

Über das Verhältnis von Metamorphose und Tektonik in der penninischen Zone der Alpen

Autor(en): **Bearth, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen
= Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie**

Band (Jahr): **32 (1952)**

Heft 2

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-25831>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Über das Verhältnis von Metamorphose und Tektonik in der penninischen Zone der Alpen

Von *P. Bearth*, Basel

Die zentrale oder penninische Zone der Alpen unterscheidet sich bekanntlich durch den Charakter ihrer mesozoischen Sedimente in auffallender Weise von den Südalpen und der helvetischen Zone. Während die Trias in ihrer Entwicklung noch deutliche Beziehungen zum helvetischen und zum südalpinen Sedimentationsraum erkennen lässt, stellt sich vom Lias an aufwärts die sehr monotone Serie der Bündnerschiefer (*Schistes lustrés*) ein, die sich sowohl lithologisch wie stratigraphisch nur sehr schwer gliedern lässt. Mit dieser „geosynklinalen“ Serie erscheinen dann ausgedehnte und mächtige Ophiolithmassen, die besonders im süd- und mittelpenninischen Raum grosse Bedeutung erlangen.

Dieser mesozoische Gesteinsverband beherrscht die französischen und italienischen Alpen, das Wallis, Tessin und einen grossen Teil von Graubünden; auf der Linie Bergell-Prättigau verschwindet er unter den ostalpinen Decken, um weiter östlich, im Unterengadiner- und im Tauernfenster nochmals aufzutauchen. Vom Westalpenbogen bis in die Tauern hinein bleibt dabei der Charakter der Sedimente und der assoziierten Grüngesteine vollkommen erhalten. Bekanntlich wurde die frappante Analogie zwischen den Westalpen und den Tauern zuerst von *PIERRE TERMIER* erkannt. Diese Erkenntnis hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Deckentheorie ausgeübt; sie ist übrigens von Kennern beider Gebiete immer wieder bestätigt worden, so vor allem von *GB. DAL PIAZ* und *H. P. CORNELIUS*.

Aber die Analogie zwischen Westalpen und Tauern beschränkt sich nicht auf die stratigraphische und lithologische Entwicklung. Sowohl hier wie dort sind ja diese Serien metamorph! Die Verwandtschaft zwischen diesen beiden Gebieten wäre nicht so auffallend, wenn sie sich nicht auch auf den Charakter der Metamorphose erstrecken würde. Tatsächlich trennt diese die penninische Zone ebenso deutlich vom helvetischen und vom südalpinen Raum, wie dies durch die Eigenart ihrer mesozoischen Serien geschieht.

Im folgenden soll nun das Verhältnis dieser Metamorphose zur Tektonik untersucht werden, und zwar sowohl in räumlicher wie zeitlicher Beziehung. Die penninische Zone eignet sich für eine solche Untersuchung besonders gut, weil sie durch eine Reihe von geologisch-petrographischen Arbeiten relativ

gut bekannt ist. In Frankreich sind es vor allem P. TERMIER und E. RAGUIN — in neuester Zeit F. ELLENBERGER —, denen wir eine genauere Kenntnis der Metamorphose in den französischen Alpen verdanken. Für das Ostende der penninischen Zone, die Tauern, können wir auf die Arbeiten von FR. ANGEL, BR. SANDER und H. P. CORNELIUS verweisen, ferner auf die Bearbeitung des Südrandes des Tauernfensters durch Gb. Dal Piaz und A. Bianchi. Im übrigen stützen wir uns auf die ausgezeichneten Arbeiten der italienischen Geologen S. FRANCHI, A. STELLA, V. NOVARESE und Gb. DAL PIAZ (Gran Paradiso), von R. STAUB und H. P. CORNELIUS (für Graubünden) und auf eigene Beobachtungen im Wallis.

Wenn man die in den Arbeiten von Termier und Raguin ausgedrückten Ideen mit den Auffassungen von SANDER und CORNELIUS vergleicht, so ist man überrascht, dass sie in einem ganz wesentlichen Punkte — in dem der Beziehung zwischen Tektonik und Metamorphose — zu diametral entgegengesetzten Folgerungen gelangen. Während nämlich SANDER und CORNELIUS die Umprägung der ursprünglichen Sedimente und Eruptiva zu kristallinen Schiefen wenigstens zu einem grossen Teil mit der Durchbewegung während der Orogenese in Zusammenhang bringen, trennen TERMIER und RAGUIN grundsätzlich diese beiden Vorgänge; für sie hat wenigstens eine Seite der Metamorphose, nämlich die Umkristallisation, mit der Durchbewegung nichts zu schaffen.

