

Die Bildung der Granite.

Von Univ.-Prof. Dr. Hans Leitmeier, Wien.

Vortrag, gehalten am 15. Mai 1957

(Erweiterte Fassung)

Aus Granit, seinen Abarten und ihm nahe verwandten Gesteinen besteht der weitaus größte Teil der unseren direkten Untersuchungen und Beobachtungen irgendwie zugänglichen Erdkruste. Da über die Gesamtdicke dieser festen Erdkruste die Meinungen der dazu berufenen Forscher ziemlich weit auseinandergehen, können wir mit einiger Wahrscheinlichkeit annehmen, daß dieser nur an einigen Stellen gut beobachtbare Teil ca. ein Drittel bis Viertel oder vielleicht noch weniger der gesamten festen Erdkruste ausmachen dürfte. Nach den Erfahrungen der Gesteinsverteilung in diesem unzugänglichen Raum können wir mit einiger Berechtigung die Ansicht vertreten, daß der unseren Einblicken unzugängliche Teil der festen Erdkruste nicht viel anders beschaffen ist.

Mit seinen mineralischen Hauptbestandteilen, Feldspat verschiedener Zusammensetzung, Quarz und dunklem Biotitglimmer, der stark zurücktreten

kann, zu denen sich, manchmal auch in nicht unbedeutenden Mengen, andere dunkle Bestandteile, wie Hornblenden und Augite gesellen können, und mit der dieser mineralischen Verteilung entsprechenden chemischen Zusammensetzung, sind die granitischen Gesteine die an Kieselsäure (SiO_2) reichsten (sauersten) Tiefengesteine unseres Gesteinssystems. Der Anteil an Quarz (reines SiO_2) kann sehr groß sein. Die im Granit auftretenden Feldspatarten sind vorwiegend die an Kieselsäure reichsten, der Kalifeldspat (Orthoklas und Mikroklin), in manchen Gebieten unserer Erde z. T. oder ganz vertreten durch den ebenso sauren Natronfeldspat (Albit). Von den s. g. Plagioklasen, den Mischungen von dem an Kieselsäure reichen Albit und dem an Kieselsäure ärmsten (basischen) Kalkfeldspat (Anorthit) herrschen die saureren Mischungsglieder vor ¹⁾. In fast allen größeren Granitmassen, Granitgebirgen der Erde ist aber der Anteil von granitischen Gesteinen mit etwas geringeren Mengen an Kieselsäure größer, als früher angenommen worden ist. Diese, den granitischen Gesteinen in jeder Weise zugehörenden, etwas basischeren Gesteine liegen in der Reihe des Gesteinssystems vom sauersten, dem Granit mit seinen an Kieselsäure reichsten Abarten, bis zu dem an Kieselsäure ärmsten, also basischesten Gestein, dem

¹⁾ Diese Mischungsreihe vom basischen bis zum sauren Endglied lautet: Anorthit-Bytownit-Labrador-Andesin-Oligoklas-Albit.

Gabbro (bzw. dem Basalt), mehr gegen die Mitte zu, in die wir die Diorite genannten s. g. intermediären Gesteine dieser Reihe stellen. Diese an Kieselsäure etwas ärmeren, in Erscheinungsform und Mineralbestand durchaus dem Granit zugehörigen Gesteine, die in der Natur lückenlos in das sauerste Granit-Endglied übergehen, werden **Granodiorit** (granodioritische Gesteine) genannt, zu denen z. B. der Tonalit gehört, der auch in unseren Alpen häufig ist, u. a. den Adamello, die Presanella und die Rieserfernergruppe aufbaut. Man kann alle diese Gesteine mitsamt dem Granit als die der **Granitodioritreihe** bezeichnen, eine Zusammenfassung, die vor allem genetische Bedeutung hat, denn alle diese Gesteine haben dieselbe Entstehung. Die Gesteine der Granitodioritreihe, nicht nur bei weitem die häufigsten unserer Erdkruste, sondern auch die häufigsten aller **Tiefengesteine**, auch Plutonite (oder abyssische Gesteine) genannt, sind wie alle Tiefengesteine in größerer Tiefe unserer Erdkruste gebildet (davon haben sie ihren Namen). Ihre Bestandteile sind nur ganz allmählich durch sehr langsame, nur in der Tiefe mögliche Abkühlung zu Kristallen geworden. Vom Beginn der Kristallisation, die mit den an Kieselsäure ärmsten basischen Mineralien mit den höchsten Schmelzpunkten bzw. Erstarrungspunkten beginnt, bis zu den an Kieselsäure reichsten, sauersten letzten Kristallbildungen, also bis zum völligen Festwerden des

