben, daß nämlich das Formgefüge kein tektonisches Korrelat haben muß, sobald bei der Formgebung des Kornes nicht nur die gerichtete mechanische Umformung, sondern die ungerichtete chemische Umformung ein Ausmaß erlangt, welches dem der mechanischen gleichwertig ist oder es sogar übertrifft.

Es läßt sich dies an einem Grenzbeispiele klar machen. Ich kann eine Stoffmenge in würfelförmigen Teilen in eine Kiste verpackt denken. Ich kann aber auch denselben Stoff, zu prismatischen Stangen ausgereckt, wenn sie nur nicht länger sind als die Kiste, wieder in derselben unterbringen, ohne daß sie etwa deswegen länger gemacht werden müßte. In diesem Falle hat also das Ausrecken der Einzelteile kein tektonisches Korrelat.

Man sieht aber an dem Beispiele, unter welchen Bedingungen das der Fall sein kann. Ich muß jeden einzelnen Würfel herausnehmen, recken und wieder hineinlegen; neben dem Recken muß also noch ein umordnender Vorgang mitwirken. Wollte ich ohne diesen die Reckung vornehmen, also die Teile in ihrem gegenseitigen Verbands lassen, so wäre es nicht möglich, daß nicht der ganze Körper dieselbe verhältnismäßige Streckung erlitt wie der Einzelteil.

In unserem Falle sind aber erstere Bedingungen erfüllt, wir haben neben dem mechanischen Vorgange den umordnenden chemischen Vorgang, so daß wir nicht auf ein tektonisches Korrelat der Streckung schließen müssen.

Es ist eigenartig, daß der Schluß aus einer Streckung in einer einzigen Richtung auf Verlängerung des Gesteinskörpers so leicht gezogen wird, während in einem formell ganz ähnlichen Falle die Rückführung solcher Ausmaßänderungen auf die chemische Umformung als ganz selbstverständlich angenommen wird. Wir können oft nachweisen, z. B. bei Marmoren, daß die Ausmaße der Körner nicht bloß in einer Richtung, sondern in allen dreien zugenommen haben. Der Schluß, daß dadurch das Gestein an Volumen zugenommen habe, wie es sein müßte, wenn das Formgefüge ein tektonisches Korrelat haben müßte, erscheint offenbar so unsinnig, daß diese Kornvergrößerung selbstverständlich auf die chemische Umformung, in dem Falle Sammelkristallisation, zurückgeführt wird. Aber der Streckung in einer Richtung will man dasselbe Recht nicht zugestehen.

Wenn nun aber festgestellt ist, daß das Formgefüge, in unserem Falle Streckung, bei Kristallisations-schieferung ein tektonisches Korrelat nicht haben muß, so ist damit nicht ausgesagt, daß es keines haben kann. Doch weiß ich kein Kennzeichen im Gefüge, welches hierüber Auskunft geben kann, ob es im gegebenen Falle wirklich eines hat oder nicht.

So wertvolle Schlüsse das Gefügestudium für die Entwirrung der Großtektonik liefern kann, hier scheint ein Fall vorzuliegen, wo solche Schlüsse mit großen Gefahren verbunden sind, wo eher der verkehrte Weg zu empfehlen ist, aus der Großtektonik diese Gefügeerscheinung zu erklären.

## **Anwendung.**

Welches sind die Ergebnisse unserer Untersuchung?

Um zunächst die Ergebnisse für Groß- und Mittelformen zu behandeln, so erkannten wir zuerst die Möglichkeit der mechanischen Formgestaltung; Wir fanden, daß sie fast ausschließlich durch Gleiten vor sich geht. Wir konnten ferner auf teilweise deduktivem, teilweise induktivem Wege Gesetze dieser Umformung aufstellen, es war dies das Gesetz der Einsehargigkeit der Gleitflächen und das Gesetz der Gleitbretter. Es wurde ferner der Einfluß der chemischen Umformung untersucht. Wir konnten auch für diese eine tektonische Wirkung nicht abweisen, konnten aber keine derartig einfachen Gesetze, insbesondere nicht solche für den Lösungsumsatz aufstellen. Besonders mußten wir einen einsinnigen Zusammenhang zwischen Lösungsumsatz und mechanischer Beanspruchung ablehnen.

Betrachten wir nun ein Gebirge wie unsere Alpen. Wir sehen einen überaus reichen Formenschatz gebildet aus Ausgangsformen, die wir als außerordentlich schlicht annehmen dürfen. Wessen Werk sind diese Formen? Sind sie durch die mechanische oder die chemische Umformung oder durch beide zusammen entstanden? Wir haben zu der Frage schon Stellung genommen, als wir im Absatz über die mechanische Umformung ohne Rücksicht auf die chemische es unternahmen, den Bewegungsvorgang zu erklären.

Es ist die Art des Formenschatzes, welche uns dazu bringt, ihn restlos der mechanischen Formänderung zuzuschreiben. Die Bewegungsform der mechanischen Formänderung, wie sie für die Deckengebirge in Betracht kommt, ist die des Fließens im offenen Bette, jede Gleitschicht erfährt bewegungshemmende Reibung nur an ihrer Unterfläche, daher das gleichsinnige Voreilen jeder Schicht vor der anderen. Es werden durch diese Verschiebung die „Zeichnungen“ in ihrer Lage verändert, verdreht, doch erfolgt diese Verdrehung überall im selben Sinne und es sind nur Unterschiede in der Weite der Verdrehung vorhanden. Daher das so bezeichnende Bild der liegenden Falte, das wir ja eingehend besprochen haben.

Ganz anders ist aber die Formänderung durch chemische Umformung, z. B. durch Lösungsumsatz. Es ist diese nicht mit einem Fließen des Stoffes in einem offenen Gerinne vergleichbar, sondern mit dem Fließen des Wassers durch ein Filter, jedes Stoffteilchen muß sich durch das Feste seinen Weg bahnen, erhält allseitig Reibung, die seine im Sinne des chemischen Gefälles vor sich gehende Wanderung zu hemmen sucht.

