

Plutonismus und Orogenese : Versuch einer Standortbestimmung

Autor(en): **Streckeisen, Albert**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **50 (1970)**

Heft 3

PDF erstellt am: **27.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-39269>

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.

Plutonismus und Orogenese

Versuch einer Standortbestimmung

Von *Albert Streckeisen* (Bern)*)

Der Zusammenhang von Plutonismus und Orogenese hat von altersher die Geologen beschäftigt. Es war nicht zu übersehen, dass in Faltengebirgen Eruptivgesteins-Assoziationen auftreten, die auf Kontinentalsöckeln oder in Ozeangebieten nicht – oder wenigstens nicht in gleicher Verbreitung – zu finden sind. Es lag daher nahe, eine genetische Beziehung zwischen Plutonismus und Orogenese zu vermuten. Diesen Fragen soll, besonders im Hinblick auf die granitoiden Gesteine, im folgenden nachgegangen werden. Wir beginnen mit einigen Begriffsbestimmungen.

Plutonismus

Als Plutonite oder Tiefengesteine bezeichnet man gemeinhin die Gesamtheit der massigen, meist mittel- bis grobkörnigen Gesteine – H. ROSENBUSCH (1907) nannte sie vorsichtiger einfach „Massige Gesteine“ –, von denen man annahm, dass sie in einer gewissen Tiefe der Erdkruste durch Verfestigung magmatischer Schmelzlösungen entstanden sind. Wenn dies auch für die meisten dieser Gesteine zutreffen mag, so hat sich in der Folgezeit doch immer deutlicher gezeigt, dass für einige (nach manchen Autoren: für viele) dieser Gesteine auch andere Entstehungsarten im Bereich der Möglichkeit liegen.

H. H. READ (1944; 1957, 166f.) hat dem Begriff „Plutonismus“ einen erweiterten Sinn gegeben. Er unterteilt die Gesteine schematisch in neptunische, plutonische und vulkanische, und hat diese Einteilung in einem launigen Bildlein veranschaulicht. Zu den neptunischen Gesteinen gehören vor allem die marinen Sedimente, die im Reich des Neptunus entstehen. Zu den plutonischen rechnet er alle Gesteine, die in einer gewissen Tiefe in der Erdkruste entstehen: also die Bildungen der Regionalmetamorphose im epi-, meso- und katazonalen Bereich; dann die migmatischen und anatektischen Gesteine, die – nach J. J. SEDERHOLM (1907) – im Bereich der regionalen Aufschmelzung

*) Adresse: Prof. A. Streckeisen, Mineralogisches Institut der Universität, Sahli-
strasse 6, 3000 Bern.

und Auflösung das Licht der Welt erblicken; und schliesslich die granitoiden Gesteine, die aus solcherart entstandenen palingenen Schmelzlösungen durch magmatische Verfestigung hervorgegangen sind. Sie alle sind dem „Pluto Plutoque“ verpflichtet. Dem neugebildeten palingenen Magma ist infolge seiner geringeren Dichte eine Tendenz zum Aufsteigen eigen – der „Magma-Aufstieg“ in Faltengebirgen von H. BACKLUND (1936) –, und READ (1951; 1957, 335) hat daraus eine ganze „Granit-Serie“ abgeleitet, die – je nach ihrer Tiefenlage im Orogen – von autochthonen und parautochthonen, nur undeutlich umgrenzten Graniten des Unterbaus schliesslich zu den in die Oberkruste aufgestiegenen, gut umgrenzten Granitplutonen (den „granites circonscrits“ von E. RAGUIN 1946) überleiten. Steigt das Magma dann bis in oberflächennahe Gebiete oder gar bis an die Erdoberfläche auf, so entstehen daraus – im Herrschaftsbereich des Vulcanus – die subvulkanischen (hypabyssischen) Granitlakkolithen sowie intermediäre bis saure Ergüsse.

„Per migma ad magma!“ Der Begriff des „Migma“ ist hier in Basel geboren worden. M. REINHARD (1935) hat ihn geprägt, und der Begriff ist dann von READ übernommen worden. REINHARD versteht unter „Migma“ den bei der Aufschmelzung entstandenen, aus fest und flüssig gemengten Brei, aus dem dann durch Sammlung der flüssigen Anteile das mehr oder weniger homogene Magma hervorgeht. „Das Migma ist dann zum Magma geworden.“

Der Begriff „Plutonismus“ umfasst nach READ also die Erscheinungen der Regionalmetamorphose, der Anatexis und Palingenese, wie auch die in der Tiefe erfolgende granitoide Gesteinsbildung. In diesem erweiterten Sinne soll der Begriff im folgenden gebraucht werden.

Orogenese

Als Orogenese bezeichnen wir die Gesamtheit der Erscheinungen, die mit der Entstehung von Faltengebirgen verknüpft sind. Zu ihnen gehören vor allem die tektonischen Vorgänge, die zur Entstehung von Falten, Überschiebungen, Decken führen; wie auch die in ihrem Gefolge auftretenden Gesteinsdeformationen. Zu ihnen gehören aber auch die in den tieferen Zonen des Orogens (im „Unterbau“) sich abspielenden Vorgänge wie Regionalmetamorphose, Anatexis und Palingenese, sowie der Aufstieg derart gebildeter granitoider Magmen. Plutonismus und Orogenese überschneiden sich demnach; der orogene Plutonismus ist selbst ein Teil der Orogenese. – Man hat die Entstehung des tektonischen Baus als solchen präziser als „Tektogenese“ (E. HAARMANN 1930, L. U. DE SITTER 1954) bezeichnet, um damit zum Ausdruck zu bringen, dass erst die nachfolgende isostatische Heraushebung zur Bildung von eigentlichen Gebirgen im morphologischen Sinne führt.

