

GESELLSCHAFT DEUTSCHER NATURFORSCHER UND ÄRZTE.

VERHANDLUNGEN 1909.

---

DIE  
ENTSTEHUNG DES KRISTALLINEN GEBIRGES.

VON

F. BECKE.

Sonderabdruck.

---

LEIPZIG

VERLAG VON F. C. W. VOGEL

1909.

**DIE**  
**ENTSTEHUNG DES KRISTALLINEN GEBIRGES.**

VON

**F. BECKE.**

Die Entstehung des kristallinen Gebirges (des Grundgebirges, der kristallinen Schiefer) ist eines der ältesten und schwierigsten Probleme der Geologie. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden auf jene Gesteine, die seit Alters her als kristalline Schiefer bezeichnet wurden, die mit den granitischen Tiefengesteinen die voll-kristallinische Struktur, mit den Sedimentgesteinen eine nur äußerlich ähnliche Erscheinungsform in Bänken und schichtenähnlichen Absonderungen gemein haben, die Methoden der mikroskopischen Gesteinsuntersuchung angewendet. Auf dem Gebiet der Massen- oder Erstarrungsgesteine haben diese Methoden einen ganz außerordentlichen Fortschritt herbeigeführt. Wenn nun ein Vertreter dieser Methode aufgefordert wurde, über die Entstehung der kristallinen Schiefer zu berichten, so darf er vielleicht den Wunsch der Versammlung voraussetzen, zu erfahren, welchen Fortschritt vor allem diese Methode dem Problem gebracht hat, ohne darum andere gleichberechtigte Gesichtspunkte ganz außer acht zu lassen; damit ist zugleich die Möglichkeit gegeben, das Thema so zu begrenzen, daß es im Rahmen eines Vortrages einigermaßen bewältigt werden kann.

Ich werde daher nur ganz kurz daran erinnern, daß man die weit verbreiteten Gesteine, die wir kristallinische Schiefer nennen, auf Grund geologischer Beobachtungen, d. h. von Beobachtungen über die Art des Auftretens, der Beteiligung dieser Gesteine am Aufbau der uns zugänglichen Erdkruste, in sehr verschiedener Weise gedeutet hat: So galten sie als erste Erstarrungskruste der Erde; oder als Absatz des ersten Urmeeres, dessen Beschaffenheit man sich sehr verschieden von den gegenwärtigen Meeren zu denken hatte. Der an manchen Stellen vermeintlich beobachtete allmähliche Übergang von Gneis in Glimmerschiefer, weiter in Phyllit, endlich in Tonschiefer mit den ältesten bekannten Versteinerungen wurde als Ausdruck der allmählichen Änderung des Urmeeres und seiner Annäherung an die jetzigen Zustände angesehen.

Neben diesen Ansichten bestand seit den ältesten Zeiten eine andere, welche in den kristallinen Schiefen keine ursprüngliche Bildung, sondern das Ergebnis einer Umwandlung einer Metamor-

phose erblickte, und diese Ansicht ist es, welche wohl gegenwärtig die meisten Anhänger findet.

Ganz außerordentlich gestützt wurde diese Annahme durch glückliche Fossilfunde. Wir kennen jetzt kristallinische Schiefer verschiedener geologischer Epochen: solche der Silur-, Devon-, Carbonzeit sind ganz sicher. Auch kristallinische Schiefer mit Versteinerungen der Juraformation sind anerkanntermaßen vorhanden, und wir würden heute auch bei dem Nachweis tertiärer kristallinischer Schiefer nicht mehr erschrecken.

Der schöne Traum des Urgebirges ist ausgeträumt, für uns sind die kristallinen Schiefer kein stratigraphischer Begriff mehr, wenn auch die Wahrscheinlichkeit, irgend ein Sedimentgestein im Zustand eines kristallinen Schiefers zu finden, um so größer ist, je größer das Alter der Ablagerung; aber das ist ja leicht begreiflich. Mit dieser Feststellung soll nicht in Abrede gestellt werden, daß es Ablagerungen und Gesteine gibt, die älter sind als die ältesten bekannten versteinерungsführenden Formationen; die Bemühungen finnischer und nordamerikanischer Forscher, eine Ordnung in diese präkambrischen Formationen zu bringen, sind vom geologischen Standpunkt sehr interessant und wichtig, tangieren aber weniger das hier zu behandelnde Problem.

Wurden so gewisse Glieder der Reihe der kristallinen Schiefer als umgewandelte Sedimente erkannt, so stellten sich andere Komplexe als Umwandlungsprodukte von Erstarrungsgesteinen heraus.

An dieser Erkenntnis sind viele Forscher beteiligt; am schärfsten wurde sie aber von ROSENBUSCH gefaßt, und seine Aufstellung von Ortho- und Paragesteinen (erstere die umgewandelten Erstarrungsgesteine, letztere die umgewandelten Absatzgesteine umfassend) war ein wichtiger Schritt nach vorwärts.

Die Unterscheidung beider Gruppen ist vor allem auf chemischem Wege möglich, wobei als Postulat angenommen wird, daß die Umwandlung den chemischen Bestand nicht bis zur Unkenntlichkeit verändert.

