

Original-Mitteilungen an die Redaktion.

Zur Frage der Beziehungen von Kristallisation und Schieferung in metamorphen Gesteinen.

Von H. P. Cornelius.

Die Prozesse, welche zur Umwandlung von normalen Sedimenten oder Erstarrungsgesteinen in kristalline Schiefer führen, pflegen in zwei ganz verschiedenen Richtungen umgestaltend auf jene einzuwirken. Einmal wird der Mineralbestand umgeformt: tonige Substanz zu Glimmern oder Tonerdesilikaten verschiedener Art — Feldspäte unter Umständen zu Sericit oder zu Albit und Zoisit —, um nur einige Beispiele anzuführen. Untrennbar verbunden mit dieser mineralischen Umgestaltung ist die Ausbildung bestimmter Strukturformen; neben der allgemeinen Eigentümlichkeit der Umwandlung in festen Zustand: der mangelhaften Entwicklungsmöglichkeit der einzelnen Komponenten, sind für sie vor allem die speziellen Eigenschaften der letzteren bestimmend, wie Kristallisationsvermögen, bevorzugte Wachstumsrichtungen usw. So entstehen die Pflaster-, Sieb-, Filzstrukturen der metamorphen Gesteine — mit einem Wort: die kristalloblastischen Strukturen.

Die andere Richtung, in welcher eine Umwandlung der Gesteine stattfindet, betrifft die räumliche Anordnung von deren einzelnen Gemengteilen, die Textur (GRUBENMANN). Bei der Mehrzahl der metamorphen Gesteine besteht deren Haupteigentümlichkeit in der bevorzugten Stellung einer bestimmten Ebene, der Schieferungsebene, indem die meisten oder alle Gesteinsbestandteile plattig oder säulig entwickelt und mit ihren größten Durchmessern mehr oder weniger parallel orientiert sind; häufig sind gleichzeitig die einzelnen Gemengteile der Art nach geschieden, in parallelen Lagen angeordnet. Wir bezeichnen ja deshalb die meisten metamorphen Gesteine als kristalline Schiefer.

Die genannten beiden Hauptgruppen von Merkmalen metamorpher Gesteine, der spezifische Mineralbestand und die schieferigen Texturen, sind voneinander in weitgehendem Maße unabhängige Komplexe von Erscheinungen. Dies ist eine Tatsache, welche vielfach nicht genügend beachtet worden ist. Und doch liegen Beobachtungen genug vor, aus welchen sie hinreichend klar hervorgeht.

Zunächst gibt es zahlreiche Beispiele von Gesteinen, die lokal, im Zusammenhang mit intensiven tektonischen Störungen, starke Schieferung zeigen, ohne daß damit eine Änderung des Mineralbestandes verbunden wäre — ja vielfach nicht einmal eine Neukristallisation: das Mikroskop zeigt, daß die Schieferung auf rein mechanischem Wege, bloß durch Zertrümmerung der ursprünglich vorhandenen Gesteinsbestandteile zustande gekommen ist. Über diese Tatsache dürften wohl alle heutigen Petrographen einig sein — sie hat zur Erledigung der Theorie des „Dynamometamorphismus“ im alten Sinne geführt. Ein weiteres Eingehen darauf erscheint folglich nicht geboten.

Weit weniger Beachtung hat die andere Tatsache gefunden, daß zahlreiche metamorphe Gesteine mit vollständiger Unberührtheit der ursprünglichen Textur mehr oder minder weitgehende Umgestaltung des Mineralbestandes verbinden¹ —, und zwar eine Umgestaltung in derselben Richtung, wie man sie sonst an dem gleichen Gestein mit textueller Deformation einhergehen zu sehen gewohnt ist. Einige Beispiele mögen das Gesagte erläutern.