Denken wir uns im Gesteine eine Zeichnung, zum Beispiel eine geradlinige Schichtung, so ist es durchaus möglich, daß die Formänderung durch chemischen Umsatz diese vollkommen geradlinig beläßt und auch nicht in ihrer Richtung beeinflußt. Denken wir nämlich, daß unterhalb dieser Zeichnung eine Volumsvergrößerung durch Stoffzufuhr stattfindet, aber an allen Stellen von gleicher Größe, so wird dadurch die Zeichnung wohl verschoben, aber nicht verdreht. Es können aber auch Richtungsänderungen in Zeichnungen durch eine solche Einfuhr zustande kommen, wenn die Stoffzufuhr nicht in allen Punkten des Strömungsquerschnittes die gleiche Größe hat. Eine jede solche Umsatzströmung wird ja in einem bestimmten Stromfaden ihre größte Geschwindigkeit haben, von dort aus allseitig abnehmend. In einem solchen Falle wird die Zeichnung auch verkrümmt werden, der Punkt derselben, der auf dem Faden der größten Einfuhr liegt, wird am weitesten vorgetrieben werden, die seitwärts davon gelegenen nicht so weit, je weiter wir von der Stelle größter Einströmung weggehen, desto weniger wird die Zeichnung verlagert sein. Auch hier kann eine faltenähnliche Form entstehen, sie ist aber grundverschieden von der liegenden Falte der bezeichnenden Form mechanischer Umformung. Bei dieser ist der Mittelschenkel die Stelle größter Verdrehung, Liegend- und Hangendschenkel die Stellen kleinster aber gleichsinniger Verdrehung, der Scheitel ist ein Zufallspunkt. Bei jener ist dagegen der Scheitel die Stelle größter Vorverlagerung, einen Unterschied in der Bedeutung von Mittel und Hangendschenkel gibt es nicht, beide sind das Ergebnis von Verdrehung durch ungleichartige Einfuhr von Stoff unter sie, aber von Verdrehungen im entgegengesetzten Sinne. In diesem Sinne sind die Falten der Salzhorste aufzufassen, ihre Sättel als Einbruchfäden der Lösung, ihre Mulden als Stellen geringster oder fehlender Stoffeinlagerung darunter.

Und noch ein anderer schwerer Unterschied besteht zwischen den Umformungen durch mechanische und chemische Vorgänge. Wir sahen bei der mechanischen Umformung, besonders bei differentieller Verteilung der Gleitung die Möglichkeit einer außerordentlichen Mannigfaltigkeit in Verteilung des Gleitbetrages auf die einzelnen Gleitflächen einer Schar nach dem Gesetze der Gleitbretter, bis herunter zum Wechsel von stärker und schwächer gleitenden Flächen von kaum Millimeter Abstand. Es kommt dies davon, daß bei der Gleitung eine Schicht zwischen zwei Gleitflächen selbst unverändert bleibt, also ein selbständiges Leben führt, sich verschieden von ihren Nachbarn bewegen kann. Die Verlagerung des Punktes der Zeichnung, der zu dieser Schicht gehört, ist allein die Folge der Verschiebung dieser Schicht gegen ihre Nachbarn.

Anders bei der Umformung einer Zeichnung dadurch, daß sich hinter ihr durch Lösungsumsatz das Volumen verändert. Die Verlagerung dieser Zeichnung an einer Stelle ist die Folge, daß sich dahinter Stoffteilchen ins Gestein einlagern, von denen jeder einzeln seine Reise vollführte, einzeln sich mit den Reibungen abfinden mußte und gesondert zur Ablagerung kam. Wohl können diese Wanderungen in großen Zügen, wie oben geschildert, Gesetze befolgen, so daß Großformen entstehen, da aber die Verformung eine Mittelwertbildung aus den Einwirkungen der einzelnen Moleküleinlagerungen darstellt, ist jede Möglichkeit genommen, daß auch im kleinen in den entstehenden Formen Mannigfaltigkeit herrscht.

Betrachten wir daraufhin einen alpinen Bau, so sehen wir, wohin wir blicken, die bezeichnenden Formen der Gleitung, der mechanischen Umformung, mit ihren Gleitbrettern, mit liegenden Falten und insbesondere mit einer außerordentlichen Mannigfaltigkeit im Bewegungszustande mit Gleitbretterbildung von hundert Meter Mächtigkeit bis herab zu mikroskopischer Dicke.

Sicher hat daneben Lösungsumsatz stattgefunden, die Fremdlinge im Gefüge bezeugen es, sicher hat er auch Einwirkung auf den Bau, sowohl an der Stelle, wo er sich abgelagert hat, als an der Stelle, wo er entnommen wurde.

Aber wir erkennen die Umgestaltung, die er bewirkte, in ihrer Schlichtheit nicht mehr in dem Formengewirre, das die mechanische Umformung erzeugte. Man stelle sich bloß einmal den Bereich einer weitreichenden Albitisierung vor; sie erzeugt sicher eine Aufbeulung von beträchtlicher Größe, wie will man diese aber erkennen in einem Gebiete voll der mannigfaltigsten mechanischen Formen. So erscheint es aussichtslos, die gestaltlichen Wirkungen der chemischen Umformung aus der mechanischen Umformung herauszuschälen. Auch die Veränderungen des Volumens zu buchen hat der Feldgeologe keine Gelegenheit, ist ihm ja doch das Ausgangsvolumen nicht bekannt.

Wenn wir ein solches Gebirge in seinen Groß- und Mittelformen als ein rein mechanisches Gebilde betrachten, bleibt kaum ein Formenrest zurück, der der Erklärung mangelt.