ganzen Gesteines in den großen Schmelzbassins der Tiefe, in der sich diese Vorgänge abspielen, können sehr lange Zeiträume verstreichen, vielleicht sogar ganze geologische Perioden, jedenfalls aber mehrere Hunderttausende von Jahren, eine über unsere Vorstellungsmöglichkeiten hinausgehende Zeitspanne. Die Schmelzpunkte bzw. Erstarrungspunkte der gesteinsbildenden Mineralien werden auf Grund der Laboratoriumsversuche mit über 1000° angenommen. Den Tiefengesteinen stehen die Ergußgesteine, Oberflächengesteine, auch Effusivgesteine oder Vulkanite²⁾ gegenüber. Bei ihrer Bildung gelangt auf oft verhältnismäßig direktem Wege und in verhältnismäßig kurzer Zeit die noch flüssige Schmelze der Tiefe an die Oberfläche, wo dann die Bestandteile der Schmelze infolge der, durch den großen Temperaturunterschied bedingten starken Abkühlung, rasch auskristallisieren bzw. fest werden. Die Menge der schon in der Tiefe, also unter den Bedingungen der Tiefengesteinsbildung in solchen später emporgedrungenen Schmelzen auskristallisierten, also bereits festen Bestandteilen, die sie an die Oberfläche mitbringen, die dort auch noch weiter wachsen können, ist verschieden groß. Diese Schmelze ist daher

²⁾ Der Name kann irreführen, da nicht nur solche Gesteine als Laven den Vulkanen entströmen, sondern auch durch ruhigen Ausfluß aus tief hinabreichenden Spalten in Riesenmengen besonders in der Tertiärzeit an die Oberfläche kamen.

ein Kristallbrei mit wechselnden Mengen in der Tiefe schon auskristallisierter Bestandteile (intratellurischer Anteil) im noch im flüssigen Zustand an die Oberfläche gelangten effusiven Anteil. Die in der Tiefe gebildeten Kristalle³⁾ werden im allgemeinen größere Dimensionen erreichen, so daß sie gewissermaßen als Einsprenglinge in der an der Oberfläche rasch auskristallisierten, oder als vulkanisches Glas festgewordenen Grundmasse, dem effusiven Anteil, liegen. Im Gegensatz zu den Tiefengesteinen sind die weitaus größeren Mengen — ca. 95% — der Ergußgesteine die an Kieselsäure armen basaltischen Gesteine, wie uns die Vulkane lehren. Alle aus dem Schmelzfluß erstarrten Gesteine, für die es viele Namen gibt, wie **E r s t a r r u n g s g e s t e i n e**, **Schmelzgesteine**, **M a g m a t i t e**, **Eruptivgesteine**⁴⁾, gehören entweder der Reihe der Tiefengesteine oder der Ergußgesteine an,

³⁾ Die Mineralien der Tiefengesteine bilden meist wenig gut ausgebildete Kristalle. Von den Bestandteilen der Ergußgesteine, sind die Einsprenglinge besser von Kristallflächen begrenzt, als die der manchmal auch zum Teil glasigen Grundmasse. Fast alle hier genannten gesteinsbildenden Mineralien sind **S i l i c a t e**, also Verbindungen der Kieselsäure.

⁴⁾ Auch dieser Name ist irreführend und sollte vermieden werden, denn nur ein Teil der Erstarrungsgesteine hat etwas mit Eruption zu tun. Trotzdem wird er oft gebraucht.

eine Einteilung, deren Grundlage auf den verschiedenen Bildungsräumen besteht.