„A partir du moment, où les charriages se sont déclenchés, les terrains ont été soustraits à la cause qui provoquait leur métamorphisme“, schreibt RAGUIN. Und die gleiche Ansicht fasste schon P. TERMIER in die knappe Sentenz: „Le métamorphisme général est antérieur au plissement définitif; il a pris naissance dans la phase préparatoire de ce plissement“.

Nach Ansicht der französischen Forscher haben die mesozoischen Gesteine durch die alpidische Faltung nur nachkristalline Deformationen — also Kataklase und Mylonitisierung — erfahren; ihre Um- und Neukristallisation erfolgte unter statischen Bedingungen, und zwar vor der Faltung.

In einem Punkte begegnen sich nun allerdings diese Ansichten mit den Ideen der Tauerngeologen. Beide betrachten die Metamorphose als eine Funktion der Tiefe, genauer ausgedrückt, der mit der Tiefe zunehmenden Temperatur und Belastung. Für RAGUIN ist dabei die ursprüngliche Mächtigkeit der ungefalteten Sedimente und Ophiolithe ausschlaggebend, welche in Savoyen auf einige tausend Meter geschätzt wird, während CORNELIUS mit der erheblich grösseren Mächtigkeit rechnet, die in Verbindung und als Folge des Zusammenschubes während der Orogenese entstand. Eine logische Folge ergibt sich aus beiden Annahmen: Es muss im penninischen Raum eine Zunahme der Metamorphose von oben nach unten erfolgen. Nach CORNELIUS u. a. drückt sich darin ein Zusammenhang zwischen Tektonik und Metamorphose aus, während diese Zunahme nach Termier und Raguin eine Folge der normalen Überdeckung vor der Faltung war. (TERMIER fügt allerdings als weiteren Faktor noch die Einwirkung leichtflüchtiger Bestandteile, seiner „agents minéralisateurs“ hinzu, auf welche wir weiter unten zurückkommen.)

Man könnte der Idee TERMIERS und RAGUINS einer rein statischen Belastungsmetamorphose entgegenhalten, dass in den Südalpen und selbst im Helvetikum die Sedimente an Mächtigkeit denjenigen des Penninikums nicht

nur gleichkommen, sondern sie sogar übertreffen, ohne dass hier eine Spur von Metamorphose festzustellen ist. Und im Wallis ebenso wie in Graubünden zeigt sich eine Steigerung der Metamorphose innerhalb der penninischen Zone, wenn man von Norden nach Süden geht, obwohl die Sedimente ihre grösste Mächtigkeit im Norden erreichen. Prinzipiell aber müssen wir den Gedanken, dass bei hinreichender Belastung eine Umprägung der Gesteine erfolgen kann, durchaus bejahen. Es stellt sich nur die Frage, bei welcher Tiefe unter statischen Bedingungen Veränderungen im Gefüge und Mineralbestand eines Gesteines bemerkbar werden. Für ein chemisch so empfindliches Sediment wie die Kohle lassen sich solche Veränderungen leicht nachweisen. Anders liegen die Verhältnisse aber bei silikatischen und z. T. auch karbonatischen Gesteinen. Selbst in so komplexen Systemen mit grosser innerer Oberfläche, wie den tonigen Sedimenten, lassen sich kaum mit Sicherheit Anzeichen von Metamorphose nachweisen, die auf reine Belastung zurückgeführt werden können, selbst dann nicht, wenn die Überdeckung viele tausende von Metern betrug. Wo ursprünglich eine reine Belastungsmetamorphose postuliert worden war, hat sich diese Annahme meistens als Täuschung erwiesen. Darunter befinden sich aber Serien, die zwischen 10 und 20 km Sedimente umfassen, also ein Mehrfaches der Gesamtmächtigkeit der mesozoischen Serien der Westalpen, ja sogar erheblich mehr, als CORNELIUS über der Basis der „oberen Schieferhülle“ in den Tauern nach erfolgtem Zusammenschub annimmt.

Nach den heutigen Erfahrungen erscheint es somit ausgeschlossen, dass die von TERMIER und RAGUIN vertretene These einer statischen Belastungsmetamorphose die Erscheinungen zu erklären vermag, die in der penninischen Zone beobachtet werden können. Tatsächlich genügt es, das zeitliche Verhältnis der Kristallisation zur Bewegung genauer zu betrachten, um zu erkennen, dass diese Auffassung nicht haltbar ist.