(Es ist allerdings dabei zu bemerken, daß bei diesem Satze ausdrücklich Gebirge vom Schlage der Alpen in Betracht gezogen sind, es mag andere geben, bei welchen er nicht in dieser Strenge gehandhabt werden kann, ich denke hier besonders an die Gebiete mit pygmatischer Faltung, geradesc wie auch der Bau eines Salzhorstes diese rein mechanische Auffassung nicht zuläßt.)

Wir sehen, daß diese Betrachtungsweise seit jeher die der Tektonik war. Alle Forscher erklären ihre Profile so, als ob rein mechanische Kräfte in rein mechanischen Vorgängen die Massen verlagert hätten. Es war der Lösungsumsatz bekannt und seine tektonischen Folgen sind unabweisbar. Daß er nicht als Eigenvorgang bei der Erklärung herangezogen wurde hat wohl vielfach seine Begründung in der Anschauung gefunden, daß die chemische Umformung nach dem Rieckeschen Satze in demselben Sinne wirke wie die mechanische Arbeit der Kräfte. Uns, die wir diese Anschauung nicht teilen konnten, oblag es aber, uns zunächst Rechenschaft zu geben, aus welchem Grunde auch wir diese Vernachlässigung durchführen können, und wir fanden ihn eben darin, daß die Formen des chemischen Umsatzes in dem Formenreichtum des Mechanischen unerkennbar untergehen.

Dürfen wir diese Vernachlässigung auch für Groß- und Mittelformen machen, so sahen wir, daß für die Kleinformen des Gesteinsgefüges dies nicht zulässig ist, wir sahen, daß hier die Wirkung der chemischen Umformung, wenn sie neben mechanischer auftritt, sehr wohl zu beachten ist, daß sie die Fähigkeit besitzt, wichtige Züge der mechanischen Umformung einfach zu verwischen, so insbesondere den monoklinen Ordnungsgrad der mechanischen Gefüge in einen pseudorhombischen umzuwandeln. (S. 53.) Dieser Unterschied der Bedeutung chemischer Umformung für Klein- und Großformung rührt daher, daß wichtige Vorgänge, die zu ihr gehören, besonders Kornzerfall und Sammelkristallisation, nicht gerichtet sind, daher bei der Integration der Gefügedifferentiale zum Großbau sich wegheben.

Als weiteres Ergebnis zeitigt die technologische Betrachtungsweise der Gesteinsumformung die Erkenntnis, daß die entstandenen Formen, besonders Mittel- und Kleinformen, in deutlicher Weise die Merkzeichen der Bedingungen an sich tragen, unter denen sie entstanden sind. Es unterscheidet sich daher der Formenschatz der unter verschiedenen Bedingungen umgeformten Gesteine in wohl erkennbarer Weise, wir sind daher berechtigt, den Begriff der technologischen Fazies oder der Gefügefazies aufzustellen (Sander). Letzterer Name hat darin seine Berechtigung, daß besonders die Untersuchung des Kleingefüges die wertvollsten Anhaltspunkte in dieser Richtung liefert und soll seiner Kürze wegen beibehalten werden, wobei aber immer zu beachten ist, daß bei einer Einreihung sämtliche erkennbaren Formen, also auch Mittel- bis Großformen mit heranzuziehen sind.

Uns ist durch die Arbeiten Becke und Grubenmann, die in ihrer Weiterentwicklung zu den Kristallfazies nach P. Eskola führen, eine Systematik der metamorphen Gesteine geschenkt.

Sie reiht die Gesteine einmal nach ihrem chemischen Bestande ein, dann aber noch nach ihrem Phasenbestande, nach ihren gesteinsbildenden Mineralien.

Die Systematik ist eine natürliche. Es geben die Mineralbestände von Gesteinen derselben chemischen Zusammensetzung wertvolle Aufschlüsse über Bedingungen zur Zeit der Kristallinwerdung. Und zwar sind es Temperatur und allseitiger Druck, die Variablen der Phasenlehre, die sich in dem Mineralbestande aussprechen.

Nun sind aber in diese Ordnung der Gesteine noch andere Beziehungen mit aufgenommen, die nicht so in notwendigem Verbande damit stehen, nämlich Beziehungen zur Art der tektonischen Umformung, insofern als z. B. bei Grubenmann die oberste Tiefenstufe als Bereich der vorwiegend klastischen Umformung dargestellt wird, die tieferen als Bereich der vorwiegend bruchlosen Umformung, Umformung unter Mitwirkung des Lösungsumsatzes etc.

Obwohl diese Zuordnung im allgemeinen zutrifft, erscheint die Aufnahme dieser Beziehung als Belastung der Systematik, insoferne eben die genannten Erscheinungen nicht mit der Umformung des Mineralbestandes verknüpft sein müssen, wie besonders die Erkenntnis zeigt, daß Gesteine eine Kristallfazies angenommen haben, ohne daß dabei tektonische Einflüsse im Gange waren, so daß dann die Gefügeregelung ganz andere Züge zeigt als bei Durchbewegung, z. B. reine Abbildung sedimentärer Gefüge. Es ist in dieser Beziehung insbesondere der Vergleich der Gefüge alpiner „Tektonite“ mit gewissen ohne Tektonik kristallin gewordener Phyllite besonders von Interesse, mit denen uns Sander bekannt gemacht hat. („Studienreisen im Grundgebirge Finnlands“, Verh. G. R. A. 1914.)

Diese Hineinbeziehung der Gefügeformen in die kristalline Systematik ergab sich ja dort sehr ungezwungen dadurch, daß das Rieckesche Prinzip als einer der Haupteinflüsse zur Umlagerung angenommen wurde, wonach mit der Umbildung des Mineralbestandes auch die Umbildung des Gefügebestandes Hand in Hand gieng.

Nachdem aber nach unseren Darlegungen dieser Grund wohl wegfallen muß, erscheint es als wünschenswert, die Verknüpfung überhaupt aufzuheben.