Die Entstehung von Faltengebirgen ist auf Krustenverkürzung zurückzuführen, wobei die seitliche Einengung eine wesentliche Rolle spielt. Die

tangentialen Bewegungen, die den Zusammenschub bewirkten, sind vermutlich durch Konvektionsströmungen in der Unterkruste oder im Oberen Mantel bedingt. Verschiedene Modelle sind dafür vorgeschlagen worden: wir erinnern nur an die WEGENERSche Theorie der Kontinentalverschiebungen, an die Unterströmungstheorie von O. AMPFERER, an die Verschluckungstheorie von E. KRAUS. Grosstektonisch ist ein Faltengebirge durch eine wesentliche Krustenverdickung gekennzeichnet; während die Untergrenze der Kruste unter dem Kontinentalsockel normalerweise in ca. 30 km Tiefe liegt, erreicht sie im Orogen der Alpen Werte bis über 60 km.

Auf den komplexen Charakter des Faltungsgeschehens in zeitlicher und räumlicher Beziehung soll hier nicht weiter eingegangen werden. Hingegen seien einige Überlegungen angeschlossen über die Methoden, mit denen Orogenesen nachgewiesen werden können; dies besonders im Hinblick auf ältere Orogenesen, deren Gebirge heute weitgehend eingeebnet sind.

1. Ein erster Nachweis ergibt sich aus der Winkeldiskordanz in Vorland-sedimenten (wobei natürlich Kreuzschichtung in Deltabildungen auszuschliessen ist). Vom Standpunkt des Flachlandgeologen aus hat H. STILLE (1924) diesen Weg beschritten und daraus eine Grosszahl von Faltungsphasen abgeleitet, an deren kurzfristigem, episodischem und ubiquitärem Charakter er – zu Recht oder zu Unrecht – zeitlebens unentwegt festgehalten hat.

2. Der Alpengeologe wird viel eher auf den tektonischen Formenschatz abstellen; auf das Auftreten von Falten und Decken, auf Überschiebungstektonik. C. E. WEGMANN (1953) hat das fruchtbare Konzept der Stockwerktektonik mit seiner Unterscheidung von Oberbau und Unterbau eingeführt; wobei der Oberbau im ganzen mehr rupturales, der Unterbau mehr plastisches Verhalten zeigt, ohne dass dieses Schema im einzelnen überbeansprucht werden darf.

3. Der Petrologe sodann wird die Orogenesen aus ihren petrogenetischen Wirkungen erschliessen, aus der durch sie hervorgebrachten Umbildung und Neubildung von Mineralen und Gesteinen, handle es sich dabei um die Bildung von regionalmetamorphen, zur Faltung konformen kristallinen Schiefen, um Anatexite des orogenen Unterbaus, oder um neu entstandene Magmatite, die synkinematisch oder postkinematisch gefördert wurden.

H. J. ZWART (1967) hat kürzlich den Versuch gemacht, die Orogenesen nach den in ihnen auftretenden regionalmetamorphen Faziesserien zu unterteilen. Er unterscheidet einerseits alpinotype Gebirge (z. B. die Alpiden), in deren metamorphen Gebieten Hochdruck-Mineralen (wie Lawsonit, Glaukophan, Disthen) auftreten und in denen Gesteine der Granatamphibolit-Fazies verbreitet sind; und andererseits hercynotype Gebirge (wie die Hercyniden, Svecofenniden, Kareliden), deren regionalmetamorphe Bildungen durch Niederdruck-Mineralen (wie Andalusit und Cordierit) gekennzeichnet sind und die häufig Gesteine der Cordieritamphibolit-Fazies führen. Anschliessend an Über-

legungen von E. DEN TEX (1965) werden für die dafür nötigen Bedingungen die folgenden Werte errechnet: Die Andalusit-Cordierit-Metamorphose erfolgte in Tiefen bis zu 20 km und impliziert Temperaturgradienten von 150–25° C/km und Drucke zwischen 1–5,5 kb. Die alpinotype Hochdruck-Metamorphose verlief in Tiefen von 30–60 km und unter Drucken von 8–16 kb bei Temperaturgradienten von 17–10° C/km. Eine Zwischenstellung nehmen die Kaledoniden ein; ihre intermediäre Faziesserie dürfte in Tiefen von 20–30 km entstanden sein und involviert Drucke von 5,5–8 kb bei Temperaturgradienten von 25–17° C/km. Die genannten Temperaturgradienten stehen in direkter Beziehung zum unterschiedlichen Auftreten granitoider Massen in den entsprechenden Gebirgen (sehr reichlich in den hercynotypen, eher spärlich in den alpinotypen Gebirgen).