Die chemische Zusammensetzung der Erstarrungsgesteine, mögen sie nun als Laven an einem tätigen Vulkan vor unseren Augen aus dünnflüssigem Schmelzfluß erstarren, oder wie die Felsnadel des Mont Pelée in heißem starren Zustande hervorbrechen, oder, ohne die Erdoberfläche zu erreichen, im Innern der Erdrinde als Tiefengestein kristallisieren, unterliegt gewissen Gesetzmäßigkeiten, die in sehr verschiedener Form dargelegt werden können. Das Wesentliche daran ist, daß bei Betrachtung einer Reihe von zusammengehörigen Gesteinen dieser Art das Mengenverhältnis irgend eines der Hauptbestandteile sich nicht ändert, ohne daß zugleich andere Elemente, sei es parallele oder entgegengesetzte Änderungen erfahren.

Eine der mannigfaltigen Formen, in denen diese Gesetzmäßigkeit darzustellen versucht wurde, ist folgende<sup>1)</sup>: Von den 7 Elementen, die mit Sauerstoff verbunden in jedem der verbreiteten Erstarrungsgesteine der Erde vorkommen, ist das Silicium (Si) das wichtigste. Die Erstarrungsgesteine sind wesentlich Silikate. Die übrigen teilen wir in zwei Gruppen: Ca, Na, K, die Basen, die, vornehmlich in den Feldspaten vorkommend, bei deren Verwitterung in Lösung gebracht werden; dann Al, Fe, Mg, jene Basen, die dazu neigen, bei der Verwitterung der Gesteine schwer lösliche Verbindungen zu liefern (Al liefert Ton, Fe Eisenoxyd, Mg Serpentin, Talk, Chlorit und andere schwer lösliche Mg-Silikate).

Teilt man nun den chemischen Bestand eines Gesteins in die drei Teile: Si, lösliche Basen  $(Ca + Na + K) = L$ , unlösliche Basen  $(Al + Fe + Mg) = U$ , so kann man das Verhältnis Si:U:L den Punkten eines gleichseitigen Dreiecks zuordnen, derart, daß den drei Eckpunkten ein ausschließlicher Bestand aus Si oder L oder U entspricht, der Mitte gleicher Gehalt an den drei Gruppen usw., jedes Verhältnis Si:U:L durch einen Punkt des Dreiecks eindeutig dargestellt wird.

Macht man eine solche Konstruktion mit den Analysen von Erstarrungsgesteinen, so erfüllen die Analysenpunkte einen schmalen Streifen, der in der Nähe des Si-Pols an der Mittellinie anhebt und ungefähr im oberen Drittel der Linie Si-U endet. (Vgl. die schwarzen Punkte in umstehender Fig. 1.)

Die Analysenpunkte von Sedimentgesteinen zeigen ein solches gesetzmäßiges Verhalten nicht. Die Punkte liegen zerstreut über das ganze Feld. So würden reine Kalksteine in den Punkt L, Dolomite in die Mitte zwischen U und L, Tone rechts von dem Streifen der Erstarrungsgesteine zu liegen kommen. Sandsteine, Quarzite liegen nahe beim Si-Pol; Mergel können je nach dem Verhältnis zwischen Kalk und Ton an jeden beliebigen Punkt des Dreiecks fallen. Natürlich kann durch Zufall die Analyse eines Sediments auf den Streifen der Erstarrungsgesteine fallen. Aber in diesem Falle würde das Verhältnis der in L zusammengefaßten Elemente Ca, Na, K im Sediment ein anderes sein als beim Erstarrungsgestein und auch in diesem ungünstigen Fall Sediment und Erstarrungsgestein unterscheiden lassen.

Macht man nun diese Konstruktion mit den Analysen kristalliner Schiefer, so erkennt man, daß die Analysen gewisser Gesteinsreihen, wie z. B. die der mannigfaltigen Gesteine, die zum Zentralgneis der Hohen Tauern gehören, oder die der Amphibolite und Eklogite des Ötztals, oder die der Grünschiefer in der Schieferhülle der Tauerngneise, wie auch gewisser Talk- und Chloritschiefer in den Streifen

---

1) F. BECKE, Tschermaks Min. u. petr. Mitt. **21**, S. 230, 1902.

der Erstarrungsgesteine fallen. Sie verraten sich dadurch als Abkömmlinge ursprünglich magmatischer Erstarrungsgesteine.