Demnach haben wir neben der Möglichkeit, die Einordnung der Gesteine nach ihrem Mineralbestand vorzunehmen (Kristallinfazies), die vollkommen zurecht besteht, auch die Möglichkeit der Einordnung nach ihrem Gefüge (Gefügefazies). Während erstere über Temperatur und allseitigen Druck Aufschluß gibt, ist die bestimmende Veränderliche für letztere besonders die Durchbewegung neben Temperatur, Mineralisierung, Beanspruchung.

In der Mannigfaltigkeit der Gefügefazies haben wir nun zwei scharf voneinander geschiedene Gruppen, nämlich die Tektonite und die Nichttektonite (Sander).

Nur die erste Gruppe haben wir im Laufe unserer Untersuchung in Betracht gezogen und wollen auch nur diese weiter behandeln. Es sind dies die Gesteine, die in ihrer Tracht die wesentlichen Züge einer Durchbewegung, also einer Teilbewegung eines tektonischen Vorganges an sich tragen.

Im Bereiche der Tektonitfazies ergibt sich dann noch die Einordnungsmöglichkeit der verschiedenartigen Erscheinungsformen nach den Bedingungen ihrer Ausbildung.

Es ist ja die Absicht dieser technologischen Studien, zu zeigen, daß unter verschiedenen Umformungsbedingungen verschiedene Gefügebilder entstehen werden, und umgekehrt, daß man aus einem Gefügebild wenigstens teilweise die Umformungsbedingungen herauslesen kann. Wenn auch eine zahlenmäßige Angabe nicht möglich ist, so besteht doch die Gelegenheit zur Auseinanderhaltung der Erscheinungen und bis zu einem gewissen Grade zu einer Einordnung in ein System.

Es ist da insbesondere auf den Schnitt zwischen Kaltreckung und Warmreckung hinzuweisen, wobei in diesem Falle nicht, wie wir es oben gemacht haben, von kaltgereckten Gesteinen gesprochen werden soll, sondern von kalt- oder warmgereckten Mineralien. Wir können mit Recht behaupten, daß die Umformungsbedingungen eines Gesteins, in welchem der Quarz Störungen aufweist, andere waren als in einem Gestein, in welchem er keine Störungen zeigt, und zwar wesentlich geringere Umformungstemperaturen aufwies. Wir können behaupten, daß ein Gestein, in dem der Glimmer ungestört ist, der Quarz noch Störungen zeigt, aber mit Kornzerfall, in höhere Umformungstemperaturen einzureihen ist, als ein Gestein, in welchem Quarz und Glimmer gleichmäßig gequält sind. Es ist als besonderer Vorteil dieser Untersuchung anzusehen, daß die Angaben dem Einzelkorn entnommen sind und nicht abhängig sind vom Gesteinsbestande, ein gequältes Quarzkorn in einem Amphibolgneis sagt gleichviel aus, wie eines in einem Quarzit, nämlich, daß die Umformung unterhalb der Warmreckgrenze des Quarzes vor sich ging.

Eine andere Reihe von Angaben, allerdings nicht so sehr aus dem Kleingefüge, sondern aus größeren Formen, ergibt sich in der Art und Weise, wie sich der Gesteinsunterschied im Bewegungsplane ausspricht (siehe S. 23) von Formen, wo letzterer vollkommen unbekümmert um den Gesteinswechsel durchläuft, zu Formen, wo die verschiedenen Gesteine schon deutliche Abweichungen im Bewegungsplane zeigen, bis zu Formen, wo die Auswahl der Gleitflächen geradezu von Gesteinsgrenzen beherrscht wird. Wir führten dieses verschiedene Verhalten auf die Lage der Beanspruchung zur Elastizitätsgrenze zurück, hatten im ersten Falle die Beanspruchung so hoch über ersterer, daß die elastischen Spannungen neben der inneren Reibung nicht in Betracht kam (wobei damit nichts ausgesprochen sein soll darüber, ob in diesem Falle die Beanspruchung so hoch war oder die Elastizitätsgrenze so niedrig); im zweiten Falle waren jedenfalls die elastischen Anteile der Spannungen schon von merklicher Größe, im dritten Falle war für das eine Gestein die Elastizitätsgrenze überhaupt noch kaum überschritten, für das andere wohl.

Ganz ähnliche Angaben konnte man auch aus dem Auftreten von Knickfalten ziehen.

Die Aufstellung des Begriffes einer bestimmten Fazies zieht sofort nach sich die Folgerung des Gesetzes der Korrelation der Fazies (Anmerkung: Es sei darauf hingewiesen, daß der Begriff Korrelation hier in einem anderen Sinne auftritt als er früher gebraucht wurde. Wir haben früher von dem tektonischen Korrelat eines Gefüges gesprochen, wir ordneten einer Gefügebildung einen bestimmten tektonischen Vorgang zu. Hier aber vergleichen wir nicht eine Gefügefazies und den zugehörigen Bildungsvorgang, sondern mehrere Gefügefazies miteinander. Da aber die Bezeichnung Korrelation nun einmal für beide Arten von Gedankenverbindungen gebräuchlich ist, soll sie auch hier beibehalten bleiben.), jenes Satzes, der für den Begriff der Sedimentärfazies mit so vielem Erfolge angewandt wird, der aber genau gleich auch für Kristallin- und Gefügefazies gilt. Werden Gesteine unter gleichen Bedingungen umgestaltet, sei es, daß sie einen anderen Mineralbestand annehmen oder ein anderes Gefüge, so müssen sie soweit gleichartige Züge aufweisen als ihr chemischer Bestand im einen Fall, ihr Mineralbestand im anderen Falle es zu erkennen gestattet.