4. Der Geochronologe endlich sucht die Orogenesen und sogar die einzelnen orogenen Phasen durch absolute Altersdaten von Einzelmineralen und von Gesamtgesteinen zu fassen. Doch erfordern diese Daten eine sorgfältige, sachgemäße Interpretation. So ergeben z. B. die Rb/Sr-Alter von Glimmern die Zeit ihrer Bildung oder aber ihrer Abkühlung unter die Temperatur, für die das Mineral ein geschlossenes System wurde (für Hellglimmer ca. 500°, für Biotit ca. 300°); die Gesamtgesteins-Alter datieren hingegen die Zeit der chemischen Bildung des Gesteins als solchen. Wie aufschlussreich solche Untersuchungen sein können, zeigt z. B. die Darstellung von G. GASTRIL (1960, 164), die die verschiedenen Orogenesen deutlich hervortreten lässt. Für die alpidische Faltung ergaben Arbeiten von E. JÄGER (1967, 1969) und J. HUNZIKER (1969a, 1969b, 1970) aus dem Berner Institut eine Vorläufer-Phase bei ca. 120 Mio. J. (Mittlere Kreide), die möglicherweise den grossen Deckenüberschiebungen im penninischen Raum entspricht; ferner eine weitere Phase bei 80 Mio. J., in der Oberen Kreide (Gosau-Faltung?), die besonders in den Ostalpen ausgeprägt ist; sodann die alpine Hauptphase bei 35–40 Mio. J. (Grenze Eocaen/Oligocaen). Die jungen Biotitalter der Zentralalpen werden als Abkühlungsalter bei der Heraushebung des Gebirges interpretiert; dabei zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme von Osten gegen Westen, vom Bergell (25–30 Mio. J.) zum Simplon (10–12 Mio. J.), wodurch Rückschlüsse auf die Phasen der Heraushebung und auch auf die Hebungsgeschwindigkeit möglich werden.

Auch das zeitliche Verhältnis von Metamorphose zum postkinematischen Magmatismus lässt sich bisweilen geochronologisch erfassen. Auf die alpine Hauptphase folgt das Eindringen der granitoiden Massen, das allerdings noch nicht durch Gesamtgesteins-Alter datiert werden konnte; die vorliegenden Biotitalter sind Abkühlalter und können daher in verschiedener Weise gedeutet werden (Abkühlung nach Intrusion oder bei Heraushebung des Gebirges). Konkludent sind indessen die Verhältnisse bei der hercynischen Orogenese: Die Abkühlung des Biotits auf die Temperatur von 300° nach der Metamorphose erfolgte in vielen altkristallinen Komplexen der Alpen übereinstimmend

bei 300 Mio. J., während viele zentralalpine Granite (wie auch der Baveno-Granit) bei 270–280 Mio. J. entstanden (Gesamtgesteins-Alter). In der Silvretta wurde sodann von B. GRAUERT (1968) für die verbreitetsten Orthogneise ein Alter von 430 Mio. J. gefunden, anscheinend im Anschluss an eine vorangegangene intensive Metamorphose; dies würde der Zeit der kaledonischen Faltung entsprechen, obwohl eine solche im Bereich der Alpen bislang nicht nachgewiesen wurde.

Diese wenigen Angaben mögen zeigen, wie bedeutungsvoll die Ergebnisse des jüngsten Zweiges der geologischen Wissenschaft, der Geochronologie, für die Erhellung der geologischen Geschichte der Alpen bereits sind und noch sein werden.

Der orogene Magmatismus

Seit langem ist bekannt, dass die meisten Orogenesen von einer spezifischen Magmenförderung begleitet werden. Einerseits sind es basische und ultrabasische Magmatite (Gabbros, Dolerite, Diabase, Basalte, Spilite und ihre metamorphen Derivate; Peridotite und Serpentine), die in der Frühzeit des orogenen Geschehens gefördert wurden; andererseits granitoide Gesteine (Granite, Granodiorite, Tonalite), die synkinematisch bis postkinematisch aus dem Unterbau des Faltengebirges aufstiegen. Die granitoiden Gesteine besitzen fast ausschliesslich subalkalinen Charakter (sog. Kalk-Alkali-Reihe.).

H. STILLE (1940) hat diesen Sachverhalt in seinem bekannten Schema festgehalten. Er unterscheidet vier Phasen:

1. Der initiale ophiolithische Magmatismus, der nach ihm in der Hauptsache extrusiv, vielfach submarin ist (Pillowlaven!), aber auch zur Bildung von Sills und Dykes und kleineren Stöcken geführt hat. Er wirkte während langen Zeiten, und bereits schon in der Geosynklinalphase (Eugeosynklinalen).

2. Der synorogene Plutonismus. Im Gegensatz zum Fehlen sialischer Magmatite in der geosynklinalen Vorbereitungszeit treten im Zusammenhang mit den orogenen Vorgängen nun plötzlich und abrupt granitoide Massen auf, die nach STILLE aus dem orogenen Unterbau mobilisiert worden sind (lithogene Granitbildung).

3. Der subsequente Vulkanismus. Im Gefolge davon treten in der subsequenten Phase vielfach sialische Magmen als Andesite, Dacite und auch Rhyolithe an die Erdoberfläche. Wenn solche in den Alpen vermutlich wegen des starken Zusammenschubs auch weitgehend fehlen, so sind sie doch z. B. in den Karpathen und im weiteren Verlauf der alpidischen Ketten weit verbreitet.

4. Der finale Vulkanismus, repräsentiert durch basaltische Ergüsse (oft von alkalibasaltischem Charakter), zeigt nach STILLE das Ende der orogenen Magmenförderung an. Diese Ergüsse finden sich zwar meist nicht im Orogen

selbst, sondern in dessen Vor- und Rückland. Möglicherweise handelt es sich aber eher um Förderung an jungen Bruchspalten, entsprechend einer Zerrungsphase nach Abschluss des eigentlichen orogenen Geschehens.