Die schwierigste, aber auch die interessanteste aller großen Fragen der Gesteinslehre ist die nach der Entstehung der Gesteine, die Petrogenesis, die beinahe eine eigene Wissenschaft geworden ist. Das wußten auch schon unsere Vorfahren. Der Streit, ob die Gesteine in unserer Erdkruste und an ihrer Oberfläche auf wässrigem Wege (neptunisch) gebildet seien, oder ob ein Teil von ihnen aus dem Schmelzfluß erstarrt sei (plutonisch), nahm im ausgehenden 18. Jahrhundert ungewöhntes Ausmaß und fast weltanschaulichen Charakter an. Die Neptunisten standen, unter Führung von Gottlob Abraham *Werner*, dessen Partei aus eigener Überzeugung bekanntlich *Goethe* ergriffen hatte, die Plutonisten folgten den Darlegungen von Leopold v. *Buch* und Alex. v. *Humboldt*. Trotz des Widerstandes starrer Extremisten, der noch bis an den Beginn unseres Jahrhunderts ausstrahlte, kam es bald zum Siege eines gemäßigten Plutonismus. Da ist es nun nicht uninteressant festzustellen, daß unsere heutigen Vorstellungen von der Entstehung der granitodioritischen Gesteine dem Neptunismus im gewissen Sinne nähergerückt sind. Im damaligen Streit stand der Granit durchaus im Vordergrund, dem *Goethe* eine sprachschöne Abhandlung gewidmet hat.

Zwei Forschungsgebiete, die allmählich nach der Zeit der Beendigung des Streites Neptunismus—Plutonismus besonders wichtig zu werden begannen, sind eng mit dem Problem der Bildung der Granitgesteine verbunden. Das eine dieser Gebiete, das großräumigere, aber noch hypothetischere, war und ist die Entwicklung der Vorstellungen vom Zustand unserer Erde, der Verteilung der Stoffe, aus denen sie besteht, und vor allem der Bildung der festen Erdkruste. Das andere sind unsere Ansichten über die Bildung der Gebirge. Die unbedingt berechtigte Forderung, des s. g. Aktualitätsprinzipes, das aller geologischen Forschung zu Grunde gelegt werden muß, um eine möglichst gesicherte Basis zu bilden, kann bei diesen Forschungen nur wenig Berücksichtigung finden. Dieses Prinzip (*Hutton* und *Lyell*) besagt, daß alle gezogenen Schlüsse, alle Theorien nach Möglichkeit auf Naturbeobachtungen beruhen sollen, oder zumindest mit solchen irgendwie ein Einklang hergestellt werden soll, daß Naturbeobachtungen immer am höchsten gewertet werden müssen. Was wir auf dem unseren Beobachtungen zugänglichen Teil unserer Erdkruste feststellen können, erst in zweiter Reihe, was wir experimentell überprüfen können, soll für die Ergründung der Erdgeschichte, bei der Erforschung von Vorgängen, von denen wir nur die Ergebnisse sehen und studieren können, die Grundlage aller Vorstel-

lungen bleiben. Zumindest soll dieses Prinzip gewissermaßen das Regulativ auch aller petrogenetischen Forschungen sein. Für die beiden großen Forschungsgebiete, die früher genannt wurden, ist dieses Prinzip nur eingeengt anwendbar, da nur geringe Teile der Erdkruste und nur die obersten Teile der Gebirge unseren direkten Beobachtungen zugänglich sind.

Ausgehend von der Theorie, daß die Erde, deren Substanz wohl aus dem Urnebelzustand der Sonne stammt, also Solarmaterie war und daher auch gegenwärtig veränderte Solarmaterie ist, wird auch heute noch angenommen, daß im Sinne von *Kant-Laplace* unsere Erde aus dem Gaszustand infolge der Abkühlung über den flüssigen Zustand, allmählich eine von den Forschern sehr verschieden stark gedachte feste Hülle erhalten habe. Über Verteilung und Zustand tieferer Partien und schließlich des Erdinneren, von dem auch angenommen worden ist, daß es heute noch aus wenig veränderter Solarmaterie bestehen könnte, sind die Meinungen sehr verschieden. Die äußere Schicht, unsere Kruste, wird wegen ihrer im wesentlichen granitischen Zusammensetzung, da sie vor allem aus Si (Silicium) und Al (Aluminium) besteht und die an Kieselsäure reicheren Silicate enthält, „Sial“ genannt. Auf diesem Sial liegen die im Verhältnis zu seiner Mächtigkeit geringeren Mengen der Sedimentgesteine (Absatzgesteine, zum weitaus größten Teil aus