Im Oberengadin treffen wir große Massen von granitischen und anderen Erstarrungsgesteinen, ausgezeichnet durch die schön grüne Farbe ihrer Plagioklase — die bekannten Albula- und Juliergranite. Sie liegen deckenförmig überschoben auf mesozoischen Sedimenten, wie aus einer Reihe von neueren Untersuchungen² hervorgeht. In der Nachbarschaft der Bewegungsflächen, auch solcher von untergeordneter Bedeutung, sind die Granite stets, z. T. sehr intensiv, geschiefert. Im Mikroskop beobachtet man dort (neben weitgehender mechanischer Zertrümmerung sämtlicher Gemengteile) stets reichliche Neubildung von Sericit auf Kosten vor allem des Plagioklases, der in zahlreichen Fällen vollständig aufgezehrt erscheint. Abseits von diesen Zonen intensiver Umformung aber gibt es weite Strecken, wo man keine Spur von Schieferung sieht — vielmehr durchweg der rein massigen Textur des normalen, in keiner Weise deformierten Massengesteins begegnet. Und doch überrascht auch hier auf Schritt und Tritt den Beobachter die schon erwähnte grüne Farbe der Plagioklase — auch hier bedingt, wie das Mikroskop zeigt, durch die Neubildung von unzähligen feinen Sericitschüppchen. Fast stets überwuchern sie den

¹ Selbstverständlich ist nicht die Rede von kontaktmetamorphen Gesteinen, bei welchen ein derartiges Verhältnis nichts Auffallendes an sich hat.

² F. ZYNDEL, Über den Gebirgsbau Mittelbündens. Beitr. z. geol. Karte d. Schweiz. Neue Folge. 41. 1912. — H. P. CORNELIUS, Petrographische Untersuchungen in den Bergen zwischen Septimes- und Julierpaß. N. Jahrb. f. Min. etc. Beil.-Bd. XXXV. 1912. p. 374. — R. STAUB, Zur Tektonik des Berninagebirges. Vierteljahrsschr. naturf. Ges. Zürich 1914. p. 329.

ursprünglichen Plagioklas derart, daß dessen genaue Bestimmung unmöglich wird — selbst wo man die Zwillingslamellen noch hindurchschimmern sieht¹; aber irgend eine Gesetzmäßigkeit in der Anordnung dieser Neubildungen — eine Tendenz zur Anordnung in parallelen Ebenen ist auch im Mikroskop niemals zu erkennen: als vollständig regelloses Haufwerk erfüllen sie das Muttermineral.

Wir haben also in dem nicht geschieferten Gestein die Tendenz zu der gleichen mineralischen Umwandlung, welche das vollständig deformierte beherrscht.

In dem soeben angeführten Falle handelt es sich um ein Beispiel aus der Zone vorwiegend mechanischer Gesteinsumformung, wo nur besonders empfindliche Mineralien (wie die Plagioklase) der chemischen Umwandlung erliegen. Aber ganz entsprechende Erscheinungen sind vielfach zu beobachten auch in Regionen, wo sich die Metamorphose vorwiegend auf dem Wege der Umkristallisation äußert.

Und zwar bieten hier, in den Westalpen, vor allem die „grünen Gesteine“ eine Fülle von Beispielen — jene mannigfaltige Gesellschaft von mehr oder weniger umgewandelten Gabbros, Diabasen, Peridotiten usw., welche sich in breitem Gürtel durch die ligurischen, piemontesischen, penninischen Alpen ziehen und, nach Unterbrechung im Tessin, im südlichen Graubünden und den benachbarten italienischen Tälern nochmals große Bedeutung gewinnen.

In der letztgenannten Gegend, in den Bergen östlich des Monte Disgrazia in der oberen Val Malenco, spielt unter den grünen Gesteinen neben dem vorwaltenden Serpentin auch Gabbro eine bedeutende Rolle². Er hat in einzelnen (freilich der Masse nach untergeordneten) Partien die ursprüngliche massige Textur vollständig bewahrt, ohne jede Spur von Schieferung. Aber der ursprüngliche Mineralbestand ist zumeist restlos verschwunden: einheitliche Individuen von blaßgrüner uralitischer Hornblende — öfters noch unter Erhaltung der Zwillingslamellierung nach (100) —, in anderen Fällen wirre Aggregate desselben Minerals sind an die Stelle der Pyroxene getreten; der Plagioklas ist regellosen Haufwerken von Zoisitstengeln mit Untergrund von neugebildetem Albitpflaster gewichen, und an seinen Grenzen gegen den ursprünglichen Pyroxen haben sich gelegentlich kleine Granatindividuen angesiedelt.

¹ Daß es sich dabei nicht etwa um eine Verwitterungserscheinung handelt, geht hervor aus einer Angabe von Züst (Über granitische und diabasische Gesteine in der Umgebung von Ardez. Diss. Zürich 1905), wonach die Feldspäte eines von ihm analysierten Granits aus dem Albulatunnel besonders lebhaft grüne Färbung zeigten; und dort, mehrere 100 m unter der Erdoberfläche, kann von Verwitterung nicht mehr die Rede sein.