Es stellt sich nun die Frage, ob zwischen den Ophiolithen einerseits, den granitoiden Magmatiten und ihren effusiven Nachläufern andererseits eine direkte genetische Beziehung besteht, oder ob es sich um zwei voneinander unabhängige Erscheinungen handelt. Die Antwort auf diese Frage ist von verschiedenen Forschern und zu verschiedenen Zeiten unterschiedlich gegeben worden und hängt aufs engste zusammen mit der Frage nach der Granitbildung, der wir uns nun zuwenden wollen.

Die Frage der Granitbildung

Wenn es auch Granite gibt, die nicht an orogenes Geschehen gebunden sind (sog. anorogene Granite wie z. B. die Rapakiwi-Granite Fennoskandiens, der Bushveld-Granit in Süd-Afrika usw.), so besteht doch kein Zweifel daran, dass die überwiegende Zahl von granitoiden Gesteinen in Orogengebieten auftreten. Dies dürfte kein Zufall sein. Dass solche in den hercynischen Ketten ausserordentlich reichlich verbreitet sind, in den alpidischen Gebirgen aber eher spärlich auftreten (Biella und Traversella, Bergell und Adamello in den Alpen, Banatite und Dako granite in den Karpathen, Andengranite usw.), wurde gemeinhin mit der tieferen Erosion der älteren Gebirgsketten und dem sehr grossen Zusammenschub der Alpen erklärt. Eine abweichende Ansicht hat neuerdings H. J. ZWART (1967) geäussert.

Das Problem der Granitbildung hat in den vergangenen Jahrzehnten zu erregten Diskussionen geführt (siehe z. B. P. ESKOLA 1955). Den Magmatisten, die die Granitoide als Kristallisationsprodukte magmatischer Schmelzlösungen interpretierten, standen die Transformisten gegenüber, die die Entstehung der gleichen Gesteine durch metasomatische Umbildung nicht-granitischer älterer Gesteine (vorwiegend Gneise und Glimmerschiefer) erklärten. So standen sich „Wets“ und „Dryes“ (Nasse und Trockene), mit ihren Spitznamen „Popes“ und „Soaks“ (Päpste und Säuglinge) gegenüber: „Popes“ (oder „Pontiffs“), weil sie auf Grund ihrer vorzüglichen physikalisch-chemischen Schulung mit dem Gewicht ihrer Argumente gleichsam ex cathedra ihre Meinung vertraten; „Soaks“, weil sie eine Umbildung nicht-granitischer kristalliner Schiefer zu Graniten durch Aufsaugen metasomatisch zugeführter Substanzen postulierten. Der Streit hat heute viel von seiner Schärfe verloren, weil mit der Zeit klar geworden ist, dass beide Entstehungsmöglichkeiten fallweise zutreffen können: „There are granites and granites“ (READ). So geht heute die Diskussion mehr nur noch darum, ob in einem gegebenen Fall die eine oder andere Entstehung wahrscheinlicher erscheint.

1. Magmatische Granite

Dass magmatische Granite, d. h. solche die als Kristallisationsprodukte magmatischer Schmelzlösungen zu verstehen sind, wirklich und auch häufig vorkommen, wird heute kaum mehr bezweifelt. Dafür sprechen bei vielen Massiven die scharfen Kontakte (oft mit chilled margins), die wohl nur als Intrusivkontakte zu deuten sind. Dafür sprechen Kontakthöfe, in der inneren Zone oft mit Andalusit- und Cordierit-Hornfelsen, und mit nach aussen abnehmender Kontaktwirkung. Dafür sprechen auch Xenolithe von kristallinen Schiefen, oft in zufälliger, unregelmäßiger Lage im Eruptivstock auftretend, die kaum anders denn als mitgerissene Teile von Nebengestein gedeutet werden können. Dafür sprechen auch Pegmatite mit seltenen Mineralen wie auch kontaktpneumatolytische Erzlagerstätten (mit Skarnen), die auf leichtflüchtige Bestandteile im Magma hinweisen. Dafür sprechen auch die Gesteinsstrukturen mit ihrer regelmässigen Sukzession der ausgeschiedenen Gemengteile. Ein weiteres Indiz ist die Tatsache, dass die modalen Mineralbestände der überwiegenden Zahl von Graniten – sie werden in USA unverständlicherweise als „Adamellite“ oder „Quarzmonzonite“ bezeichnet! – sich im QAP-Dreieck in eindrucklicher Weise um dessen Mittelpunkt gruppieren, der dem Quarz-Feldspat-Eutektikum entspricht (A. STRECKEISEN 1967). Dass das Raumproblem gewisse – wenn auch nicht unlösbare – Schwierigkeiten aufwirft, sei nicht verschwiegen (M. WALTON 1955); doch ist dies für metasomatisch gebildete Granite nicht minder der Fall.

Die Herkunft der granitoiden Magmen ist eine Frage für sich. Zwei Ansichten stehen sich dabei gegenüber. Für die einen sind die Granite aus Restlösungen entstanden, die sich durch magmatische Differentiation aus basaltisch-gabbroiden Magmen entwickelt haben. Für die andern sind die granitoiden Magmen durch Anatexis und Differentiation im Unterbau des Orogens mobilisiert worden. Die einen Granite werden als juvenil, die andern als palingen (anatektisch) bezeichnet. Beide sind magmatisch.