Wasser — also neptunisch abgesetzt). Sie sind geringer, trotzdem sie, vornehmlich im Paläozoikum (dem Altertum der Erde) und im Mesozoikum (dem Mittelalter der Erde) aufgebaut, stellenweise hoch aufragen. Dafür, daß unter dem Sial eine basischere, an Kieselsäure ärmere Zone liegen müsse, spricht nicht nur die Überlegung, daß wir aus dem Verhältnis der geringeren Eigenschwere (Dichte, spezifisches Gewicht) der Sialgesteine zur viel größeren Eigenschwere der gesamten Erde, auf schwerere Gesteine in den tieferen Zonen schließen müssen, sondern auch die Zeugen aus dieser Zone, die basischen, an Kieselsäure armen Laven unserer jungen Vulkane und die Ergußmassen älterer Erdperioden, die basaltischer Zusammensetzung sind. Ob, und wie weit herabreichend diese Zone fest, flüssig oder glasig ist, darüber sind die Meinungen der Geologen und Geophysiker geteilt. Da in dieser Zone das Si mit Mg (Magnesium) und Eisen in größeren Mengen zu Mineralien und Gesteinen vereint ist, nennt man diese Zone „Sima“. Sie enthält die an Kieselsäure ärmeren Silicate. Sie muß zumindest angenähert basaltische Zusammensetzung haben, wenn es auch noch nicht entschieden ist, ob die festen Teile des Simas als Ergußgesteine (Basalt) oder als Tiefengesteine (Gabbro) vorliegen. Da sie Basalte an die Oberfläche fördern, ist im Sinne des Aktualitätsprinzips jedenfalls basaltische Zusammensetzung gesichert.

Stellen wir die Frage nach den Hauptverbreitungsgebieten der Granitodioritgesteine auf und in unserer sialischen Erdkruste, dann wird die Antwort lauten: In den großen Gebirgen unserer Erdkruste, die tektonisch (durch Bewegung entstanden) große Zusammenballungen von Gesteinsmassen des Sials darstellen, die besonders in den ältesten Formationen (archaisch, präcambrisch) der Urzeit unserer Erde, in den alten kaledonischen Gebirgen, verbreitet sind, wie wir sie u. a. in großen Massen in Skandinavien, Schottland, in der russischen Tafel, im sg. kanadischen Schild kennen. Dann die jüngeren Gesteine der paläozoischen Gebirge (Alttertum der Erde), wie sie z. B. im oberen Karbon entstanden sind, die herzynisch-varistischen Gebirge, zu denen in Europa u. a. das deutsche Mittelgebirge und die böhmische Masse gehören, dem auch unser Waldviertel zuzuzählen ist, aber auch die älteren Gesteine noch einmal später umgeformter jüngerer Gebirge. Schließlich die Granitgesteine dieser jüngsten s. g. alpidischen Gebirge, deren Bildungsdauer von der obersten Kreidezeit am Ende des Mesozoikums (Mittelalter der Erde) bis in die Tertiärzeit (Neuzeit der Erde) reicht. Als Beispiel, namengebend für diese Gebirgsbildung, gelten unsere Alpen, dann die Dinariden, Karpathen, Himalaja-Karakorum, Anden, Cordilleren. Es gibt also gewisse, über die ganze Erde verbreitete Zyklen periodischer Gebirgsbildung, während in den

Zwischenzeiten verhältnismäßig tektonische Ruhe auf unserer Erde herrschte, die oft sehr lange, nach unseren Berechnungen viele Millionen von Jahren, dauerte, jedenfalls viel länger als die Zeitdauer einer Gebirgsbildung selbst. Eine solche Ruhezeit lag z. B. zwischen der varistischen Orogenese (Gebirgsbildung) im Oberkarbon bis zur alpinen Orogenese der oberen Kreidezeit, des letzten Abschnittes des Mesozoikums. Die Frage, wieso es zu einer Orogenese kommt und warum die Orogenesen nur nach großen Zwischenzeiten auftreten, ist eine der am schwersten zu beantwortenden Fragen und wohl eine der ungeklärtesten im weiten Gebiet der Geologie und der Geophysik. Es herrschen mehrere Ansichten, aber alle können nur als Hypothesen gewertet werden. Kontraktionstheorie, verschiebende und verschobene Kontinentalschollen, die Unterströmungstheorie, bzw. Verschluckungstheorie, Gleitung unter Schwerkraftwirkung, die Oszillationstheorie, Undationstheorie, Annahme radioaktiver Wärmeentwicklung im Erdinneren. (Nur die letzte Annahme ist im Stande, die zyklisch-periodische Wiederkehr der Orogenesen und die langen Zwischenzeiten zu erklären ⁵⁾). Daß die Gebirgsbildungen zeitlich in Perioden auftreten, und daß jede dieser

⁵⁾ Es ist durchaus wahrscheinlich, daß Orogenesen dem Zusammenwirken mehrerer dieser Annahmen ihre Impulse verdanken, die z. B. Cornelius (Grundzüge der allgemeinen Geologie, Wien 1953, S. 278) kurz und