² Kurz erwähnt in: H. P. CORNELIUS, Zur Kenntnis der Wurzelregion im unteren Veltlin. N. Jahrb. f. Min. etc. Beil.-Bd. XL. 1915. p. 260.

— Von diesen rein massigen Gesteinen finden sich Übergänge zu mehr oder minder flaserigen Typen und endlich zu vollkommen geschiefertem, die meist auch intensive Fältelung zeigen; der Menge nach walten sie gegenüber den massig gebliebenen Gesteinen bedeutend vor. Kataklastische Erscheinungen fehlen anscheinend so gut wie gänzlich. Die Paralleltextur kommt durch Anordnung der einzelnen Gemengteile — Hornblende, Zoisit, Albit — in getrennten Lagen zustande, verbunden mit paralleler Stellung der Längsachsen der einzelnen Individuen. Aber der Mineralbestand ist auch in den stärkst geschiefertem Typen im wesentlichen derselbe wie in den vollständig massigen; der einzige Unterschied ist der, daß Chlorit und heller Glimmer, die in den letzteren nur ganz untergeordnet auftreten, in jenen z. T. größere Bedeutung gewinnen. — Analoge Umwandlungserscheinungen hat R. W. SCHÄFER¹ von den Gabbrogesteinen des Allalingerbietes im Wallis beschrieben; auch dort finden sich textuell unveränderte Gesteine in derselben Richtung und z. T. gerade so vollständig ummineralisiert wie die vollkommen geschiefertem.

Ganz entsprechende Beobachtungen lassen sich auch an anderen Gliedern der Gruppe der grünen Gesteine anstellen, z. B. den Peridotiten und den Diabasporphyriten. Ein näheres Eingehen darauf erscheint an dieser Stelle nicht geboten; nur ein Beispiel sei noch kurz erwähnt wegen der absonderlichen Art der mineralischen Umgestaltung. Bei diesem, von S. FRANCHI² beschriebenen und abgebildeten Diabasporphyrit ist die ursprüngliche Erstarrungsstruktur in geradezu wunderbarer Weise erhalten geblieben — von Schieferung keine Spur wahrnehmbar. Die scharf rechteckig umrissenen Plagioklaseinsprenglinge sind in Lawsonit übergegangen, neben dem der gleichfalls neugebildete Albit stark zurücktritt. In der Grundmasse ist der ursprüngliche Pyroxen noch in geringen Resten erhalten geblieben; in der Hauptsache aber hat er regellos im Gestein orientierten Nadeln von grüner Hornblende, parallel verwachsen mit Glaukophan, Ursprung gegeben. Ein feiner Filz des letztgenannten Minerals erfüllt die Zwischenräume; Lawsonit, Zoisit, Klinochlor erscheinen ihm in kleinen Individuen beigemengt.

Daneben erwähnt FRANCHI auch geschieferte Vertreter ganz der gleichen Mineralkombination — mit dem einzigen Unterschiede, daß in diesen auch der Pyroxen vollständig verschwunden ist, der

¹ R. W. SCHÄFER, Über die metamorphen Gabbrogesteine des Allalingerbietes im Wallis, zwischen Zermatt und Saastal. Tscherm. Min. u. petr. Mit. 15. 1896.

² S. FRANCHI, Contribuzione allo studio delle rocce a glaucofane e del metamorfismo onde ebbero origine nella regione ligure-alpina-occidentale. Boll. com. geol. Ital. 1902. p. 255.

in dem massigen Gestein noch einen letzten Rest des ursprünglichen Mineralbestandes darstellte.

Die angeführten Beispiele dürften genügen, um die Richtigkeit der vorangestellten Behauptung zu erweisen: daß die Umwandlung des Mineralbestandes durchaus unabhängig ist von der Ausbildung der parallelen Textur. Wenn erstere auch gelegentlich in massig gebliebenen Gesteinen nicht so vollständig verläuft wie in den textuell umgeformten, so hat sie doch auch in jenen, in allen erwähnten Fällen, den Weg bereits beschritten, den sie in den geschieferten Typen zu Ende gegangen ist.