Nach RAGUIN lassen sich in den französischen Alpen zwei (alpidische) Bewegungsphasen unterscheiden, von denen die erste weitreichende Überschiebungen, Verschuppungen und Falten grossen Stiles erzeugte, während die jüngere Phase vor allem eine leicht feststellbare Kleinfaltung (und Mylonitisierung) erzeugte. Die Ansicht, dass die Metamorphose schon vor der Gebirgsbildung erfolgte, stützt sich nun in erster Linie auf die Tatsache, dass in den französischen Alpen die höher liegende Decke (Nappe des schistes lustrés) auch eine höhere Metamorphose aufweist, als die von ihr überschobene Einheit des Briançonnais. Durch die Hauptüberschiebung wäre somit die ursprünglich tiefer liegende Einheit (mit höherer Metamorphose) auf das im Westen vorgelagerte, weniger metamorphe Element des Briançonnais hinaufgeschoben worden.

Natürlich sind diese Bewegungen an den betroffenen Gesteinen nicht spurlos vorübergegangen. Nach RAGUIN beschränkt sich diese Wirkung aber auf Mylonitisierung, hauptsächlich an der Basis der Überschiebungsmasse, während der vortektonisch kristallisierte Hauptteil der Gesteine überhaupt intakt geblieben wäre.

Merkwürdigerweise erwähnt aber RAGUIN selbst einige Fälle, aus denen hervorgeht, dass Neukristallisationen die Überschiebung überdauern haben; z. B. Stoffaustausch zwischen Ophiolithen und der darunterliegenden Trias, mit der die Ophiolithe erst durch die Überschiebung in Kontakt geraten sein

können. Wenigstens lokal müssen also noch nachtektonisch Kristallisationen möglich gewesen sein. Nach den Untersuchungen von ELLENBERGER erscheinen die Unterschiede in der Metamorphose überhaupt sehr viel geringer, als dies von TERMIER und RAGUIN angenommen wurde. Die Metamorphose nimmt überdies — was schon TERMIER festgestellt hatte — in der Nappe des schistes lustrés sowohl wie im liegenden Briançonnais von Westen nach Osten zu und die Zonen gleicher Metamorphose schneiden die Überschiebungsfläche unter einem rechten Winkel (ELLENBERGER). Das alles ist nur verständlich, wenn die gegenwärtigen tektonischen Verhältnisse schon während der Hauptmetamorphose bestanden haben.

Damit aber nähert sich der Standpunkt der jüngsten französischen Forschung demjenigen der Tauerngeologen, der sich wiederum mit den Erfahrungen deckt, die wir selbst im Wallis machen konnten. Die Verhältnisse scheinen mir dabei im Wallis, im Bereich der Monte Rosa-Bernhard-Decke, in mehr als einer Hinsicht einfacher zu sein als in den Tauern; sie sind gerade deshalb geeignet, neues Licht auf einige Probleme der penninischen Zone zu werfen.

Ähnlich wie in den französischen Alpen lassen sich auch im Wallis mehrere alpidische Bewegungsphasen unterscheiden. Die erste (älteste!) Phase bewirkte weitgehende Überschiebungen, Faltung grossen Stiles, und eine intensive Verschuppung sowohl mesozoischer Elemente unter sich als auch derselben mit älterem, prätriadischem Kristallin. Die Gleitflächen verliefen sowohl innerhalb wie ausserhalb dieses Kristallins. Soweit sich dies noch rekonstruieren lässt, wirkten diese ersten Bewegungen hauptsächlich destruktiv — Gefügenderstörend. Kristallisationsvorgänge scheinen keine grosse Rolle gespielt zu haben.