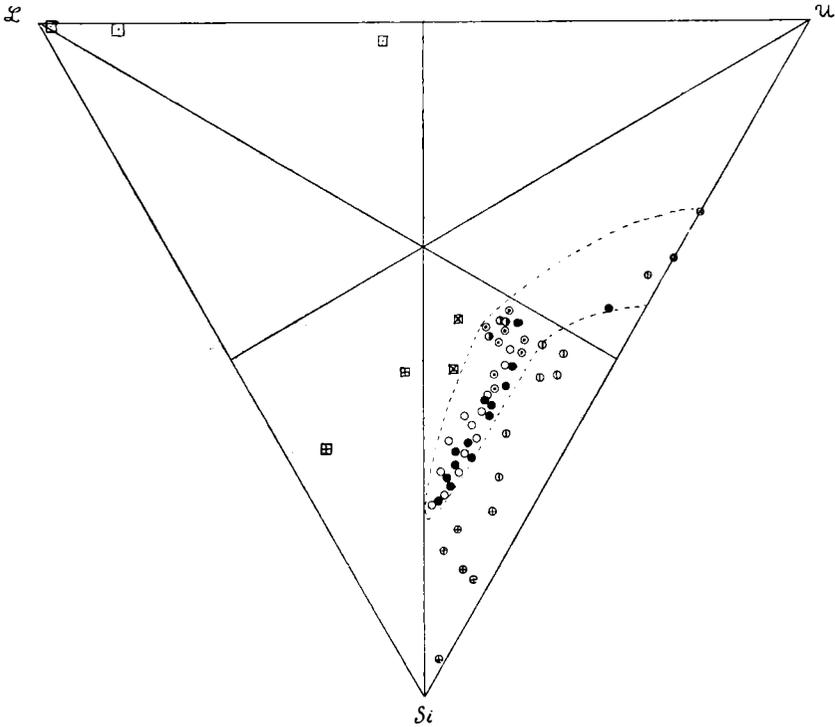


Fig. 1.

Andere Gesteine wiederum, wie die Glimmerschiefer, die Kalkglimmerschiefer, die Quarzite, fallen mit ihren Analysenpunkten neben die Eruptivschiefer. Sie verraten sich dadurch als Abkömmlinge von Sédimenten. (Vgl. die Erläuterung zu Fig. 1 S. 15.)

### Mineralbestand der kristallinen Schiefer.

Jene kristallinen Schiefer, die ihrer chemischen Zusammensetzung nach Sedimenten entsprechen, zeigen gemäß ihrem stofflichen Gehalt auch abweichende Mineralzusammensetzung. So sehen wir in einer Gruppe von kristallinen Schiefen, die durch Vorwalten der Tonerde ausgezeichnet sind, auch tonerdereiche Minerale auftreten, die den Erstarrungsgesteinen und ihren Abkömmlingen fehlen, wie z. B. die Minerale der Andalusitgruppe (Andalusit, Sillimanit, Disthen), Staurolith, tonerdereichen Granat, Sprödglimmer usw. Auch in einem großen Reichtum an Mineralen der Glimmer- und Chloritgruppe kann der

Überschuß des Tonerdegehaltes über das bei Erstarrungsgesteinen übliche Maß seinen Ausdruck finden.

Sehr Si-reiche Sedimente liefern Quarzit.

Kalkreiche Sedimente verraten sich durch das Auftreten von Kalksilikaten, wie Augit, Epidot, Kalkgranat, Hornblenden, wofern nicht die Carbonate, Kalkspat, Dolomit, als solche sich erhalten haben.

Wenden wir uns nun jenen Schiefen zu, die in ihrer Zusammensetzung den Erstarrungsgesteinen entsprechen.

Den kieselsäurereichen Graniten an einem Ende des Streifens in Fig. 1 entsprechen die Granitgneise, den kieselsäurearmen Gabbros, Diabasen am anderen Ende der Reihe die Amphibolite, Eklogite usw.; dazwischen die entsprechenden Übergänge. Interessant gestaltet sich nun der Vergleich des Mineralbestandes bei chemisch gleichen Gliedern der beiden Reihen. Bei den Si-reichen Gliedern sind die Unterschiede weniger auffallend, so daß man wohl öfter den Ausspruch hört, Gneis habe denselben Mineralbestand wie Granit, nur die Parallelstruktur bedinge den Unterschied.

Bei den Si-armen Gliedern der Reihe sind diese Unterschiede sehr auffallend. So besteht z. B. Diabas aus Labrador (50 Proz. Anorthit- und 50 Proz. Albitsubstanz enthaltend), Augit und Titaneisen, bisweilen auch Olivin. Der ihm in der Reihe der kristallinen Schiefer entsprechende Amphibolit aus: Hornblende, Andesin (etwa  $\frac{1}{3}$  Anorthit,  $\frac{2}{3}$  Albit enthaltend) und Titanit. In den Grünschiefern liegt dasselbe Substanzgemenge vor, bestehend aus Albit, Chlorit, Epidot, Titanit; das mineralogische Bild hat sich völlig geändert.

Verfolgt man den Unterschied in der Mineralzusammensetzung chemisch gleichartiger Erstarrungsgesteine und kristalliner Schiefer genauer, so ergibt sich eine in vielen Fällen stichhaltende Regel, die unter dem Namen Volumgesetz bekannt ist und dahin lautet, daß in den kristallinen Schiefen die Stoffe jenen Verbindungen zustreben, die das höchste spezifische Gewicht haben, also den kleinsten Raum beanspruchen. Daher die Neigung zur Bildung von Granat, von Epidot, von Titanit, die sich alle durch hohes spezifisches Gewicht auszeichnen, daher auch die Neigung, den Kalifeldspat durch den spezifisch schwereren Natronfeldspat (Albit) zu ersetzen, oder in die gleichfalls spezifisch schwereren Glimmer umzuwandeln.

An einer wichtigen Mineralgruppe, an den Plagioklasen, den isomorphen Mischungen von Natronfeldspat (Albit) und Kalkfeldspat (Anorthit), soll das noch etwas näher erläutert werden.