Hieraus folgt aber mit Notwendigkeit, daß diejenigen Faktoren, welche die Ausbildung der Schieferung zur Folge haben, für die Umbildung des Mineralbestandes nicht oder doch nur in nebensächlicher Weise bestimmend sind.

Was sind das nun für Faktoren?

Bei Beantwortung dieser Frage seien alle die Fälle übergangen, wo die Schieferung primärer Natur ist — als Fluidalerscheinung usw. in Erstarrungsgesteinen, Feinschichtung in Sedimenten; und ebenso diejenigen, wo die Schieferung eines metamorphen Gesteins als „kristallin abgebildete“¹ Primärschieferung zu deuten ist. Nur von der Schieferung der „kristallinen Schiefer zweiter Art“, wie sie ERDMANNSDÖRFFER² nennt — der unter wesentlicher Mitwirkung tektonischer Vorgänge umgeformten Gesteine —, sei im folgenden die Rede.

Als bestimmenden Faktor für die Ausbildung der Paralleltexuren solcher Gesteine faßt die herrschende Theorie der kristallinen Schiefer den Streß, den gerichteten Druck auf. Es fragt sich aber, ob nicht in vielen, vielleicht den meisten Fällen die ihm unmittelbar zugeschriebenen Wirkungen vielmehr auf Rechnung einer differentiellen Bewegung in der Richtung der Schieferung zu setzen sind. Dies ist schon die Auffassung von HEIM³, wenn er im Clivage den Ausdruck eines Ausweichens erkennt. Die Arbeiten SANDER's⁴ haben die Bedeutung von Teilbewegungen für das Gesteinsgefüge in zahlreichen Fällen gezeigt.

¹ B. SANDER, Über Zusammenhänge zwischen Teilbewegung und Gefüge in Gesteinen. TSCHERM. Min. u. petr. Mitt. 30. 1911. p. 281.

² O. H. ERDMANNSDÖRFFER, Über Schieferung und Schichtung in kristallinen Schiefen. Dies. Centralbl. 1918. p. 183.

³ ALB. HEIM, Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung. Basel 1878.

⁴ B. SANDER, a. a. O.; ferner besonders: Über tektonische Gesteinsfazies. Verh. geol. Reichsanst. Wien, 1912; Bemerkungen über tektonische Gesteinsfazies und Tektonik des Grundgebirges, ib. 1914; Beiträge aus den Centralalpen zur Deutung der Gesteinsgefüge. Jahrb. geol. Reichsanst. Wien. 64. 1914. p. 567.

Auch KÖNIGSBERGER¹ schreibt nicht so sehr dem Druck, als der Bewegung den maßgebenden Einfluß zu.

Die Wandlung, welche unsere Auffassung von den tektonischen Vorgängen bei der Entstehung der großen Faltengebirge, insbesondere der Alpen, in den letzten Jahrzehnten erfahren hat — die Erkenntnis, daß nicht so sehr eine Zusammenpressung der Schichten an Ort und Stelle, als vielmehr gewaltige Horizontalbewegungen im Spiele gewesen sind, legt auch eine Umgestaltung der Theorie der Metamorphose in dem angedeuteten Sinne nahe.

Wie verhalten sich nun dazu die Erscheinungen der Schieferung?

Wir haben da zwei Fälle zu unterscheiden: einmal die rein mechanische, kataklastische, und zweitens die unter Mitwirkung von Kristallisationsvorgängen zustande gekommene Schieferung.

Im Falle der rein mechanischen Schieferung erscheinen die ursprünglichen Gesteinsgemengteile in eine Reihe von Bruchstücken — oft nach Gleit- oder Spaltflächen — zerlegt, welche in einer bestimmten Richtung hintereinander zu liegen kommen; tafelig oder säulig gestaltete Mineralpartikel stellen sich dabei mit ihren größten Durchmessern in die gleiche Richtung ein; bei vollständiger Zermalmung erfüllt das feine Zerreibsel jedes einzelnen Mineralkorns je einen langgestreckten Streifen für sich; insbesondere bilden die aus der Umwandlung namentlich von Plagioklasen hervorgehenden Glimmerschüppchen lange Züge für sich; einzelne verhältnismäßig widerstandsfähige Individuen — z. B. die einsprenglingsartigen Orthoklase eines porphyrtartigen Granits — werden zu linsenförmigen Gebilden abgerundet. Die ganze Tendenz der Umformung geht dahin, dem Gesteine eine Gestalt zu geben, bei der der Widerstand gegen gleitende Bewegungen einer Lage auf der anderen ein Minimum ist. Das Ergebnis sind Lagen-, Streifen-, Linsentexturen — oft von vollendeter Regelmäßigkeit und Feinheit.