Nun ändern die äußeren Bedingungen in ihrer räumlichen Verteilung nicht rasch ab, man denke zunächst an die Bedingungen der Kristallinfazies, an Temperatur und allseitigen Druck, beide können von einem Punkte zum anderen keine un stetigen Sprünge machen, ja wir sind sogar berechtigt anzunehmen, daß ihre räumlichen Wechsel recht allmählich sich vollziehen, wir werden daher erwarten, daß Gesteine, die im Verbande miteinander kristalline Umbildung erlitten haben, auf große Bereiche hin solche Mineralvergesellschaftungen zeigen, die sie in die gleiche Tiefenstufe verweisen. Es würde unser Vertrauen in die Lehre der Kristallinfazies vollkommen zerstören, wenn nachweisbar im Verbande das eine Gestein zu einem der zweiten Tiefenstufe geworden wäre, ein anderes zu einem solchen der dritten. So naheliegend aber ist der Satz, daß wir in einem solchen Falle sofort uns sagen, der Verband beider Gesteine kann hier nicht schon zu der Zeit vorhanden gewesen sein, als der Mineralbestand sich ausbildete, in einem solchen Falle wird man immer einer nachträglichen tektonischen Verlagerung das Nebeneinandervorkommen beider Gesteine zuschreiben.

Dies ist z. B. der Gedankengang, der die Trennung der Schieferhülle von dem Ostalpinen bewirkt hat.

Genau dieselben Gedankengänge sind auch für die Gefügefazies anwendbar.

Bleiben wir zunächst bei den größeren technologischen Erscheinungen, so werden wir zu erwarten haben, daß alle mechanischen Umformungserscheinungen, die unter denselben Verhältnissen, im Laufe desselben tektonischen Vorganges sich abgespielt haben, technologisch vergleichbare Formen hervorrufen. Wir werden zum Beispiele erwarten, daß die verschiedenen Hauptgleitflächen derselben Schar, soweit sie durch vergleichbare Gesteine hindurchsetzen, ein vergleichbares Gefolge von Nebengleitflächen haben, wir werden auch mit Recht erwarten, daß Hilfsgleitflächen, die gleichzeitig mit Hauptgleitflächen tätig waren, in ähnlicher Weise ihren Gleitbetrag auf die verschiedenen Flächen der Schar verteilen, wie es diese taten. Es ist dies sehr schön zu sehen an den Hilfsgleitflächen des Silberens in unserem Profile II, die genau dieselben stetigen Formen erzeugen wie die Großformen, die durch die Hauptgleitflächen ausgebildet sind.

Wir werden auch stets das Recht haben, technologisch verschiedene Formen verschiedenen Vorgängen zuzusprechen.

Es gibt kaum einen Gesteinskörper, in welchem wir nicht neben oft schönsten Fließformen auch un stetige Umformung haben, als deren Hauptvertreter wir den Verwerfer haben, der im Bergbaubetriebe eine so große Rolle spielt.

Für diese wird der Schluß, den wir aus dem Gegensatz zwischen ihrer Durchbewegungsform, nämlich vollkommen un stetige Gleitung und der der übrigen Formen ziehen, nämlich der, daß der verwerferbildende Vorgang ein anderer war als der der eigentlichen Gebirgsbildung, daß er ihm in den meisten Fällen nachfolgte, auch durch andere geologische Befunde gestützt. In der Regel zeigen die Verwerfer wohl ein System, auch sie können von dem Gesichtspunkte einer einscharigen Auslösung einer Beanspruchung betrachtet werden, aber dieses System ist nicht in Zusammenhang zu bringen mit dem eigentlichen gebirgsbildenden Beanspruchungsplane, weist auch in der Regel bedeutend mehr örtliche Wechsel auf, als wir diesem zubilligen möchten. Insbesondere ist auffallend, daß der Verschiebungssinn der Verwerfer eine deutliche Beziehung zur örtlichen Schwerkraftrichtung zeigt.

Wenn wir auch annehmen dürfen, daß die Schwerkraft in letzter Linie der Grundanlaß zu jeglicher Art der Gebirgsbildung ist, so sehen wir doch, daß die Bewegungen an Ort und Stelle des Gebirges der Schwerewirkung ebenda vielfach gerade entgegenwirken. Bei Verwerfen dagegen sehen wir eine bemerkenswerte Erscheinung, daß die Faustregel des Bergbaues zur Ausrichtung solcher Störungen, die sogenannte Schmidt-Zimmermannsche Regel, in einem Großteil der Fälle zu einem guten Ergebnis führt. Diese Regel hat aber zur Voraussetzung, daß der hangende Flügel des Vorwurfes nach abwärts geglitten sei. Der Versuch, eine gebirgsbildende „Störung“ mit diesem Satze auszurichten, müßte in den meisten Fällen vollkommen versagen, da gerade Überschiebungen so häufig die Eigenschaft haben, daß ihr hangender Flügel nach aufwärts verschoben ist. So werden wir die Verwerfer mit Recht als Entspannungserscheinungen der Nachgebirgsbildung betrachten können.

Wohl dürfen wir eine Gebirgsbildung auffassen als einen Vorgang, der die potentielle Energie der Erde herabsetzt, doch nicht auf das vollkommene Minimum, wir sahen, daß es die Reibung der Gesteine ist, die dies verhindert. So sehen wir, daß diese Entlastung der Erde nur erkauft werden kann damit, daß örtlich die Dichte der potentiellen Energie sogar außerordentlich erhöht wird. Und dies ist die Ursache der Schönheit der Gebirge und ihrer Vergänglichkeit, die Ursache der Arbeit des Steinschlages, der Gletscher und des Wassers, die die Oberfläche weißeln. Aber auch im Inneren muß dadurch das Gebirge in dauernden Beanspruchungen durch die örtliche Schwerkraft stehen und die gewöhnlichen Verwerfer dürfen wohl mit Recht als die Auslösungen dieser Nachspannungen angesehen werden.