Gebirgsbildungen von der ältesten bis zur jüngsten in charakteristischen Phasen vor sich geht, kann als erwiesen gelten. *Stille* hat ein Schema gegeben, das heute allgemein angenommen ist, zu dem auch solche Forscher, die Einwände gemacht haben, doch wieder zurückgekehrt sind. Der Hauptakt jeder Gebirgsbildung ist eine Art Empordringens, Emporgehobenwerdens, vorgebildeter Gesteinsmassen, obwohl unsere heutigen Gebirge ihre Höhen mehr noch nachträglicher un-
gemein langsam vor sich gehender Hebung verdanken. Die Voraussetzung jeder neuen Gebirgsbildung besteht in der allmählichen Abtragung eines älteren durch die *Erosion*, die Zerstörung durch Luft- und Wassereinwirkung, verbunden mit Temperaturschwankungen in kleinen Intervallen, z. B. Tag und Nacht besonders in heißen Wüstengebieten und im Hochgebirge, den größeren Intervallen der Jahreszeiten. Dabei kann jeder herausragende Gesteinskörper, auch das Gebirge völlig eingeebnet werden. Diese Erosionsmassen werden allmählich am Rande solcher schließlich abgetragener Erhebungen angesammelt, durch die Tätigkeit von Flüssen und Gletscherströmen verteilt und bilden dann in ihrer Gesamtheit die s. g. *Geosynklinalen*. Nicht nur

übersichtlich dargestellt hat. So glaube ich, daß keine der heutigen Theorien ohne Mitwirkung von Wärmewirkung durch radioaktiven Zerfall in der Tiefe und ohne jede tangentialen Verschiebung auskommen dürfte.

durch den Druck der Auflage, auch durch andere Faktoren tektonischer Natur sinken diese Massen wie in einem Wellental von Wellenbewegungslinien (Synklinen) ganz allmählich in tiefere Lagen ab. Nach neueren Ansichten können sie auch in Tiefen nahe den schmelzflüssigen oder doch heißen Bereichen des Simas abströmen, hinabgezogen werden. Dieser Prozeß braucht Zeit, die hat er zwischen den einzelnen Orogenesen auch reichlich. Bevor nun eine solche Orogenese beginnt, dringen in der ersten nur vorbereitenden Phase, die noch nicht zur eigentlichen Orogenese gehört, die *Stille* die des initialen simatischen Magmatismus nannte, flüssige oder erst durch Wärmezufuhr von unten aus dem Erdinnern als Beginn der Orogenese flüssig gewordene simatische Schmelzen in die Geosynklinale ein, bzw. auf. Dort bilden sie basische Gesteine, Gabbro (Tiefengestein) oder Basalte (Ergußgestein), je nachdem sie höher oder tiefer in der Geosynklinalmasse vordringen konnten. Sehr charakteristisch für diesen Vorgang ist die Bildung besonders stark (ultra-) basischer Abspaltungsgesteine des Simas (Peridotite = Olivingesteine, Pyroxenite = Augitgesteine), die auch als Ophiolithe bezeichnet wurden, weil sie vielfach das Gefüge grobkörniger Ergußgesteine (Ophiolithgefüge) haben. Heute sind sie zumeist schon in Serpentine umgewandelt. Die zweite Phase ist nun die der Hauptorogenese im eigentlichen Sinne, der siali-

sche synorogene Magmatismus, der fast ausschließlich ein Plutonismus ist. Die Synklinale (Einsenkung) wird nun allmählich zur Antiklinale (Aufwölbung). Diese Phase geht nicht in einem einzigen Akt vor sich, sondern oft in mehreren, die zusammengehören, die gleiche Wirkung ausüben, aber zeitlich auseinander liegen können, sie geht also in Teilphasen vor sich. So kennen wir von der alpidischen Orogenese als älteste wirksame Teilphase die vorgosauische noch in der oberen Kreide, eine andere an der Grenze von Kreide und Tertiär, die laramische Phase und eine tertiäre, die savische Phase, wenn wir von kleineren Teilphasen absehen. In allen diesen Teilphasen der zweiten Hauptphase im Sinne *Stilles* kommt es zu den mehr oder weniger starken tektonischen Veränderungen, den verschiedenen Decken und Deckensystemen, also mehr oder weniger horizontalen Bewegungen des Übereinandergeratens verschieden alter Schichten durch die Raumveränderungen und Lageveränderungen, eine Folge tangential gerichteten Druckes, dessen Hauptrichtung in den Ostalpen S—N war. In dieser zweiten Phase, bzw. in ihren Teilphasen bilden sich nun zum Unterschied von der initialen Phase, sialische, granitische Gesteine der Granitodioritreihe in viel größerem Ausmaße, als in der ersten Phase die simatischen Gesteine. Dadurch, daß die Geosynklinalmassen emporgehoben werden, kommen sie aus dem Wirkungsbereich simatischer Schmelzen. Von