Ihre Entstehung im Zusammenhang mit tektonischen Horizontalbewegungen verrät die mechanische Schieferung meist ohne weiteres: in vollendeter Ausprägung erscheint sie stets an die Nachbarschaft von Bewegungsflächen gebunden.

Auf alle die mannigfaltigen Erscheinungsformen der nicht mechanischen Schieferung einzugehen ist hier nicht der Ort. Es seien nur einige Tatsachen hervorgehoben, welche über die Natur der zu ihrer Entstehung führenden Bewegungsvorgänge Licht verbreiten können.

Da ist zunächst zu nennen die weitgehende Analogie bezüglich der Textur, welche z. B. sehr viele granitische Augengneise mit rein mechanisch geschiefertem Graniten verbindet. Auch in jenen zeigen die großen reliktschen Feldspäte die gleichen

¹ J. KÖNIGSBERGER, Über Mineralfundorte in den Alpen und über Gesteinsmetamorphismus. Zeitschr. d. deutsch. Geol. Ges. 64. 1912. p. 501.

Linsenformen — auch in ihnen findet sich die streifenförmige Trennung der einzelnen Mineralspezies, und insbesondere fast stets die Anordnung der Glimmerminerale in verhältnismäßig gut abgegrenzten Lagen für sich, im Wechsel mit glimmerarmen, wesentlich aus Quarz und Feldspat bestehenden. Es ist ganz dieselbe räumliche Anordnung der Komponenten wie in mechanisch geschieferten Graniten — nur ist im Gegensatz zu diesen das Korn viel gröber, und die kataklastischen Erscheinungen fehlen oder treten zurück. Ganz entsprechende Lagentexturen sind auch in anderen Gruppen der kristallinen Schiefer verbreitet, z. B. Amphiboliten und Epidotchloritschiefern gabbroider und diabasischer Abkunft — auch da ist eine Trennung der blätterigen, bezw. steingligen Gemengteile (Chlorit, Hornblende) einerseits, der mehr körnig entwickelten (Feldspäte, Epidot) andererseits häufig genug: die Umwandlungsprodukte des oben erwähnten Gabbros von Val Malenco bieten ein typisches Beispiel.

An der genannten Analogie geht die Theorie der kristallinen Schiefer vorüber, wenn sie die Lagentexturen auf dem Wege der Kristallisationschieferung entstehen läßt: durch unter seitlichem Druck erfolgte Auflösung der einzelnen Mineralkörner an den Stellen stärksten Druckes, Weiterwachsen in der Richtung senkrecht zu der seinen. Und die wenig geneigte Lagerung der meisten in Frage kommenden alpinen Gneise etc. vom Oberengadin durchs nördliche Tessin bis ins Wallis schließt einen unmittelbaren Einfluß seitlicher Zusammenpressung auf die Entstehung der Schieferung wohl aus — diese müßte in solchem Fall vielmehr steil verlaufen, wie es in den äußeren Massiven der Westalpen der Fall ist. Es erhebt sich die Frage, ob wir nicht vielmehr auch dort, wo keine kataklastischen Erscheinungen wahrnehmbar sind, die gleichen Vorgänge als wirksam annehmen müssen, die zur Entstehung der mechanischen Schieferung führen — aber begleitet und überdeckt von Kristallisationsvorgängen, die alle Spuren der Kataklyse ausgelöscht haben.

Tatsächlich gibt es Fälle, wo solche auch nach der Umkristallisation in ausgeheiltem Zustande kenntlich geblieben sind. So beobachtet man in dem oben erwähnten umgewandelten Gabbro von Val Malenco gelegentlich Scherflächen, welche die einheitlich uralitisierten Pyroxene entzweischneiden. Die beiden Teile erscheinen um geringe Beträge gegeneinander verschoben. Jede Andeutung von Zermalmungserscheinungen, undulöse Auslöschung usw. fehlt jedoch vollständig. Dagegen haben sich auf der Scherfläche kleine Hornblendenadeln angesiedelt — nicht als parallele Fortwachsung, wie sonst häufig an den Rändern von uralitisiertem Pyroxen, sondern sämtlich in der Bewegungsrichtung schief gestellt. Man erkennt daraus das Zusammenwirken von scherender Bewegung und Kristallisation.