Eine spätere Phase bewirkte dann eine Verbiegung der ursprünglich flachen Bewegungsbahnen sowie eine intensive Kleinfältelung und differenzielle Durchbewegung z. T. mächtiger Komplexe. (Inwieweit diese zweite Phase zeitlich von der ersten getrennt war oder einfach eine konsequente Weiterentwicklung der ersten darstellt, bleibe dahingestellt.) Die durch sie bewirkte Kleinfältelung ist jedenfalls nicht nur im Handstück, sondern auch im mikroskopischen Bereich noch feststellbar. Sie ist (zusammen mit anderen linearen Elementen) im Gelände leicht einmessbar und ergibt ein System paralleler Achsen, welches mit erstaunlicher Konstanz über den ganzen Bereich der deformierten Serien streicht. Diese Fältelung bildet aber auch ein zeitliches Koordinatensystem, auf welches die Kristallisationsvorgänge im Gestein bezogen werden können. Es zeigt sich, dass — mit ganz wenigen Ausnahmen — die Kristallisation mit der Faltung zum Teil Hand in Hand ging, zu einem ganz wesentlichen Teil diese aber überdauert haben muss.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Feststellungen der meisten Tauerngeologen (SANDER, CORNELIUS, DAL PIAZ etc.). Dabei sind aber sowohl in den Tauern wie im Wallis noch späte, postkristalline Nachläufer der Hauptbewegungen zu verzeichnen, die aber nirgends über lokale Bedeutung hinauskommen. Im Wallis ist die jüngste Bewegungsphase durch steilstehende Brüche gekennzeichnet, die wohl mit isostatischen Ausgleichsbewegungen in Zusammenhang zu bringen sind. Sie treten z. T. morphologisch sehr stark hervor, waren aber nicht im Stande, die während der Hauptbewegung und Metamorphose geprägten Strukturen zu zerstören. So ist z. B. die Mischabelrück-

falte von mehreren Bruchflächen durchsetzt, ohne dass dadurch der kontinuierliche Verlauf der intrakristallin verfolgbaren Umbiegung gestört würde*).

Es lassen sich somit im Wallis mehrere Bewegungsphasen auseinanderhalten, die jede im Gestein ihre Spuren hinterlassen hat. Diese Zerlegung einer Orogenese in verschiedene Bewegungsphasen erscheint uns heute ganz selbstverständlich — weniger selbstverständlich ist aber offenbar die Vorstellung, dass diesen verschiedenen Phasen auch verschiedene Metamorphosen entsprechen können. Dabei ist zu beachten, dass die jüngeren Metamorphosen eine ältere Überprägung nicht unbedingt verwischen müssen. Tatsächlich zeigt auch eine genauere Analyse der nur alpidisch überprägten mesozoischen Serien, dass hier ein polymetamorpher Komplex vorliegt. Isochemische Gesteine erscheinen in verschiedener Mineralfazies. So treten Gesteine gabbroider Zusammensetzung z. T. als Eklogit amphibolite, z. T. als Glaukophanschiefer oder auch als Zoisit-Albit-Chloritschiefer auf, wobei die Mineralparagenesen sich zeitlich in der genannten Reihenfolge ablösen.

Analoge Beobachtungen sind in den Tauern gemacht worden, wo sie zu verschiedenen Interpretationen Anlass gegeben haben. CORNELIUS spricht in diesem Zusammenhang von einem Pendeln der Metamorphose um eine Gleichgewichtslage. Die oben erwähnte und auch andere Beziehungen deuten daneben aber auch auf eine Entwicklung der Metamorphose in einer bestimmten Richtung hin. Sie zeigen eine allmähliche Verschiebung der physikalisch-chemischen Verhältnisse während der Orogenese an, und zwar von meso- zu epimetamorphen Bedingungen.

So bieten schon allein die mesozoischen Serien ein wechselvolles Bild der Metamorphose, bedingt teils durch stoffliche Unterschiede, teils durch verschiedenes tektonisches Schicksal ihrer einzelnen Elemente. Dieses Bild wird nun noch wesentlich komplizierter, wenn wir auch noch das Altkristallin, das ja in einem sehr bedeutenden Umfange am Aufbau der penninischen Zone beteiligt ist, in den Kreis unserer Betrachtung einbeziehen. Wir haben es dann nicht nur mit alpidischen Bewegungen (und Metamorphosen!) zu tun, sondern mit Material, das schon vor der Alpenfaltung als (polymetamorpher!) Gebirgskomplex vorlag. Wir stehen dann vor der gewiss nicht einfachen Aufgabe, den Anteil der älteren Metamorphosen von demjenigen der alpidischen Umprägung zu trennen.

Diese Aufgabe ist nur lösbar mit Hilfe sorgfältiger, über grosse Bereiche sich erstreckender struktureller und mineralfazieller Untersuchungen. Ihre Lösung bildet aber die Voraussetzung für brauchbare Aussagen über den Gang der alpidischen Metamorphose, unter anderem auch für den zunächst aussichtslos scheinenden Versuch, in den Alpen Zonen gleicher Metamorphose auszuscheiden.