Die Theorie der Entstehung *juvener Granite* durch gravitative Differentiation aus basaltisch-gabbroiden Schmelzlösungen ist vor allem durch N. L. BOWEN (1928) entwickelt worden. Unter Berücksichtigung möglicher Stoffwanderungen sowie von Kontamination und Assimilation hat sie P. NIGGLI (1938) in umfassender Weise zur Theorie der „komplexen gravitativen Kristallisationsdifferentiation“ ausgestaltet. Die Theorie stützt sich auf das Verhalten von Kristallisationsverläufen in experimentell untersuchten physikalisch-chemischen Systemen, die mit den unumgänglichen Vereinfachungen den natürlichen Schmelzlösungen entsprechen. Aus gabbroiden Schmelzlösungen können sich so dioritische, granodioritische, granitische Lösungen und endlich aplitische Restlösungen von nahezu eutektischem Charakter entwickeln. Die Gesteinsassoziationen in manchen petrographischen Provinzen

scheinen solchen Differentiationsverläufen gut zu entsprechen (C. BURRI und P. NIGGLI 1945). Dies gilt besonders für die verbreiteten vulkanischen Assoziationen:

Tholeiitbasalt-Andesit-Dacit-Rhyolith
 Olivinbasalt-Trachybasalt-Trachyandesit-Trachyt
 Olivinbasalt-Mugearit-Tephrit-Phonolith,

wobei solche Differentiationen zu eutektischen Endpunkten hinzielen. Auch die quantitativen Verhältnisse (reichlich basaltisches Ausgangsmaterial, spärlich anchi-eutektisches Endprodukt) sind mit solcher Interpretation gut verträglich. Es gibt auch Tiefengesteins-Komplexe, die durch solche magmatische Differentiation gut erklärt sind. Als Beispiel erwähnen wir den Zentralkomplex von Ardnamurchan (Schottland), wo die breiten gabbroiden Ring-Dykes in ihrem Zentrum zu quarzdioritischen, tonalitischen und granitischen (Granophyre) Gesteinen führen; dabei ist den ausgedehnten Massen gabbroider Gesteine ein verhältnismässig kleines Volumen granitischer Gesteine zugeordnet, wie dies bei der magmatischen Differentiation zu erwarten ist.

Will man aber die ausgedehnten Granitmassive der jüngeren und älteren Faltengebirge als Endprodukte einer magmatischen Differentiation betrachten, so erheben sich gewisse Schwierigkeiten. Ganz allgemein gibt es zwischen Gabbros einerseits, Graniten andererseits nur spärliche Übergangsgesteine. Dies ist die bekannte Diorit-Lücke („diorite-gap“). Gabbros, z. B. typische Diallaggabbros, sind in der Natur relativ verbreitet und oft mit Diabasen und auch mit Peridotiten und Serpentinitten vergesellschaftet, aber kaum je mit Graniten. Andererseits sind Diorite eher seltene Gesteine, kaum je mit Gabbros vergesellschaftet, häufig am Rande grösserer Granitmassen auftretend, mit denen sie durch Übergangsglieder verbunden sind; in manchen Fällen mag es sich um Reaktionsprodukte der Granite mit ihrem ursprünglichen Nebengestein handeln. Die postulierte Reihe

Gabbro-Diorit-Granodiorit-Granit

ist zwar physikalisch-chemisch gut begründet; in der Natur findet sie sich trotzdem nur selten.

Eine andere Schwierigkeit bieten die quantitativen Verhältnisse. Man hat berechnet, dass aus 6–10 Teilen Gabbro durch Differentiation 1 Teil Granit entstehen kann. Wollte man also die ausgedehnten Granitmassive als Endprodukte der magmatischen Differentiation erklären, so müssten in der Tiefe ganz ungeheure Mengen gabbroiden Materials zur Verfügung gestanden haben, von denen man aber auch in tiefer erodierten Faltengebirgen keinerlei Spuren aufgefunden hat.

Daher ist die Entstehung dieser Granitmassive durch magmatische Differentiation aus gabbroiden Schmelzen eher als unwahrscheinlich zu betrachten.

Anders verhält es sich mit der Annahme einer *anatektischen Entstehung* solcher Granite aus palingenen Schmelzlösungen. Die Verflüssigung ist die Umkehrung der magmatischen Verfestigung. Wird ein Komplex pelitischer und psammitischer Gesteine durch Versenkung in grössere Tiefe oder durch aufsteigende Wärmeströme in den Bereich höherer Temperaturen gebracht, so wird sich zunächst eine der eutektischen Zusammensetzung entsprechende aplitische Lösung bilden, und bei steigender Temperatur entstehen sukzessiv granitische, granodioritische, tonalitische Schmelzlösungen. Was bei der magmatischen Verfestigung am spätesten auskristallisiert, wird bei der Verflüssigung als erstes in Lösung gehen. Hat man das früher lediglich durch allgemeine Überlegungen abgeleitet, so ist es nun von H. G. F. WINKLER und H. VON PLATEN (1961a, 1961b) durch experimentelle Untersuchungen untermauert worden. Diese Forscher operierten mit Grauwacken und mit Tonen (Kaolinit-Tone, Illit-Tone), denen sie fallweise geringe Mengen von NaCl und CaCO₃ zusetzten, um den natürlichen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen. So entsteht z. B. aus einer Grauwacke (Schmittlotheim)

bei einer Temperatur von	690°	710°	730°	750°	780°
eine Schmelzmenge von	19%	31%	43%	74%	83%