Nicht alles jedoch, was scharf und unstetig einen stetigen Bau durchschneidet, kann vom eigentlichen Gebirgsbau losgelöst und als nachträgliche Ausgleicherscheinung aufgefaßt werden. Manche dieser Trennungen passen in ihrer Lage sehr gut in den Großbau hinein und unterscheiden sich doch in ihrer Ausbildung sehr wesentlich von ihm, ich meine die Blätter, die Schnitte, die häufig im Streichen benachbarte vorgleitende Massen, die verschiedene Schubweiten haben, voneinander trennen. Siehe die Karte des Juragebirges in Heim, Geol. d. Schweiz I. Aber auch hier möchte ich die Anregung geben, diese Blattsprünge nicht der eigentlichen Hauptphase zuzuweisen, die ihr Werk stetig vollbrachte, sondern einer unstetigen Nachphase. Wir sehen nämlich an vielen Stellen, daß ein solcher Ausgleich zwischen den Schubwegen einer Masse an den verschiedenen Stellen sehr wohl auch stetig hervorgebracht werden kann durch Sigmoiden, durch das vollkommen stetige Zurückziehen der Deckenscheitel im Streichen etc.

Gehen wir von diesen Mittelformen zum Gesetze der Fazieskorrelation in den Kleinformen, im Gefüge über:

Wir erkennen in einem Gebirge sehr häufig verschiedene, durch ihre Gefügefazies streng getrennte Bereiche. Ich habe in einigen Arbeiten insbesondere auf einen Gegensatz hingewiesen, der in den Ostalpen herrscht, daß nämlich die unterostalpine Serie vom Engadin bis zum Semmering übereinstimmend durch eine Gefügeausbildung gekennzeichnet ist, dahingehend zu kennzeichnen, daß der Quarz ihrer Gesteine kaltgereckt ist, Störungen im Korne zeigt. Ich habe diese Serie in Gegensatz zur Fazies der Muralpen gesetzt, wo solche Erscheinungen weitgehend zurücktreten und wo wir weithin nur reine Kristallisationsschieferung sehen.

Es ergab sich daraus der Schluß, daß es notwendig sei, dieser Unterostalpinserie der Stellung oberhalb der Muralpenserie zu geben, da sie eine niedrigere Umformungstemperatur beanspruche als jene, ein Schluß, zu dem ich auch auf den geologischen Befunden gekommen bin. Allerdings müssen wir in dieser Hinsicht das Gesetz der Fazieskorrelation des Gefüges noch einer Untersuchung unterziehen.

Es beruht auf der Vorstellung, daß die die Fazies bedingenden Veränderlichen keinem raschen örtlichen Wechsel unterworfen sein können. Bei der Gefügefazies können wir dies wohl für Temperatur, Beanspruchungszustand, Mineralisation annehmen, wie aber steht es hierin mit der Durchbewegung? Diese kann ja von Ort zu Ort verschieden sein, eines der wesentlichen Gesetze der mechanischen Umformung, das der Gleitbretter hat ja die Erscheinung gerade zum Gegenstand, daß der Grad der Durchbewegung von Ort zu Ort wechseln kann. Wenn wir also einen Bereich haben, in welchem durchbewegte und undurchbewegte Platten mit einander wechseln, so können sich diese in ihrer Gefügefazies sehr weit unterscheiden.

Es würde damit das Fehlen der Gefügeausbildung mit Kaltreckung nur sagen, daß die Muralpen bei dem Vorgange, der die unterostalpine Seriedurchknetete, keine Durchbewegung erlitten haben, man könnte sich vorstellen, daß sie als Block auf der unterostalpinen weiterbewegt wurde. Diese Einstellung wäre vollkommen richtig für einen Vorgang äußerster Hochtektonik, für hochostalpine Kalkzone. Dort kennen wir Fälle, wo Kalkklötze bewegt wurden, ohne durchbewegt zu werden. Für die tieferen Glieder sehen wir jedoch, daß jede Bewegung sich differentiell verteilt, daß sie ausnahmslos dem Bewegungshorizonte sich nähern, der zur Gänze durchbewegt ist, allerdings mit dem Wechsel zwischen schwach durchbewegtem Gleitbrett und den Zonen stärkerer Gleitung dazwischen. Dazu kommt noch, daß die Erscheinungen der Raumbitterstörung schon bei geringen Graden der Reckung recht auffällig werden. Es ist daher bei etwas tieferen Baugliedern schon gestattet, die Durchbewegung als einen Einfluß zu betrachten, der in seiner Einwirkung auf die Gefügefazies nicht räumlich beschränkt ist.

So zeigt die Beobachtung, daß die sicher erkannten Großglieder des Alpenbaues auch in ihrer Gefügefazies sich unterscheiden, es unterscheiden sich die Schiefer der Schieferhülle in der Entstehungsgeschichte ihres Feinbaues nicht minder von den Gesteinen der Muralpen wie in ihrem Mineralbestande, es lassen sich die Gesteine der unterostalpinen Serie auch im Gefüge von denen der Schieferhülle trennen usw., so daß man sich berechtigt fühlt, den Satz aus der Korrelation der Gefügefazies abzuleiten.

Soweit man annehmen darf, daß eine Umformung sich differentiell über den Gesteinskörper ausbreitet, bedeutet die Grenze zweier Gebiete verschiedener Gefügefazies die Grenze zweier tektonischer Einheiten.