Im Wallis wird diese Analyse wesentlich erleichtert durch die massenhaft auftretenden Granite. Es zeigt sich, dass diese ausschliesslich die alpidische

*) Siehe M. F. HERMANN. Comptes rendus des séances de l'Acad. des Sciences. 1951. Bd. 232, 642—644, 859—862, und Bd. 233, 1468—1470. HERMANN stützt sich bei seiner Theorie der éclats tectoniques der Mischabel allerdings nicht nur auf die oben erwähnten Bruchflächen, sondern hauptsächlich auf die Klüftung und auf andere morphologisch auffallende, tektonisch aber belanglose Flächen.

Umprägung erfahren haben, dass sie aber in ein schon polymetamorphes Grundgebirge eingedrungen sind, das dann während der Alpenfaltung mitsamt den Graniten z. T. umgeprägt worden ist, z. T. aber als Relikt stehen geblieben ist.

Infolgedessen liegen hier alt- und jungmetamorphe Elemente abwechselnd über- und untereinander oder lösen sich im Streichen einer Zone mehrfach ab. Dabei zeigen sich in den prägranitischen Relikten nicht nur andere Strukturen, sondern auch gegenüber den alpidischen Elementen abweichende Metamorphose. Der grösste Teil des alten Komplexes zeigt Kata-Paragenesen. Auf gewissen prägranitischen Bewegungszonen sind die hier sehr verbreiteten Sillimanit-Kalifeldspat-Biotitgneise z. T. nachträglich noch in Granat-(Sericit-)Muscowitschiefer umgewandelt worden. So lassen sich im prägranitischen Kristallin allein schon wenigstens zwei Metamorphosen unterscheiden.

Die Trennung der jüngeren (alpidischen!) von diesen älteren Metamorphosen stösst z. T. auf erhebliche Schwierigkeiten, von denen hier nur die wichtigsten erwähnt werden sollen.

Ein grosses Hindernis für eine klare Unterscheidung bilden die tektonisch bedingten Übergänge. Die ursprünglichen Kontakte sind infolge der Durchbewegung verschliffen worden und täuschen heute eine lückenlose, konkordante Serie vor, die z. T. vom Paläozoikum bis in die Bündnerschiefer hinaufzureichen scheint. Sie hat Argand zur Annahme einer Série compréhensive geführt, und damit auch zur Ablehnung einer hereynischen Diskordanz in diesen Gebieten.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus den verschiedenen Möglichkeiten von Konvergenzen, bedingt durch die sich folgenden Metamorphosen. Zunächst muss mit der Möglichkeit gerechnet werden, dass die gleiche Mineralfazies, die durch die alpidische Metamorphose geprägt worden ist, auch schon in älteren Metamorphosen auftreten kann. Ferner ergibt sich, dass alpidisch umgeprägte, isochemische Gesteine dieselben Mineralparagenesen aufweisen, ganz gleichgültig, ob sie mesozoisch, paläozoisch oder noch älter sind und auch unabhängig davon, ob schon eine ältere Metamorphose über sie hinweggegangen ist oder nicht. So erscheinen beispielsweise Amphibolite des Altkristallins in genau der gleichen (Prasinit-) Fazies, wie gewisse Glieder der (mesozoischen) Ophiolith-Serie. Dort, wo zwei solche Metamorphite miteinander in tektonischen Kontakt geraten, wird ihre Trennung sehr erschwert, vielleicht sogar unmöglich gemacht.

Erst wenn die alpidische Umprägung von diesem „Beiwerk“ befreit und für sich allein betrachtet werden kann, wird man mit Aussicht auf Erfolg an die Analyse dieser Metamorphose und an die Frage ihrer Beziehung zur Tektonik herangehen können. Heute sind wir von diesem Ziel noch sehr weit entfernt: immerhin ergeben sich aus der Analyse der Tauern oder des Monte Rosa schon einige wertvolle Hinweise.

Zunächst erhebt sich die Frage: Ist eine Zunahme der Metamorphose mit der Tiefe festzustellen? Für den gesamten Deckenbau (Oberostalpin bis Unterpenninisch) ist diese Frage zweifellos zu bejahen. Diese Zunahme erfolgt aber doch sehr langsam. So konnte festgestellt werden, dass in der Monte Rosa-Teil-Decke ein Vertikalabstand von 5000 m keine merkliche Änderung des

Mineralbestandes oder der Korngrösse bewirkte. Ähnliches berichtet CORNELIUS aus den Tauern. Die Empfindlichkeit gegenüber Niveaudifferenzen ist äusserst gering und jedenfalls nicht ausreichend, um gewisse Unterschiede der Metamorphose innerhalb einer Decke (z. B. der Bernhard-Teil-Decke), auf axiale Kulminationen und Depressionen zurückzuführen.