In den Erstarrungsgesteinen finden wir, je nach der wechselnden Zusammensetzung, die verschiedensten Glieder dieser Mischungsreihe. Von den Si-reichsten Graniten nimmt beim Fortschreiten gegen das Si-arme Ende der Anorthitgehalt der Plagioklasse zu. Gewöhnlich

lassen diese Plagioklase einen gesetzmäßigen Zonenbau erkennen, in dem der innerste Kern anorthitreicher ist und darauf anorthitärmere Schichten folgen, eine Erscheinung, die mit physikalisch-chemischen Gesetzen, die die Erstarrung isomorpher Gemische aus dem Schmelzfluß beherrschen, in vollkommenem Einklang steht.

Um das zur Anschauung zu bringen, denken wir uns auf das Dreieck SiUL (Fig. 1) in den Analysenpunkten Ordinaten errichtet und den Anorthitgehalt der Plagioklase des betreffenden Gesteins als

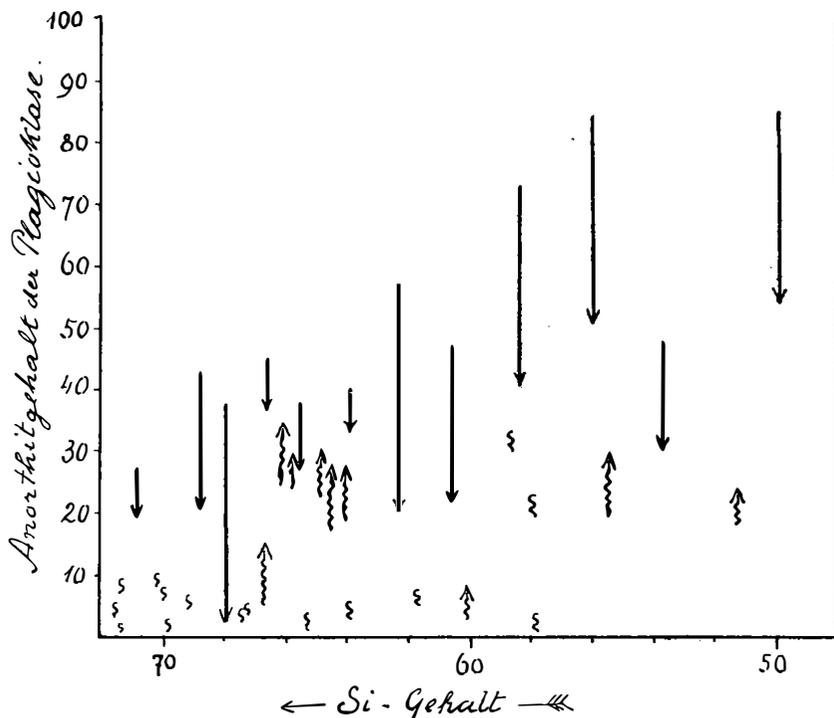


Fig. 2.

Ordinate aufgetragen. Das Ganze projizieren wir auf eine Vertikalenebene, die mit der durch Si gehenden Mittellinie des Dreiecks SiUL zusammenfällt. So erhalten wir Fig. 2. Das obere Ende der ausgezogenen Linien bedeutet den Anorthitgehalt im Kern, die nach unten gerichtete Pfeilspitze den Anorthitgehalt in der äußersten Zone der Plagioklase.

Macht man die gleiche Konstruktion mit kristallinen Schiefern (geschlängelte Linien in Fig. 2), so findet man, daß der Anorthitgehalt der Plagioklase der kristallinen Schiefer im Durchschnitt geringer ist als der der chemisch gleich zusammengesetzten Massengesteine. Ja, in vielen Fällen erweist sich selbst bei sehr kieselsäurearmen, dem

Diorit oder Gabbro entsprechenden Gesteinen der Plagioklas des kristallinen Schiefers als fast reiner Albit.

Bemerkenswert ist ferner, daß in den Fällen, wo Kern und Hülle unterscheidbar sind, häufig der Kern anorthitärmer, die Hülle anorthitreicher gefunden wird (aufwärts gerichtete Pfeile in Fig. 2).

Geht man der Sache nach, so zeigt sich, daß in der ausschließlich durch Albit charakterisierten Gruppe der kristallinen Schiefer Gemengteile mit einem merklichen Gehalt an Hydroxyl, wie Chlorit, Epidot, Glimmer (namentlich der feinschuppige helle Kaliglimmer oder Sericit), sodann auch Carbonate eine wesentliche Rolle spielen, während in der zweiten Gruppe, in der auch anorthitreichere Plagioklasmischungen auftreten, solche hydroxylreiche Minerale zurückstehen und wasserfreie oder wasserarme Minerale die Vorherrschaft erhalten. Statt des Chlorits und Sericits findet sich vielfach Biotit, statt Epidot Granat usw.

Aus diesen Erscheinungen darf man wohl den Schluß ziehen, daß die kristallinen Schiefer der letzteren Gruppe ihre Ausbildung in einer Zone höherer Temperatur erhalten haben, welche die Entstehung hydroxylhaltiger Minerale nicht zuließ. Eine solche Temperatur mag im allgemeinen einer tieferen Lage innerhalb der Erdkrinde entsprechen. Die Ausprägung der anderen Gruppe muß bei niedrigeren Temperaturen stattgefunden haben, die man in der Regel in den höheren, der Oberfläche näher liegenden Zonen der Erdkrinde finden wird.