Ein besonders instruktives Beispiel beschreibt KLEMM¹ aus dem Tessiner Massiv. Ein granitischer Gneis ist in intensiver Weise gefältelt; in der Medianebene der Falten oder schräg auf deren Schenkel setzen Scharen von parallelen, mit Biotitblättchen belegten Flächen hindurch, an welchen sich gelegentlich Verschiebungen beobachten lassen; jede Spur von Zertrümmerungserscheinungen fehlt dabei. Und doch sind jene Flächen bestimmt als Ausdruck von gleitenden Bewegungen anzusehen — ein regelrechter Clivage, wie es ganz analog in zahllosen Fällen aus nicht metamorphen Gesteinen bekannt ist — in dem genannten Granitgneis jedoch durch die Umkristallisation überdeckt.

Ein Beispiel für gleitende Bewegungen in einem von kataklastischen Erscheinungen gänzlich freien sedimentären Phyllit der Malojaserie des Oberengadins sei noch angeführt. Das Gestein wurde von mir 1912 (a. a. O.) beschrieben. Es ist ausgezeichnet durch Lagentextur, indem vorherrschend aus Quarz (daneben Albit) bestehende Lagen mit solchen aus Muscovit und Chlorit wechseln. Die beiden letztgenannten Mineralien finden sich „nicht selten zu Paketen von länglicher Form vereinigt, deren Längsrichtung der Schieferung parallel orientiert ist, während die einzelnen Blättchen, woraus sie bestehen, dazu quer liegen“ (a. a. O. p. 393). Für diese Erscheinung fehlte mir 1912 eine Erklärung. Ohne Schwierigkeit ergibt sich eine solche im Zusammenhang mit der Annahme von gleitenden Bewegungen einer Gesteinslage über die andere: die genannten Pakete sind alsdann als eng zusammengestauchte Partien der dünnen und leichtverletzlichen Chlorit-Glimmerlagen aufzufassen — bei dieser Bewegung erfolgte Biegungen und Knickungen der einzelnen Blättchen aber, ebenso jedenfalls auch nicht ausgebliebene Zertrümmerungserscheinungen an Quarz- und Albitkörnern sind nicht mehr wahrzunehmen —, die Kristallisationsvorgänge haben solche Deformationsspuren nachträglich unkenntlich gemacht.

Nur kurz hingewiesen sei hier auf die nicht seltene Erscheinung in gefalteten kristallinen Schieferungen, daß Glimmer- und Chloritblättchen, Hornblendesäulen etc. die Falten in der Weise zum Ausdruck bringen, daß sie sich ihrer idealen Krümmung tangential anlegen, ohne selbst gebogen oder gebrochen zu sein:

¹ G. KLEMM, Bericht über Untersuchungen an den sog. „Gneisen“ etc. der Tessiner Alpen (I). Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. Berlin 1904. — KLEMM's Auffassung deckt sich nicht mit der hier vertretenen; er betrachtet das Fehlen von Zertrümmerungserscheinungen als Beweis dafür, daß sich die Bewegungen im noch nicht erstarrten Gestein abgespielt haben, und nach der Erstarrung tektonische Einwirkungen nicht mehr erfolgt sind. Er muß folglich die Intrusion der Tessiner Granitgneise in die Zeit nach den alpinen Faltungsvorgängen, d. h. ins Jungtertiär versetzen — was mit zahlreichen geologischen Tatsachen im Widerspruch steht.

„die Schichten sind gebogen, die Kristalle gerade“, wie LACHMANN¹ sich ausdrückt. Auf diese Erscheinung hat SANDER in Tauerngesteinen wohl zuerst aufmerksam gemacht; sie ist aber auch sonst weit verbreitet: So habe ich sie z. B. in stark geschieferten und gefalteten Typen jenes metamorphen Gabbros von Val Malenco beobachtet. Auch sie ist nur zu verstehen, wenn wir annehmen, die bei der Gesteinsdeformation unausbleibliche Deformation auch der einzelnen Mineralindividuen sei durch nachfolgende Kristallisation wieder verwischt worden.