Neben den vertikalen Veränderungen darf man aber auch die lateralen nicht vergessen. Ganz allgemein beobachtet man eine Zunahme der Metamorphose, wenn man eine Decke von der Stirnpartie zur Wurzel — vom Aussen- zum Innenbogen — durchläuft und zwar in Savoyen so gut wie in Graubünden oder im Wallis. Aber auch hier ist es unerlässlich, dass klar zwischen alten und jungen Metamorphosen unterschieden wird. Der ausschliesslich alpidische Anteil kann an den mesozoischen Serien abgelesen werden, die ja keine andere als eben diese Umprägung erfahren haben. Im Wallis zeigen die frontalen mesozoischen Elemente eine wesentlich geringere Umprägung als die entsprechenden Serien im Gebiete von Zermatt, obwohl die Durchbewegung (Faltung und Zerschering) gerade im Rhonetal ausserordentlich intensiv war.

Für das prätriadische Kristallin fehlen hier leider noch die erforderlichen Unterlagen, um den alpidischen vom präalpidischen Anteil der Metamorphose trennen zu können. Es ist ja keineswegs a priori sicher, dass die heute feststellbare Metamorphose ausschliesslich alpidisch ist, ebenso falsch aber wäre die Annahme, dass die prätriadisch schon metamorphen Serien die Alpenfaltung ohne weitere Veränderungen überstanden haben.

Trotzdem uns gegenwärtig die Grundlage für eine zuverlässige und umfassende Analyse noch fehlt, lässt sich doch schon erkennen, dass die präalpidische Metamorphose des Altkristallins im Rhonetal einen anderen Charakter gehabt haben muss als weiter im Süden. Die sicher erkennbaren karbonischen und permischen Ablagerungen sind wahrscheinlich voralpidisch überhaupt nie umgeprägt worden, jedenfalls gelangte hier eine eventuelle späthercynische Phase nicht über das phyllitische Stadium hinaus. Mit diesen Serien sind aber andere verschuppt und verfaltet, die schon voralpidisch eine vollständige Umprägung erfahren haben müssen, die aber ebenfalls nie, wie z. B. im Monte Rosa-Gebiet, bis zu meso- oder gar katametamorphen Paragenesen gediehen war. Der deutlich erkennbare Sprung zwischen der Metamorphose jungpaläozoischer und älterer Serien deutet trotz der heute durchgehenden konkordanten Lagerung auf eine frühere (hercynische!) Diskordanz hin. Weiterhin zeigt der Gegensatz zwischen den katametamorphen präalpidischen Schieferserien des Monte Rosa und den epimetamorphen des Rhonetals, dass auch die präalpidische Metamorphose, roh gesprochen, von Norden nach Süden eine Steigerung erfährt. Diese Steigerung ist wahrscheinlich so zu deuten, dass die schon präalpidisch relativ schwach metamorphen Schiefermassen vom Untergrund abgeschert und durch die Alpenfaltung nach Norden verfrachtet worden sind, wo sie nun die tektonisch sehr komplexe Stirnpartie der Bernhard-Teildecke aufbauen.

So sehr hier noch manches der weiteren Abklärung bedarf, so scheint doch festzustehen, dass in diesen nördlichen Stirnpartien die älteren und jüngeren (alpidischen) Metamorphosen nur relativ wenig voneinander abweichen, während sie im Süden (Monte Rosa) sehr stark divergieren.

Richten wir nun unser Augenmerk nochmals ausschliesslich auf die alpidische Metamorphose, über deren Ursachen aus rein geologischen Beobachtungen ebenfalls einiges gesagt werden kann.

Zunächst zeigt sich, dass die Metamorphose ganz eng an Bewegungsvorgänge gebunden ist. Alpidisch nicht durchbewegte Elemente, z. B. ein Teil der Granite und Gabbros, haben sowohl ihre Struktur wie auch ihren ursprünglichen Mineralbestand bewahrt. Derartige Relikte lassen deutlich erkennen, dass eine rein statische Metamorphose unter den vor und während der Orogenese herrschenden Verhältnissen nicht möglich war. Differentielle Durchbewegung bildet eine notwendige Voraussetzung für die im penninischen Raum beobachtete Metamorphose. Je intensiver diese Durchbewegung war, desto vollständiger ist auch die Umprägung. In diesem Sinne ist nicht etwa die Wurzelregion der Monte Rosa-Bernhard-Decke am stärksten metamorph, sondern das viel intensiver durchbewegte Mittelstück der Decke.