Diese Unterscheidung von kristallinen Schiefen der unteren und der oberen Tiefenzone oder, wie man vielleicht noch zutreffender sagen könnte, der höheren und der niedrigeren Temperaturzone ist ihrer Natur nach nur in großen Zügen, kaum aber für ein einzelnes Gestein, viel eher für ganz große Gebiete möglich. Es liegt ferner in der Natur der Sache, daß zwischen den Extremen alle möglichen Übergänge vorkommen müssen.

Von den bekannteren Gebieten kristalliner Schiefer dürften der unteren Tiefenzone zufallen (also ausgezeichnet sein durch das gelegentliche Vorkommen kalkreicher Plagioklase, durch den Mangel hydroxylhaltiger Minerale, wie Chlorit, Sericit, Epidot) der westliche (moldanubische nach F. E. SUSS) Anteil des niederösterreichischen Waldviertels, das sächsische Granulitgebirge, das Erzgebirge, Schwarzwald, Odenwald; der oberen Tiefenzone: die moravische Zone (F. E. SUSS) des böhmisch-mährischen Gebirges und des niederösterreichischen Waldviertels, die östlichen Teile des Altwatergebirges, in den Alpen die Hohen Tauern, die jüngeren kristallinen Schiefer der Alpen überhaupt.

Natürlich kann es auch vorkommen, daß ein Komplex von kristallinen Schiefen in späterer Zeit unter den Verhältnissen der oberen Tiefenzone nochmals eine Metamorphose erfährt, die dann keine vorschreitende ist, wie die der Umwandlung von Tonschiefer in Phyllit,

Glimmerschiefer und Schiefergneis, sondern eine rückschreitende. Solche „Diaphthorite“ sind in der letzten Zeit in gewissen Teilen der Alpen nachgewiesen worden, in denen die mechanischen Einwirkungen auf ältere kristalline Schiefer besonders ausgiebig waren.

### Die Struktur der kristallinen Schiefer.

Zu bedeutungsvollen Ergebnissen hat das Studium der Struktur der kristallinen Schiefer geführt. Das augenfälligste Merkmal ist die Parallelstruktur, der sie den Namen Schiefer verdanken. Daß diese durch eine Druckwirkung zustande komme, wurde seit jeher angenommen. Die grundlegenden Beobachtungen, welche A. HEIM an den Gesteinen der Alpen, J. LEHMANN an den Gesteinen der sächsischen Granulitformation, REUSCH an norwegischen Gesteinen angestellt haben, ließen immer klarer erkennen, daß diese Parallelstruktur dem Gestein im festen Zustand aufgeprägt worden ist.

Nicht selten hat die mikroskopische Untersuchung die Spuren einer ungeheuren Pressung in der mechanischen Verbiegung, Zerreißung, Zertrümmerung der Gemengteile nachgewiesen. Diese Erscheinung führt den Namen Kataklase.

Die Kataklase ist aber nicht das eigentlich Entscheidende bei der Struktur der kristallinen Schiefer. Die typische Form der Parallelstruktur ist jene, die wir als Kristallisationsschieferung bezeichnen. Bei deren Vorhandensein zeigen die einzelnen Elemente keine Spur einer mechanischen Verletzung, wohl aber sind sie der Hauptsache nach parallel gestellt und in der Schieferungsebene mehr ausgedehnt als senkrecht dazu.

Minerale mit deutlicher Spaltbarkeit, also ausgeprägten molekularen Strukturflächen, wie Glimmer, Chlorit, Talk, Hornblende und ähnliche, nehmen dabei die Gestalt mehr oder weniger paralleler Schuppen, Tafeln und Nadeln an, deren größte Erstreckung parallel zur Schieferungsebene liegt. Es fehlt dabei nicht an Individuen, deren Spaltflächen normal oder nahe normal zur Schieferungsebene liegen. Aber diese sind im Wachstum zurückgeblieben, und ihre Form ist entstellt.

An Gesteinen, die reich sind an derartigen, wie man sagen könnte, schieferholden Mineralen, überträgt sich die Spaltbarkeit der parallel oder nahe parallel gestellten Täfelchen und Nadeln auf das ganze Gestein, und dieses erhält selbst die Eigenschaft, nach der Ebene der Parallelstruktur sich leicht teilen zu lassen.

Weniger schieferhold als die genannten Minerale sind schon Epidot, Augit, Feldspat; am wenigsten Granat, Quarz und Kalkspat.

Kristalline Schiefer, in denen die zuletzt genannten Minerale vorherrschen, zeigen daher keine gute Spaltbarkeit und heißen Schiefer

nur nach der Regel: *lucus a non lucendo*; z. B. die aus Granat und Augit bestehenden Eklogite, die körnigen Marmore, manche Quarzite. Die recht vollkommene Spaltbarkeit mancher Quarzite und der Kalkglimmerschiefer beruht ausschließlich auf der Beimengung einer geringen Menge von Glimmer.