In allen den genannten Fällen ist die Schieferung somit nicht als „Kristallisationsschieferung“ aufzufassen, sondern als „kristallin abgebildete“ (SANDER) mechanische (oder in dem Fall des sedimentären Phyllits wohl primäre) Schieferung. Diese Erklärungsweise dürfte auf einen großen Teil der alpinen kristallinen Schiefer zu übertragen sein — speziell auf die große Mehrzahl der durch Lagen- oder Flasertextur ausgezeichneten, die nur in der oben angedeuteten Weise, als Ergebnis einer Zerstückelung und flächenförmigen Auswalzung ursprünglich einheitlicher Körner zu verstehen ist².

Zu den wichtigsten Ergebnissen der geologischen Aufnahmen des Verfassers im südlichen Graubünden und den benachbarten italienischen Alpengebieten gehört die Feststellung, daß dort Gebiete mit vorwiegend mechanischer, an Bewegungsflächen geknüpfter Metamorphose tertiären Alters verhältnismäßig scharf getrennt sind von solchen einer regionalen Umkristallisation. Erstere fallen im wesentlichen zusammen mit den tektonisch höheren ostalpinen³, die zweiten mit den tieferen penninischen Decken. Im vollen Einklang hiermit stehen die Ergebnisse von SANDER in den Tauern, der dort Gebiete mit vorkristalliner und solche mit nachkristalliner Tektonik unterscheidet.

Wie ist nun das angegebene Verhältnis von Schieferung und Kristallisation zu erklären? Man könnte zunächst daran denken, daß einer tektonischen Deformationsphase, welche die Schieferung erzeugt hätte, eine Kristallisationsphase nachgefolgt sei — etwa im Zusammenhang mit der Kontaktwirkung aufdringender Magmen, wie das KLEMM und WEINSCHENK annehmen. Fälle dieser Art kommen zweifellos gelegentlich vor — dem Verfasser sind solche

¹ R. LACHMANN, Beiträge zur Plastizitätsfrage. Dies. Centralbl. 1912. p. 753.

² Soweit nicht ursprüngliche Feinschichtung, Injektions- oder Differentiationsbänderung vorliegt.

³ Die auch im ostalpinen Deckengebiet reichlich vertretenen Gesteine mit kristalloblastischer Schieferung sind gänzlich unabhängig von der alpinen Tektonik; ihre Metamorphose ist viel älter — sicher vortriadisch; vgl. H. P. CORNELIUS, a. a. O., sowie: Zur Kenntnis der Wurzelregion im Unteren Veltlin. N. Jahrb. f. Min. etc. Beil.-Bd. XL. 1915. p. 253.

aus den Kontaktzonen des (tertiär intrudierten) Disgraziamassivs, zwischen dem Bergell und dem Unteren Veltlin, bekannt. Für die weit überwiegende Mehrzahl der alpinen kristallinen Schiefer aber verbietet eine derartige Erklärung der Umstand, daß eine umwandelnde Eruptivmasse fehlt — eine jungintrusive Natur der alpinen Gneise, wie sie die genannten Autoren u. a. behaupten, ist mit zahlreichen geologischen Tatsachen gänzlich unvereinbar.

Man kann aber andererseits auch annehmen, daß wohl Deformation und Kristallisation gleichzeitig erfolgt sind, die letztere jedoch über das Aufhören der ersteren hinaus weitergedauert habe, wie das SANDER für die Tauern ausgesprochen hat. Die Bedingungen für die Kristallisation wird man dabei in regional wirksamen Faktoren zu suchen haben — unabhängig von Eruptivgesteinen nachtektonischen Alters, die dem größten Teil der Alpen fehlen, unabhängig andererseits von tektonischen Bewegungsflächen. Die Beschränkung der Umkristallisation auf die tieferen tektonischen Elemente der Zentralalpen: die penninischen Decken (wobei wieder in der Art der Ummineralisation eine Abhängigkeit von der tektonischen Tiefe, in Übereinstimmung mit der BECKE-GRUBENMANN'schen Zonenlehre, festzustellen ist) legt die Vermutung nahe, den wesentlichen jener Faktoren dort in der Belastung durch höhere Überschiebungsdecken zu suchen — genauer gesprochen wohl: in der mit steigender Belastung gleichfalls steigenden Temperatur.