Dabei ändert die Zusammensetzung der entstandenen Schmelzlösung mit zunehmender Temperatur von aplitischen zu granitischen, granodioritischen und tonalitischen Lösungen. Ähnliches gilt für die Verflüssigung von Tonen. Die Zusammensetzung der Lösungen folgt dabei recht genau der experimentell bestimmten eutektischen Linie Quarz-Feldspat. Vergleicht man die Modalbestände aus granitoiden Gesteinskörpern, so stellt man fest, dass die Häufungsstellen im QAP-Dreieck sehr nahe der eutektischen Linie Quarz-Feldspat liegen, und dass die Häufungsstelle für die meisten Granite in den Mittelpunkt des Dreiecks zu liegen kommt, der die Lage des Quarz-Feldspat-Eutektikums bezeichnet. Man darf daraus schliessen, dass die meisten Granite als anchi-eutektische Bildungen aus granitischen Schmelzlösungen recht gut erklärt sind, und dass eine anatektische Entstehung dieser Lösungen mit den experimentellen Befunden durchaus verträglich ist.

Adergneise und aderartige Migmatite sind im Unterbau vieler Faltengebirge reichlich vertreten, auch in den Alpen; so im Altkristallin des Aarmassivs, des Gotthard, des Monte Rosa, der Silvretta und auch im Lepontin, wo sie von E. GUTZWILLER (1912) erstmals beschrieben worden sind. Doch sind es die Petrographen Finnlands und Skandinaviens gewesen, die solchen Gesteinen eingehendere Untersuchungen gewidmet haben. Man hat die Adergesteine früher allgemein als Arterite gedeutet, d. h. entstanden durch Injektion granitischen Schmelzmaterials in die umgebenden Gesteine. Viel wahrscheinlicher ist aber in manchen Fällen eine Deutung als Venite, d. h. durch „Ausblutung“, durch Mobilisation von granitischem Neosom aus dem ursprüng-

lichen Gestein selbst. Bei den meisten Vorkommen der Alpen handelt es sich um Anatexite des Altkristallins, deren Entstehung älteren Faltungen zu verdanken ist. Anatektische Erscheinungen, die der alpidischen Faltung zugeordnet werden, sind von E. WENK (1956a, 1956b, 1962) und seinen Schülern aus dem tieferen Lepontin beschrieben worden.

2. *Metasomatische Granite*

Die Verfestigung granitischer Schmelzlösungen ist komplexer, als man früher angenommen hatte. An die rein magmatische Verfestigung schliessen sich postmagmatische, sog. deuterische Prozesse an, die zu Umbildungen und Verdrängungen früher ausgeschiedener Gemengteile und zu Neukristallisationen führen (perthitische Entmischung, Serizitisierung und Saussuritisierung der Feldspäte, Chloritisierung der dunkeln Gemengteile, Neubildung von Albit [oft Schachbrettalbit] und Kalifeldspat [oft Mikroklin], sowie myrmetische Verwachsungen). Wanderungen mobiler Komponenten, besonders von Alkalien und Wasser, spielen dabei eine wesentliche Rolle. Auch der chemische Bestand der Gesteine kann dadurch geändert werden; in manchen Fällen findet eine Kali-Anreicherung statt. T. F. W. BARTH (1965, 212) hat darauf aufmerksam gemacht, dass sehr kalireiche Granite nicht durch fraktionierte Kristallisation gebildet werden können. Die bekannten grossen Kalifeldspäte der porphyrtartigen Granite mögen in manchen Fällen als magmatisch ausgeschiedene Einsprenglinge zu betrachten sein; in vielen Fällen handelt es sich aber um später gesprossene Porphyroblasten. Inwieweit die grossen Kalifeldspäte eine Fließregelung des einströmenden Magmas oder eine vorgegebene Textur des älteren Materials abbilden, hat E. NICKEL (1967) mit seinen Mitarbeitern an Hand von Modellversuchen zu entscheiden versucht.

Berücksichtigt man das Auftreten solcher postmagmatischer Erscheinungen, so ist es verständlich, dass von manchen Forschern schon vor langem eine metasomatische Bildung von Graniten in Betracht gezogen wurde. Schon am Ende des letzten Jahrhunderts haben die Petrographen der französischen Schule (BARROIS, MICHEL-LÉVY, LACROIX) die Bildung mancher Granite durch „feldspathisation“ und „granitisation“ postuliert, wobei sie annahmen, dass nicht-granitische kristalline Schiefer durch Zufuhr von „agents minéralisateurs“ und Sprossung von Feldspäten (vor allem von Kalifeldspat) zu Granit umgebildet wurden. Später haben fennoskandische Forscher und vor allem C. E. WEGMANN (1935) ähnliche Gedanken vertreten. Sie stützten sich dabei vor allem auf feldgeologische Befunde; sie wiesen hin auf nicht vollständig verwischte Reliktstrukturen (sog. „ghost structures“), auf die Sprossung von Kalifeldspat-Blasten im unmittelbaren Nebengestein, ja sogar auf das Auftreten solcher Blasten, die „à cheval“ selbst Gesteinsgrenzen durchsetzen.