Die Kristallisationsschieferung wird vielfach mit der Fluidalstruktur der Erstarrungsgesteine in Vergleich gesetzt, ja, manche Strukturen, die ich als Kristallisationsschieferung ansehe, werden von anderen Forschern als Fluidalstruktur gedeutet. Der Unterschied ist leicht anzugeben. Die Fluidalstruktur erzeugt nur mehr oder weniger parallele Stellung der Kristallindividuen gemäß der richtenden Kraft. Kristallisationsschieferung dagegen beeinflußt auch die Form der Kristalle je nach ihrer Stellung zu der richtenden Pressung. Fluidalstruktur kommt zustande durch Bewegung der ausgeschiedenen Kristalle im flüssigen Magma, Kristallisationsschieferung durch Wachsen der Kristalle in einem widerstrebenden festen — wenn auch gegenüber der Pressung eben durch die Fähigkeit zum Umkristallisieren nachgiebigen — Gestein.

Besonders lehrreich ist ein Vergleich mit der Struktur der Erstarrungsgesteine. Das Wesentliche dieser Struktur, das sich gewissermaßen als das Grundthema darstellt, über das die Natur die mannigfaltigsten Variationen komponiert, besteht darin, daß sich aus dem Verband der Mineralgemengteile immer eine zeitliche Reihenfolge der Bildung ablesen läßt. Immer zeigen sich gewisse Minerale älter als andere, noch andere jünger als alle übrigen. In den einfachsten Fällen verrät sich das durch die Ausbildung von Kristallformen. Je früher im Verlauf der Erstarrung ein Mineral aus der Schmelzlösung auskristallisiert, desto ungehemmter bringt es seine Kristallform zur Ausbildung. Je später es zur Erstarrung kommt, desto mehr wird der Raum durch ältere Kristalle beschränkt; die letzte Kristallisation kommt nur als Lückenbüßer zwischen den besseren Kristallen früherer Bildung zur Geltung. Auch das gegenseitige Umschließen erlaubt die Kristallisationsfolge abzulesen. Ein Mineral, das als Einschluß in einem zweiten vorkommt, muß älter als dieses sein.

In den kristallinen Schiefern ist von einer solchen Reihenfolge nichts zu bemerken. Vielmehr lehren die gegenseitigen Umschließungen, die Verbandverhältnisse überhaupt, daß alle Bestandteile gleichzeitig sich entwickelt haben.

Wenn es trotzdem zur Ausbildung von Kristallformen bei gewissen Bestandteilen der kristallinen Schiefer kommt, so ist das nur das Ergebnis eines Kampfes um den Raum, in welchem diese Minerale Sieger geblieben sind; sie besitzen etwas, was man als größere Kristallisationskraft bezeichnen möchte. Im allgemeinen sind es

wieder die dichtesten Minerale, die im Kampf um den Raum besser wegzukommen scheinen, und die mit sehr hohem spezifischen Gewicht ausgestatteten Minerale, wie Granat, Staurolith, Epidot, Magnetit u. a., sind es, die am öftesten ihre Kristallform erkennen lassen.

Dabei ist es sehr bezeichnend, daß Minerale mit einer ausgeprägten Spaltbarkeit zumeist von jenen Kristallflächen begrenzt sind, die den Spaltflächen parallel gehen. Die Glimmerminerale und ihre Verwandten sind es, welche hier das beste Beispiel abgeben.

Da nach der Molekulartheorie der Kristalle die Spaltflächen die am dichtesten mit Molekeln besetzten Molekularebenen der Kristalle sind, ist der Zusammenhang der zuletzt erwähnten Erscheinung mit der früheren leicht zu verstehen; sogar ein Zusammenhang mit dem Volumgesetz läßt sich herauslesen.

Andere wichtige Momente der Struktur kristallinischer Schiefer liegen noch in dem Mangel von blasigen Hohlformen, in der vollkommenen Kompaktheit des Gesteins, in dem etwa aufreißende Spalten sofort durch Neubildungen ausheilen. In der im Vergleich mit den Erstarrungsgesteinen seltener entwickelten Schichten- oder Zonenstruktur der Kristalle, welche, wenn sie dennoch entwickelt ist, häufig anderen Gesetzen folgt als bei jenen.

Diese Struktur der kristallinen Schiefer, welche sich mit der Entwicklung derselben im festen Gestein unschwer in Verknüpfung bringen läßt, wird als kristalloblastisch bezeichnet.

### Die Entstehung der kristallinen Schiefer.

Wir wenden uns nun der Frage zu: Welche Ursachen bedingen es, daß Sediment- oder Erstarrungsgesteine jene Umwandlung erfahren, die zu den eben nach Mineralbestand und Struktur charakterisierten kristallinen Schiefen hinführt?

Dies ist nun eine sehr schwierige Frage; wir verlassen damit den Boden sicher ermittelbarer Tatsachen und Feststellungen und begeben uns notwendigerweise auf den Weg der Spekulation.

Die Entstehung sedimentärer Gesteine können wir unmittelbar beobachten. Die Bildung der Erstarrungsgesteine vollzieht sich, wenigstens soweit vulkanische Laven und Verwandtes in Betracht kommen, vor unseren Augen. Manchen Fragen, die hier auftauchen, kann man durch das Experiment beikommen, und wichtige Resultate sind auf diesem Wege schon erzielt worden.

Für die kristallinen Schiefer liegt das alles anders und viel ungünstiger. Kein Beobachter hat je, noch wird je bei der Bildung eines kristallinen Schiefers zusehen können, denn sie vollzieht sich tief unter der Oberfläche im Inneren der Erdrinde. Und bisher ist es auch keinem Experimentator gelungen, etwas hervorzubringen, was

nach Mineralbestand und Struktur auch nur einigermaßen einem kristallinen Schiefer ähnlich wäre.