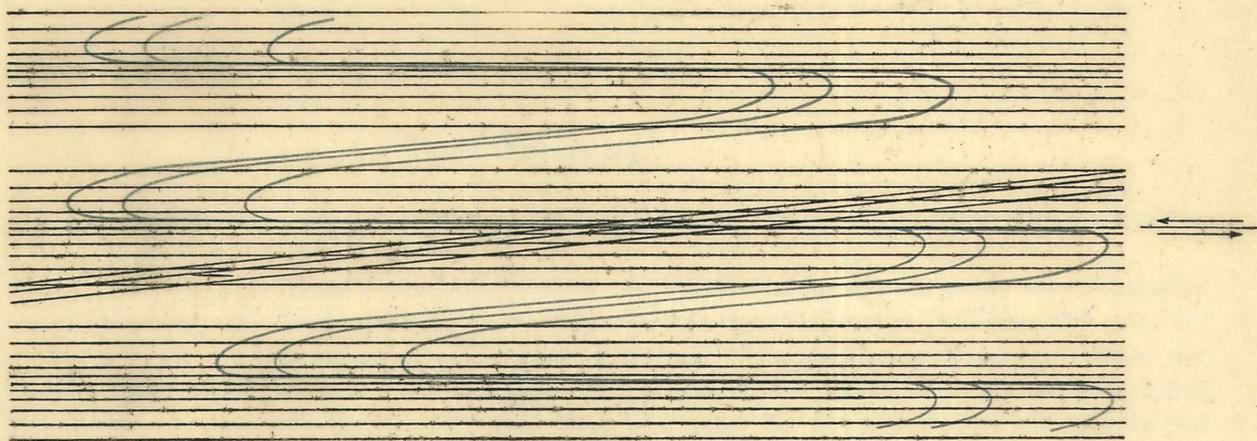


Fig. 1 b.

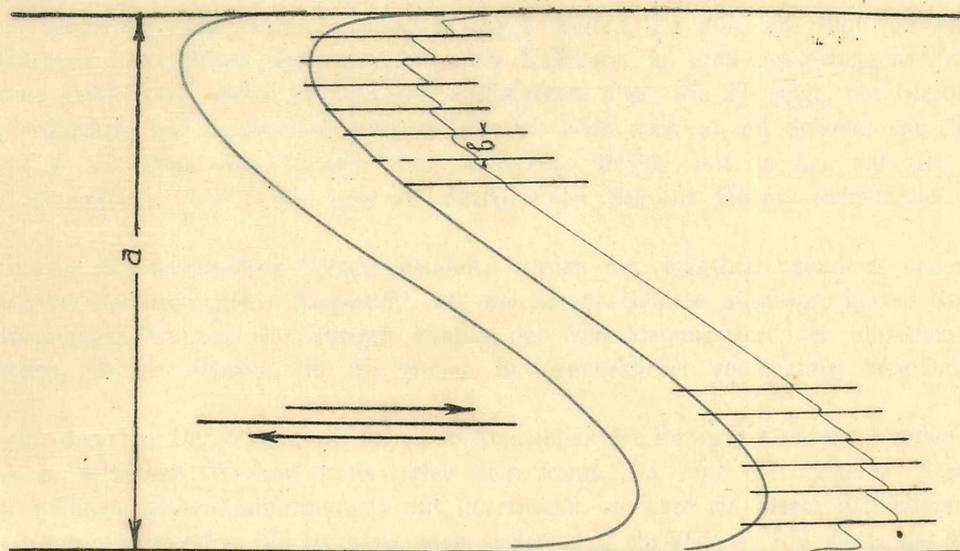


Fig. 2 b.

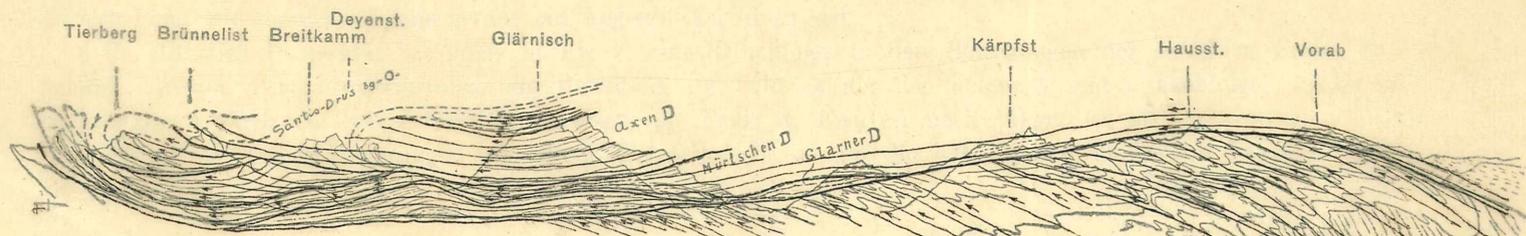


Fig. 3 a.  
Fig. 3 b.

Nach Heim, Geol. d. Schweiz. II. XVIII.

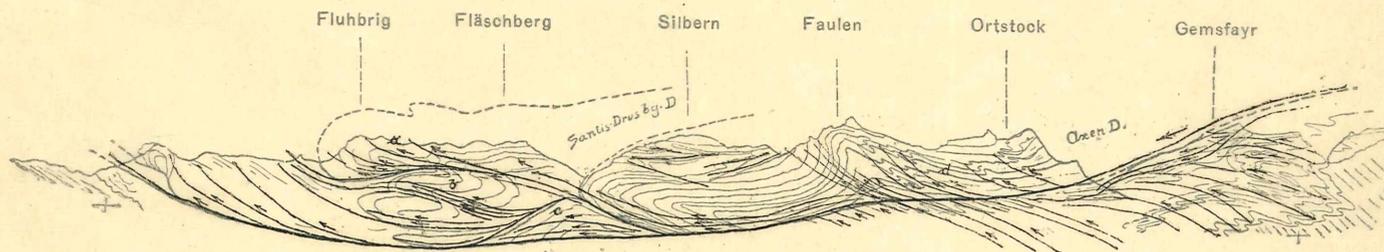


Fig. 4 b.

Nach Heim, Geol. d. Schweiz. II. XVII.