Die Durchbewegung allein macht aber noch nicht die Metamorphose aus, die ja auf grosse Strecken mit Um- und Neukristallisationen verbunden ist. Vielfach fehlt nämlich stark durchbewegten Elementen jedes Anzeichen kristalloblastischer Neubildungen. Überdies darf man nicht übersehen, dass auch ausserhalb der penninischen Zone Bewegungen (auch solche differentieller Art) erfolgten, ohne dass diese in nennenswertem Umfange von Kristallisation begleitet waren.

Die eigentliche Ursache für die Metamorphose wird man also nicht in der Durchbewegung suchen müssen, sondern in einem allgemeinen Anstieg der Geoisothermen innerhalb der penninischen Zone. Im Laufe der Orogenese bildeten sich hier solche Verhältnisse heraus, dass überall die Möglichkeit einer Umwandlung latent vorhanden war, aber nur dort wirklich erfolgen konnte, wo die Durchbewegung das Material hinreichend reaktionsfähig machte.

Man kann sich nun fragen, ob der für die Umsetzungen erforderliche Temperaturanstieg durch die beim Zusammenschub entstandene Überdeckung genügend erklärt werden kann. CORNELIUS schätzt diese Überdeckung in den Tauern auf 8 bis 10 km (von der Basis der Oberen Schieferhülle an gerechnet). Von derselben Grössenordnung mag die Überdeckung der Monte Rosa-Bernhard-Decke gewesen sein. Bei einer geothermischen Tiefenstufe von 25 m ergibt das eine Temperatur von 300—400° C. Das mag hinreichend sein, um die während der Durchbewegung im Gestein sich abwickelnden Vorgänge zu verstehen.

Allein blosse Temperatur-Zunahme während der Orogenese vermag nicht zu erklären, wieso ein ganz wesentlicher Teil der Kristallisation die Durchbewegung überdauert hat, und zwar nicht nur im Wallis, sondern auch in den Tauern und anderwärts. Chlorit, Biotit, aktinolithische Hornblende, Glaukophan, vor allem aber der Albit, sind zum grossen Teil nachkinematisch erst entstanden. Innerhalb der Ophiolithzone von Zermatt-Saas Fee haben sogar ganze Gesteinskomplexe erst nach der Durchbewegung Struktur und den gegenwärtigen Mineralbestand erhalten. Das deutet einerseits darauf hin, dass die Faktoren, welche die Metamorphose ermöglichten, also vor allem erhöhte Temperatur, die Durchbewegung noch längere Zeit überdauert haben. Wahrscheinlich erreichte die Temperatur ihren Höchstwert sogar erst, als die Bewegungen schon im Abklingen waren.

Aber andererseits sind nun die Relikte präalpidischer Serien in den Endphasen der Orogenese genau denselben Temperatur- und Druckbedingungen ausgesetzt gewesen, wie die postkristallin nicht mehr durchbewegten Tektonite. Wenn nun in diesen noch Neukristallisationen möglich waren, warum nicht auch in den Relikten?

Der Umstand, dass diese tatsächlich unverändert erhalten blieben, deutet darauf hin, dass regionale Temperaturerhöhung und Durchbewegung weder jedes für sich, noch zusammengenommen im Stande sind, das restlos zu erklären, was sich in den metamorphen Zonen abgespielt hat. Es müssen auf diesen Zonen zum Teil andere physikalisch-chemische Verhältnisse geherrscht haben, als in den unmittelbar benachbarten, nicht tektonisierten Elementen.

Welcher Art diese Besonderheiten waren, lässt u. a. die Metamorphose der Granite erkennen. Diese sind auf Bewegungszonen nicht selten in Disthenführende Muscovitschiefer umgewandelt worden, also in Gesteine mit deutlichem Tonerdeüberschuss. Die gesamte Feldspatsubstanz ist zerstört worden, wobei die Alkalien — vor allem Natron — aber auch Kali — abwanderten. Der Stofftransport erfolgte dabei ausschliesslich durch Lösungen. Das ist nun keineswegs der einzige Fall, der die Gegenwart von Lösungen auf den Bewegungshorizonten anzeigt. Regionale Verbreitung müssen innerhalb der penninischen Zone vor allem natronhaltige Lösungen gehabt haben, die zu einer sehr verbreiteten nachtektonischen Albitisierung sowohl mesozoischer als auch älterer Serien führten. Diese Lösungen brachten den tektonisierten Elementen nicht nur Substanz oder führten sie weg, sie brachten auch Wärme.