Aus der eigentümlichen Struktur ist die Mitwirkung eines gerichteten Druckes, einer Pressung bei der Entstehung der kristallinen Schiefer zu erschließen, und es lassen sich manche der charakteristischen Erscheinungen der sogenannten kristalloblastischen Struktur nach Analogie mit bekannten chemisch-physikalischen Sätzen verstehen, wenn man annimmt, daß während der Ausprägung des Gesteins ein gerichteter Druck auf die Masse eingewirkt habe.

Nach einem Satz von RIECKE wird der Schmelzpunkt eines mit seiner Schmelze in Berührung stehenden festen Körpers herabgesetzt, wenn der feste Körper mechanisch deformiert (gepreßt oder gedehnt) wird. In derselben Schmelze würde also ein gepreßter Körper abschmelzen, während ein daneben befindlicher ungepreßter gleicher Art wachsen würde.

Die weitgehende Ähnlichkeit zwischen Schmelze und Lösung gestattet es, diesen Satz nach Analogie auf einen Komplex von Mineralkörnern anzuwenden, deren Zwischenräume von einem Lösungsmittel erfüllt werden. Wird das Gebilde einer Pressung ausgesetzt, so würde sich an den gepreßten Stellen Substanz auflösen, und an den druckfreien Stellen würden die einzelnen Körner weiter wachsen. Durch ähnliche Vorgänge ließe sich vielleicht die Entstehung der Kristallisationschieferung verstehen.

Pressung, Faltung, Gebirgsdruck, tektonische Vorgänge usw. im Innern der Erdkruste werden somit das Umkristallisieren befördern. Es läßt sich auch verstehen, daß solche Vorgänge die Bildung von Verbindungen kleinsten Volumens, also das Stattfinden des Volumgesetzes begünstigen.

Aber diese Vorgänge allein werden niemals die Metamorphosen verursachen können. Denn wir finden sehr häufig Gesteine mit den deutlichsten Spuren von Faltung und Pressung, die weit davon entfernt sind, die Natur kristallinischer Schiefer anzunehmen.

Es müssen also noch andere Umstände hinzu kommen. Und ohne Zweifel ist die Einwirkung einer hohen Temperatur eine der wichtigsten, nächst dem Vorhandensein von Lösungsmitteln für die Mineralsubstanzen. Hohe Temperatur, Lösungsmittel in Gestalt von Wasserdampf und anderen Gasen sind eine stets anzunehmende Begleiterscheinung der aus den unbekanntem Tiefen in die Erdkruste eindringenden Erstarrungsgesteine. Treten noch ausgiebige Pressungen und Faltungen hinzu, so scheinen die Momente vereinigt, die zur Bildung kristalliner Schiefer führen können. In vielen Fällen geht die Einwirkung der magmatischen Intrusion noch weiter. Nicht nur Lösungsmittel und höhere Temperatur werden herbeigeführt, es findet auch eine stoffliche Beeinflussung des Nebengesteins statt. Die Glimmer-

schiefer sind alkalireicher als die Schiefertone, aus denen sie hervorgegangen sind. In den Grünschiefern der Hohen Tauern — um ein naheliegendes Beispiel heranzuziehen — beobachtet man eine deutliche Zunahme des Kaligehaltes und einen merklichen Gehalt an Biotit bei jenen Vorkommnissen, die dem Zentralgneis zunächst liegen.

In manchen Fällen läßt sich eine weitgehende körperliche Durchdringung des Nebengesteins durch das eindringende „Magma“ nachweisen, oft in der Form, daß zahlreiche Gänge und Adern magmatischer Abkunft zwischen die Lagen des Schiefers eindringen. Es entstehen dadurch die sogenannten Adergneise.

So, wie aber vor einer einseitigen Betonung der tektonischen Ursachen der Metamorphose zu warnen ist, darf man auch die Bedeutung der magmatischen Injektion nicht übertreiben. Wir haben gerade in letzter Zeit im niederösterreichischen Waldviertel vielfache Beweise dafür gefunden, daß diese Durchdringung durch granitisches Material keineswegs der abschließende Akt der Metamorphose war, daß solche Adern weiter verändert wurden, ja daß in vielen Fällen erst nach der Erstarrung jener Injektionen weitgehende Umformungen stattgefunden haben, so daß z. B. solche Aplitgänge im plastisch sich umformenden Marmor in Stücke zerbrochen und nicht nur an den ursprünglichen, durch die Intrusion entstandenen Flächen, sondern auch an den Bruchflächen der Sitz von Mineralneubildungen wurden, die man nur als Reaktion zwischen den stofflich verschiedenen Bestandteilen ansehen kann. Mein verehrter Freund und Kollege F. E. SUSS wird demnächst ausgezeichnete Beispiele dieser Art publizieren, und einer meiner Schüler, Herr Dr. F. REINHOLD, hat ähnliche Beobachtungen anstellen können. Von letzterem rührt auch die wichtige Beobachtung her, daß in bezug auf den Feldspatgehalt der Adern und des Nebengesteins in den feineren Abzweigungen des Geaders eine ganz auffällige Ausgleichung stattfindet, die nur durch einen gegenseitigen Stoffaustausch verstanden werden kann. Die magmatische Intrusion ist also ein gewiß in vielen Fällen wirksamer, aber nicht der allein wirksame Faktor der Metamorphose.