## Tafelerklärung.

Die Figuren der Tafel stellen geologische Formen dar, während die zugehörige Oleate den Bewegungsplan zeigen soll, der zu diesen Formen geführt hat.

Fig. 1 stellt die auf S. 21 entwickelte Vorstellung dar, wie sich liegende Faltenformen durch eine einscharige Gleitung mit einer Verteilung der Durchbewegung nach dem Gesetze der Gleitbretter erklären läßt. In der Oleate ist die Verteilung der Durchbewegung auf Hauptgleitfläche und Nebengleitflächen durch die Dichte der Spuren der Flächen darzustellen versucht, die schrägen Linien stellen die Lage einer der ursprünglichen Schichtung des Gesteines zu den Gleitflächen dar. Das Hauptbild zeigt die so entstehenden Formen, wobei insbesondere die Beeinflussung der geologischen Mächtigkeit durch diesen rein einscharigen Bewegungsvorgang ins Auge fällt. Die Mächtigkeit einer Schichte, in der Richtung der Gleitflächenspur gemessen, ist aber über das ganze Bild hin dieselbe.

Fig. 2 (zu S. 22) Regel der Stauchfaltengröße in liegenden Falten. 2a gibt das Bild von Falten in einem aus verschiedenen Schichten bestehenden Gesteine, etwa eine Kalkbank in groß geschwungene Falten gelegt in einem Schiefer, der klein gefältelt ist. Beide Faltenformen entstammen aber, wie 2b zeigt, der Gleitung nach einer einzigen Schar von Gleitflächen, nur ist die Gleitbretterteilung im Kalk weit (a), im Schiefer eng (b).

Fig. 3 und 4 zu S. 27 stellen den Versuch dar, geologische Profile mit in den auf der Oleate dargestellten „Stromlinien“ zu erklären. Die Profile sind der Geologie der Schweiz Heims entnommen aus Band II, T. XVIII.

Da es sich um stetig durchgearbeitete Gebiete handelt, wurden die eigentlich unendlich vielen Gleitflächen einer Schar durch einzelne herausgegriffene dargestellt, als welche im Gebiete ausgesprochenen Bretterbaues die Hauptgleitflächen herangezogen wurden. Im übrigen konnte der Verschiebungswert der einzelnen Flächen nur soweit dargestellt werden, als die Flächen, die die großen Bewegungskörper voneinander trennen, stärker dargestellt wurden.

Es ist klar, daß eine derartige Darstellung nur für einen Augenblick der Bewegung gegeben werden sollte, da der Bewegungszustand einem zeitlichen Wechsel unterworfen sein kann. Da nun die früheren Bewegungsbahnen selbstverständlich den späteren Gesteinsumformungen mit unterliegen, so wäre ein klares Stromlinienbild nur von dem Schlusse der Bewegung zu entwerfen. Es ist aber auch sicher, daß ein Versuch wie dieser da diesen strengen Forderungen nicht nachkommen könnte, ohne sich auf ganz Nichtssagendes zu beschränken. Es ist daher ein jedes dieser Stromlinienbilder eigentlich eine Sammeldarstellung aus den letzten Bewegungsvorgängen, soweit sie sich nicht widersprechen, ohne gerade ein Augenblicksbild zu sein.

Es läßt sich immerhin, besonders in Fig. 3, eine Reihenfolge in den Bewegungen der einzelnen Felder entnehmen, indem höchstwahrscheinlich die Bewegung im Felde *a* der der Felder *b* und *c* nachfolgte, während höchstwahrscheinlich das steile Gleitflächensystem im Felde *d*, Faulen noch jünger ist als das von *a*.

Über die weiteren Folgerungen aus diesen Darstellungen sei auf die betreffenden Stellen im Texte S. 27 ff. verwiesen.

## Sachverzeichnis.

	Seite		Seite
Abbildung	55	Korrelat der Streckung	58
Asymmetrie der Gleitflächen	11	Korrelat der Warmreckung .	44
Auswahl der Gleitflächen.	11 – 17	Liegende Falten	20
Ausweichen	3	Lösungsumsatz	45
Beanspruchungen	6	Lösungsumsatz, tektonische Bedeutung	46
Beanspruchungsplan	8	Lösungsumsatz, Gefügebildung	48
Beanspruchungsplan eines Gebirges	30	Mechanische Gefügeregelung	31
Beanspruchungszustand	6	Mechanische Umformung	2
Biegegleitung	37	Mehrphasigkeit eines Gebirgsbaues	28
Bezugssystem der Tektonik.	13	Mörtelbildung	40
Chemische Umformung	2, 41	Mylonite	39
Deckenbau	26	Nichttektonite.	62
Differentialbewegung	17	Porphyroblasten	47, 49, 53
Einregelung des Beanspruchungsplanes	9	Quarzgefügeregel	38
Einwicklung	29	Rekristallisation	40, 42
Fernkräfte	14	Richtungsregelung, mechanische	36
Gefügefazies	61	Rieckesches Prinzip	46, 49
Gefügesymmetrie	52	Satz der Einscharigkeit der Gleitflächen	17
Gleitbretter	18	Satz der Gleitbretter	18
Gleitung	6, 10, 11	Scherung	6
Großgleitflächen	36	Spannungen.	6, 9
Hauptbeanspruchungen.	7	Stoffbestand, Einfluß auf Umformung	22
Hauptebenen	7	Streckung	56
Hilfsgleitflächen	28	Tektonite	32, 62
Kaltreckung in Gesteinen	35	Umfaltung	20
Kaltreckung in Metallen	32	Unstetige Formänderung	17
Knickfalten	24	Warmreckung	41
Kristallinfazies	62	Warmgereckte Gesteine	43
Kristallisationsschieferung	41, 49	Wegefähigkeit der Kräfte	14
Korngleitflächen	36	Widerstände	14
Korrelation der Gefügefazies	63	Zerreißen	6, 10
Korrelat der Kaltreckung	41		