Metasomatische Vorgänge grossen Stiles, bedingt durch das Einwandern von Lösungen während der Orogenese, sind für die penninische Zone nicht weniger charakteristisch, als etwa die „geosynklinale“ Sedimentation.

Damit wären wir aber wieder bei P. TERMIER angelangt, der stets den „agents minéralisateurs“ eine wesentliche Rolle in der Metamorphose zugewiesen hatte. Diese „agents minéralisateurs“ existieren wirklich, aber sie waren nicht vor, sondern während und nach der Orogenese wirksam.

Die grosse Verbreitung metasomatischer Prozesse möchten wir nun mit dem Aufstieg einer Migmatitfront längs der ganzen zentralen Zone der Alpen in Zusammenhang bringen. Während dieser Aufstieg sich im grössten Teil des Penninikums nur in Fernwirkungen wie Temperaturanstieg, Albitisierung u. a. bemerkbar machte, führte er in der Wurzelzone des Tessins zu einer viel intensiveren Mobilisierung des Materials und schliesslich — nachtektonisch — auch zu granitischen bis pegmatitischen Intrusionen. Nicht die tektonisch tiefste Lage und die damit zusammenhängende erhöhte Belastung hatte die im Vergleich zum übrigen Penninikum stärkere Metamorphose im Tessin zur Folge, sondern der Aufstieg granitisch-pegmatitischer Schmelzen bis in das Niveau der tiefern Tessiner Decken.

Diese Auffassung steht im Einklang mit der modernen Theorie der Entwicklung eines Orogens durch Einfaltung der Sialkruste in das unterliegende Sima, wie sie von VENISZ MEINESZ, J. H. F. UMBGROVE, H. H. HESS u. a. entwickelt worden ist. Die Einfaltung, welche unter der zentralen Zone der Alpen ihren grössten Tiefgang erreichte, war von einem Aufstieg von Lösungen und Schmelzen begleitet, die entlang der Wurzel der Einfaltung sich entwickelten und längs Bewegungsbahnen bis weit in den Oberbau vordrangen. Sie

waren die wichtigsten Energie- und Substanzträger, verglichen mit welchen die Belastung bei der Metamorphose nur eine untergeordnete Rolle spielte. Mit der hier skizzierten Auffassung stimmt auch überein, dass das grösste Schweredefizit der Alpen über der penninischen Zone liegt und junge Hebungen, als Ausdruck des Strebens nach isostatischem Ausgleich, sich gerade in diesem Gebiete sehr stark bemerkbar machen.

Literatur

- BEARTH P. (1952): Geologie und Petrographie des Monte Rosa. Beitr. Geol. Karte der Schweiz. 96.
- BIANCHI A. (1934): Studi petrografici sull'Alto Adige Orientale. Padova.
- CORNELIUS H. P. (1930): Zur Frage der Beziehungen von Metamorphose und Tektonik in den französischen Alpen. Mitt. Geol. Ges. Wien. 23, 142.
- CORNELIUS H. P. und E. CLAR (1939): Geologie des Grossglocknergebietes.
- DAL PIAZ GB. (1928): Geologia della catena Herbetet-Grivola-Grand Nomenon. Padova.
- DAL PIAZ GB. (1934): Studi geologici sull'Alto Adige Orientale. Padova.
- ELLENBERGER F. (1949): Sur quelques caractéristiques du métamorphisme alpin dans la Vanoise. C. R. S. du Séances de la Soc. Geol. de France. 249—250.
- NIGGLI P. (1950): Probleme der alpinen Gesteinsmetamorphose. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 30, 500.
- SANDER B. (1920): Geologische Studien am Westende der Hohen Tauern. J. ber. geol. Staatsanst. Wien. 70, 273.
- STAUB R. (1920): Über Wesen, Alter und Ursachen der Gesteinsmetamorphose in Graubünden. Vierteljahresschr. Naturf. Ges. Zürich. 65, 323.
- RAGUIN E. (1930): Haute Tarentaise et Haute Maurienne. Mém. carte géol. détaillée de la France.
- REINHARD M. (1934/35): Über Gesteinsmetamorphose in den Alpen. Jaarboek Van De Mijnbouw-kundige Vereeniging te Delft. 39.
- TERMIER P. (1903): Les schistes cristallins des Alpes occidentales. C. R. Intern. Geol. Kongr. Wien.
- TERMIER P. (1910): Sur la genèse des terrains cristallophylliens. C. R. Intern. Geol. Kongr. Stockholm.
- WENK E. (1948): Ostalpinen und penninisches Kristallin. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 28, 761.

Eingegangen: 20. Mai 1952.