Man kann nun wohl die Frage aufstellen, ob magmatische Intrusion unter Mitwirkung gebirgsbildender Vorgänge bei jeder Metamorphose, bei jeder Entwicklung kristallinischer Schiefer anzunehmen sei. Viele Forscher glauben diese Frage bejahen zu müssen, und wenn die magmatische Intrusion durch Beobachtung nicht nachzuweisen ist, wird angenommen, daß sie unter der Oberfläche verborgen sei.

Ich für meinen Teil halte die Frage für eine offene und sehe keinen Grund ein, weshalb nicht in großen Strecken der Erdrinde auch durch andere Vorgänge, wie z. B. Bedeckung mit ungeheuren Mengen von Sedimenten in den Senkungsfeldern oder Geosynklinalen, oder durch die von der modernen Alpentektonik angenommenen Decken-

überschiebungen ebenfalls jene Verhältnisse erzeugt werden können, die die Metamorphose zu kristallinen Schiefen bewirken können. Das wäre also jener Fall der Bildung kristallinischer Schiefer, der als Regionalmetamorphose bezeichnet wird.

Ob man die eine oder andere wirksame Ursache annimmt, in allen Fällen können jene Unterschiede vorkommen, die in der Aufstellung der verschiedenen Tiefenzonen (besser vielleicht noch Temperaturzonen) ihren Ausdruck fanden. In allen Fällen kann ferner das Maß der mechanischen Einwirkung ein wechselndes sein, so daß das Gestein der mechanischen Einwirkung durch Umkristallisieren nicht zu folgen vermag; dann entstehen die auffallenden Biegungs- und Zerbrechungserscheinungen, die als Kataklaststruktur bezeichnet werden. Oder das Gestein vermag durch Umkristallisieren allen mechanischen Wirkungen nachzugeben, dann wird man nur an der Gestalt und Lage der Mineralkomponenten, an der Kristallisationsschieferung, die Druckwirkung erkennen.

Das Ineinanderspielen aller dieser Faktoren bedingt die ungeheure Mannigfaltigkeit der Erscheinungen, die im Anfang verwirrt, deren Ausdeutung für den Erfahrenen aber zum reizenden und anziehenden Problem wird.

#### Erläuterung zu Fig. 1.

In Fig. 1 sind die Analysenpunkte für eine Anzahl Gesteinsanalysen nach dem Verhältnis  $Si:U = Al + Fe + Mg: L = Ca + Na + K$  eingetragen. Die schwarzen Punkte beziehen sich auf Analysen von Erstarrungsgesteinen; verwendet wurden Analysen von Graniten, Tonaliten, Dioriten und zugehörigen Ganggesteinen aus dem Tonalitzug der Alpen (Rieserferner, Brixener Granit); hinzugefügt wurden noch die Analysen von zwei Olivinfelsen (Osann, Tiefengesteine Nr. 202 und 204). Der Streifen, welcher von Erstarrungsgesteinen gedeckt wird, ist durch die punktierte Linie eingeschlossen.

In dieses Gebiet fallen von Analysen kristallinischer Schiefer: Zentralgneis der Hohen Tauern nebst Zubehör ☉; Amphibolite und Eklogite des Ötztals ☉; Grünschiefer der Hohen Tauern ●; Talk- und Chloritschiefer ● (die letzteren Beispiele entnommen aus GRUBENMANN, Die kristallinen Schiefer II).

Außerhalb liegen gegen rechts: alpine Glimmerschiefer ☉; Quarzite ⊕; gegen links: Kalksilikatschiefer ⊗; Kalkglimmerschiefer ⊕; Marmore und Dolomitmarmore □. Die Beispiele für die letzten vier Gruppen sind aus GRUBENMANN, Die kristallinen Schiefer II entnommen.

#### Erläuterung zu Fig. 2.

Fig. 2 stellt dar den Zusammenhang zwischen dem chemischen Charakter des Gesteins und der Zusammensetzung der darin enthaltenen

Plagioklase. Der chemische Charakter des Gesteins hängt in erster Linie ab vom Si-Gehalt. Die Si-Atomzahl ist als Abszisse genommen. Als Ordinate der Anorthitgehalt der darin auftretenden Plagioklase. In den Erstarrungsgesteinen ist der Anorthitgehalt im allgemeinen größer (gerade Linien) als in den kristallinen Schiefen (geschlängelte Linien). In den Erstarrungsgesteinen ist der Kern anorthitreicher, die Hülle anorthitärmer (abwärts gerichtete Pfeile); in den kristallinen Schiefen ist entweder kein Unterschied zwischen Kern und Hülle (kurze Marken), oder der Unterschied ist doch im allgemeinen kleiner; in der Regel ist die Hülle anorthitreicher als der Kern (aufwärts gerichtete Pfeile).

Dargestellt sind von Erstarrungsgesteinen die Gesteine der Rieserferner und des Brixener Granitmassivs, zur Ergänzung einige Andesite (vgl. БЕККЕ, Tschermaks mineral-petrogr. Mitt., Bd. 22, S. 235), von kristallinen Schiefen vornehmlich Gesteine aus den Hohen Tauern und deren altkristallinischer Umgebung.