Man wird sich den Vorgang etwa folgendermaßen vorzustellen haben: durch die tektonischen Horizontalbewegungen wurden die Gesteine in die Form gebracht, welche eben diesen Bewegungen das geringste Hindernis entgegengesetzte — d. h. sie wurden geschiefert. Das war auch in großer Tiefe — so wenig wie in oberflächennahen Zonen — nicht möglich ohne Zertrümmerung, Streckung, Verbiegung etc. der einzelnen Gesteinselemente. Unter der Einwirkung des überall gegenwärtigen, bei der hohen Temperatur und dem hohen Druck der großen Tiefe ja gesteigert wirksamen Wassers als Lösungsmittel ging aber gleichzeitig die Umkristallisation einher; und gerade die mechanisch beanspruchten und damit leichter löslichen Mineralindividuen mußten ihr in erster Linie erliegen. Auch durch Verkleinerung des Kornes, Schaffung neuer Angriffsflächen mußte die mechanische Zertrümmerung der Umkristallisation zu Hilfe kommen; und die Ausbildung der Schieferung mußte die Zirkulation der Lösungen erleichtern¹. Aus diesen Gründen ist es verständlich, daß die mineralische Umwandlung nicht geschieferter — weil nicht differentiell durchbewegter — Gesteinspartien gelegentlich nicht so vollständig verlaufen ist wie die von benachbarten geschiefertem; aber in beiden hat die Um-

¹ Vgl. SANDER, a. a. O. 1914.

wandlung dieselbe Richtung eingeschlagen — standen sie doch unter den gleichen regionalen Temperatur- und Druckbedingungen.

Das Andauern der Kristallisationsphase über den Abschluß der Deformation hinaus wird man sich vielleicht in der Weise erklären dürfen, daß mit dem Erlöschen der tektonischen Horizontalbewegungen im allgemeinen keineswegs sofort eine wesentliche Änderung eben jener Temperatur- und Druckbedingungen gegeben sei — die von ihnen abhängige Kristallisation also noch nicht gleichzeitig mit jenen Bewegungsvorgängen zum Stillstand kommen mußte. Eine derartige Erklärung erscheint dem Verfasser wahrscheinlicher als die von SANDER angedeutete einer „mechanischen Erstarrung heftig durchbewegter kristalliner Schiefer anläßlich ihrer Kristallisation“; denn letztere Annahme steht doch wohl im Widerspruch mit der auch von dem nämlichen Forscher vielfach hervorgehobenen Bedeutung einer einmal vorhandenen Paralleltexur für weitere Differentialbewegungen. Es ist somit für die Metamorphose, wie sie z. B. die penninischen Decken der Alpen betroffen hat, die Bezeichnung Regionalmetamorphose wohl besser am Platz als Dislokations-(oder gar Dynamo-)Metamorphose — ungeachtet der in den meisten Fällen gleichfalls zu beobachtenden Spuren einer solchen. Denn ohne die Grundbedingung von jener: die Versenkung in tiefe Erdkrindenzonen, hätten auch die intensivsten tektonischen Bewegungen niemals zu einer gleichmäßigen Durchschieferung ganzer Gesteinskörper führen können; und auf die Ummineralisation waren sie höchstens von untergeordnetem Einfluß.

Die mannigfachen schwierigen Probleme der Beziehungen von Kristallisation und Schieferung konnten im Rahmen dieser Zeilen naturgemäß bloß angedeutet, keineswegs erschöpft werden. Was zur Erklärung der Erscheinungen gesagt werden konnte, soll nur einen ersten Versuch bedeuten. Als festgestellt aber dürfte die grundsätzliche gegenseitige Unabhängigkeit jener beiden Hauptmerkmale der kristallinen Schiefer gelten: mit ihr haben alle Erklärungsversuche dieser Gesteine als mit einer grundlegenden Tatsache zu rechnen¹.

¹ Erst nach Abschluß des Manuskripts des vorliegenden Aufsatzes kommt die neueste Arbeit von R. STAUB (Über Wesen, Alter und Ursachen der Gesteinsmetamorphosen in Graubünden. Vierteljahrsschr. naturf. Ges. Zürich. 65. 1920) in meine Hände, deren Ergebnisse sich, was die Auffassung der Metamorphose im penninischen Deckengebiet betrifft, z. T. sehr nahe mit den hier ausgesprochenen berühren.