Von Magmatisten wurde zu Gunsten der Theorie der magmatischen Diffe-

rentiation ins Feld geführt, es handle sich „um die einzige Theorie, die sich wirklich unter Benützung feldgeologischer, mikroskopischer, analytisch-chemischer und physikalisch-chemischer Befunde aus den ersten Anfängen immer weiter entwickelt hat, die sich aus einer ‚Meinung‘ zu einer Arbeitshypothese, an deren Begründung ständig weiter gearbeitet wird, umgestaltet hat“ (P. NIGGLI 1942, 53). Unterdessen sind auch für die anatektische Granitbildung die theoretischen Grundlagen erarbeitet worden. Für die metasomatische Granitbildung bleibt dies weitgehend noch zu tun. Wenn diese Grundlagen bis anhin noch fehlen, so können wir mit M. REINHARD (1943, 33):

„darin nur ein Geständnis unserer noch sehr unvollkommenen theoretischen Grundlagen erblicken. Die Natur richtet sich aber nicht nach unseren Theorien; wir haben diese der Natur anzupassen. Und wenn feldgeologische Gründe gegen die magmatische Entstehung sprechen, so sollen wir versuchen, andere Möglichkeiten der Entstehung durch theoretische und physikalisch-chemische Überlegungen zu untermauern“.

Bei der Bildung von Graniten im festen Zustand durch metasomatische Zufuhr mobiler Komponenten, ohne dass das gesamte Gestein durch eine flüssige Phase hindurchgegangen wäre, ist noch manches unklar: so die Herkunft der zugeführten Stoffe, die Art ihrer Wanderung; auch die Volumverhältnisse bereiten Schwierigkeiten. Doch ist in manchen Fällen an der Tatsache einer metasomatischen Entstehung nicht zu zweifeln, auch wenn die daran beteiligten Vorgänge im gegenwärtigen Moment noch nicht völlig klar erscheinen.

In seiner umfassenden Darstellung hat K. R. MEHNERT (1968, 349f.) die drei Hauptmöglichkeiten der Granitbildung gleichberechtigt nebeneinander gestellt:

1. Bei steigenden PT-Bedingungen werden Gesteine von entsprechender Zusammensetzung partiell mobilisiert unter Bildung einer anatektischen Schmelzlösung, welche als Granit verfestigt: es entstehen palingene Granite.
2. Unter fallenden PT-Bedingungen entsteht ein magmatischer juveniler Granit durch Kristallisation einer bereits bestehenden intrusiven Schmelzlösung, entweder direkt oder durch Differentiation.
3. Bei wesentlich konstanten PT-Bedingungen erhält ein Gestein von nicht-granitischem Charakter eine granitische Zusammensetzung und Struktur durch Zufuhr oder Wegfuhr mobiler Komponenten: es entstehen metasomatische Granite.

Ophiolithe

Auf die Bildung der basischen und ultrabasischen Magmatite, die in einer Frühphase¹⁾ der Gebirgsbildung so reichlich gefördert wurden, soll nicht mehr

¹⁾ Für die basischen Extrusionen des Oberhalbsteins (Graubünden) nimmt V. DIETRICH (1969) auf Grund eingehender Untersuchungen einen Zeitraum an, der vom Oberen Jura bis zur Oberkreide reichte; die vulkanische Haupttätigkeit lag wahrscheinlich in der Unteren Kreide.

eingegangen werden. Es genüge die Bemerkung, dass ihr Material zweifellos aus grosser Tiefe stammt, wahrscheinlich aus dem Oberen Mantel. Für die Art seiner Förderung sind verschiedene Überlegungen angestellt worden, die hier nicht zu betrachten sind. Immerhin dürfte feststehen, dass die orogene Granitbildung plötzlich und abrupt im orogenen Geschehen auftritt, ohne dass irgendwelche Übergänge aus der Ophiolith-Serie zu erkennen wären. Alpino-type Ophiolithe und orogene Granite stammen zweifellos aus verschiedenen Quellen.

Der kursorische Überblick konnte nicht anders als unvollständig sein. Eines hingegen dürfte er gezeigt haben. Orogenese, Metamorphose und Magmatismus sind innig und untrennbar miteinander verknüpft. Sie stellen die wesentlichen „Lebens“erscheinungen der oberen festen Erdkruste dar und gehören damit – um mit einem Begriff von P. ESKOLA (1965, XXXVIII) zu schliessen – zum „Epic of Life“.

Der Verfasser dankt Frau Prof. E. Jäger und Herrn Prof. E. Niggli für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

- BACKLUND, H. G. (1936): Der „Magmaaufstieg“ in Faltengebirgen. Bull. Comm. géol. Finlande 115, 293–347.
- BARTH, T. F. W. (1965): Aspects of Crystallization of Quartzo-feldspathic Plutonic Rocks. Tscherm. Min. Petr. Mitt., 3. F., 11, 209–222.
- BOWEN, N. L. (1928): The Evolution of Igneous Rocks. Princeton Univ. Press.
- BURRI, C. und NIGGLI, P. (1946): Die jungen Eruptivgesteine des mediterranen Orogens I. Schweizer-Spiegel-Verlag, Zürich.
- DIETRICH, V. (1969): Die Ophiolithe des Oberhalbsteins (Graubünden) und das Ophiolithmaterial der ostschweizerischen Molasseablagerungen. Europ. Hochschulschr., Reihe XVII, Bd. 1, Bern.
- ESKOLA, P. (1932): On the Origin of Granitic Magmas. Tscherm. Min. Petr. Mitt. 42, 455–481.
- (1955): About the Granite Problem and Some Masters of the Study of Granite. Bull. Comm. géol. Finlande 168, 117–130.
- (1965) in V. MARMO: Pentti Eskola. CR. Soc. géol. Finlande 37.
- GRAUERT, B. (1969): Die Entwicklungsgeschichte des Silvretta-Kristallins auf Grund radiometrischer Altersbestimmungen. Diss. Bern.
- GUTZWILLER, E. (1912): Injektionsgneise aus dem Kanton Tessin. Eclogae. geol. Helv. 12, 7–64.
- HAARMANN, E. (1930): Die Oszillationstheorie. Enke, Stuttgart.
- HUNZIKER, J. C. und BEARTH, P. (1969a): Rb-Sr-Altersbestimmungen aus den Walliser Alpen. Biotitalterswerte und ihre Bedeutung für die Abkühlungsgeschichte der alpinen Metamorphose. Eclogae geol. Helv. 62/1, 205–222.
- HUNZIKER, J. C. (1969b): Rb-Sr-Altersbestimmungen aus den Walliser Alpen. Hellglimmer- und Gesamtgesteinsalterswerte. Eclogae geol. Helv. 62/2, 527–542.

- (1970): Polymetamorphism in the Monte Rosa, Western Alps. *Eclogae geol. Helv.* 63/1, 151–161.
- JÄGER, E., NIGGLI, E. und WENK, E. (1967): Rb-Sr Altersbestimmungen an Glimmern der Zentralalpen. *Beitr. geol. Karte Schweiz, NF 134.*
- JÄGER, E. (1969): Gesteinsbildende und orogene Phasen in der Entwicklungsgeschichte der Alpen. *Geowiss. Tagung Berlin 1967. Beihefte Geol. Jb. (Hannover) 80, 185–195.*
- MEHNERT, K. R. (1968): *Migmatites and the Origin of Granitic Rocks.* Elsevier, Amsterdam.
- NICKEL, E., KOCK, H. und NUNGÄSSER, W. (1967): Modellversuche zur Fließregelung in Graniten. *SMPM 47/2, 399–497.*
- NIGGLI, P. (1938): Die komplexe gravitative Kristallisationsdifferentiation. *SMPM 18, 610–664.*
- (1942): Das Problem der Granitbildung. *SMPM 22/1, 1–84.*
- RAGUIN, E. (1946): *Géologie du granite.* Masson, Paris.
- READ, H. H. (1957): *The Granite Controversy.* Murby, London.
- REINHARD, M. (1935): Über Gesteinsmetamorphose in den Alpen. *Jb. Mijnbouwkund. Ver. Delft 1934–1935, 39–45.*
- (1943): Über die Entstehung des Granits. *Basler Univ.reden 16.*
- ROSENBUSCH, H. (1907): *Mikroskopische Physiographie der massigen Gesteine.* Schweizerbart, Stuttgart.
- SEDERHOLM, J. J. (1907): Om Granit och Gneiss. *Bull. Comm. géol. Finlande 23.*
- DE SITTER, L. U. (1956): *Structural Geology.* McGraw-Hill, New York.
- STILLE, H. (1924): *Grundfragen der vergleichenden Tektonik.* Borntraeger, Berlin.
- (1939): Zur Frage der Herkunft der Magmen. *Abh. Preuss. Akad. Wiss. 1939, 16.*
- STRECKEISEN, A. (1967): Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. *N. Jb. Mineral., Abh. 107, 144–240.*
- DEN TEX, E. (1965): Metamorphic Lineages of Orogenic Plutonism. *Geologie en Mijnbouw 44, 105–132.*
- WALTON, M. (1955): The Emplacement of Granite. *J. Sci. 253, 1–18.*
- WEGMANN, C. E. (1935): Zur Deutung der Migmatite. *Geol. Rdsch. 26/5, 305–350.*
- (1953): Über gleichzeitige Bewegungsbilder verschiedener Stockwerke. *Geol. Rdsch. 41, 21–33.*
- WENK, E. (1956a): Alpines und ostgrönländisch-kaledonisches Kristallin, ein tektonisch-petrogenetischer Vergleich. *Verh. Natf. Ges. Basel 67/2, 75–102.*
- (1956b): Die Lepontinische Gneissregion und die jungen Granite der Valle della Mera. *Eclogae geol. Helv. 49/2, 251–265.*
- (1962): Das reaktivierte Grundgebirge der Zentralalpen. *Geol. Rdsch. 52, 754–766.*
- WINKLER, H. G. F. und VON PLATEN, H. F. (1961a): Experimentelle Gesteinsmetamorphose IV. Bildung anatektischer Schmelzen aus metamorphosierten Grauwacken. *Geochim. Cosmochim. Acta 24, 48–96.*
- (1961b): Experimentelle Gesteinsmetamorphose V. Experimentelle anatektische Schmelzen und ihre petrogenetische Bedeutung. *Geochim. Cosmochim. Acta 24, 250–259.*
- ZWART, H. J. (1967): The Duality of Orogenic Belts. *Geologie en Mijnbouw 46, 283–309.*

Manuskript eingegangen am 31. Oktober 1970.