simatischen Schmelzen in der Tiefe abgespaltene, abdiffenzierte granitische Schmelzen, oder nach neuerer Meinung, Sialgesteine, die durch die Hitze- einwirkung der Tiefe, wohin diese abgesunkenen, an Kieselsäure reichen Sialmassen der Geosynklinale mit ihren niedrigeren Schmelzpunkten geraten und dort zu flüssigen (beweglichen) Schmelzen geworden waren, konnten nun nach oben dringen. Sie werden wohl nicht gerade während der Hauptphasen der Deckenbildung, einer doch mehr horizontal gerichteten Bewegung in die durch diese Deckenbewegungen neu gelagerten Schichten eindringen können, sondern eher unmittelbar darnach, am Beginn der ruhigeren Zwischenphasen, aber doch im unmittelbarsten Gefolge stärkster orogenetischer Wirkung (*Cornelius*). Für unsere alpidische Orogenese verlegt man sie unmittelbar ins Gefolge der vorgosauischen und der laramischen Teilphase. Nur auf diese oder ähnliche Weise kann man den Hiatus in der Gesteinszusammensetzung zwischen den simatischen Produkten des initialen und den sialischen des synorogenen Magmatismus verstehen. Diese wichtigste zweite Phase ist die Stätte der Entstehung der meisten Granitodioritgesteine unserer Erde.

Auf diese Phase folgt als dritte der sialische subsequente Vulkanismus, der saure (granitische) Ergußgesteine förderte, die teils neugebildet wurden (abermaliges teilweises Einsinken)

oder Reste vom synorogenen Magmatismus waren. Er hat in den einzelnen Orogenesen und in den verschiedenen Gebieten recht verschiedene Mengen solcher Gesteine geliefert. In den Dinariden ist diese Phase sehr verbreitet, im Bereich unserer Alpen treten so gebildete Gesteine in der alpidischen Orogenese sehr stark zurück (z. B. Ergußgesteine von Gleichenberg). Hingegen gehört die größte Ergußgesteinsmasse der gesamten Alpen, der bekannte permische, also jungpaläozoische Bozener Quarzporphyr genetisch dem subsequenten Vulkanismus der oberkarbonen varistischen Orogenese an. Die letzte Phase, die wieder simatische, also basische Gesteine aus der Tiefe an die Oberfläche brachte, der finale simatische Vulkanismus, ist durch die Bildung von Basalten gekennzeichnet, die nach den Hauptbewegungen mehr horizontaler Richtung nun auf tief hinabreichenden, durch neugebildete Brüche entstandenen Spalten aufgedrungen sind. In den Alpen ist auch dieser Magmatismus von recht geringem Umfang, die Reihe der Basalte vom Burgenland (z. B. der Pauliberg und die Basalte von Oberpullendorf), die Basalte der Umgebung von Gleichenberg (Hochstraden und Klösch), bis in die südliche Steiermark (Weitendorf bei Wildon) und schließlich ins kärntnerische Lavanttal (Kollnitz bei St. Paul), gehören hieher. In anderen Gebieten aber entstanden in dieser Phase Riesenmassen der s. g. Plateaubasalte (Flutbasalte), über die ganze Erde

verbreitet (Island, Grönland, die britischen Inseln, Spitzbergen, ebenso wie die enormen Massen Decans in Indien, die südafrikanischen Pipes, die Basalte Brasiliens, Sibiriens u. v. a.), Vulkane, Riesenströme und Spaltenausfüllungen.

Wir wissen also nun, wo sich die meisten Granitgesteine gebildet haben und wissen, wie sie nach dieser genialen Annahme *Stilles* in das System der Gebirgsbildung einzubauen sind. Wenn auch diese Annahme nur eine Hypothese ist, so stützt sie sich doch im Sinne des Aktualitätsprinzipes auf zahlreiche klare und eindeutige Beobachtungen. Aber darüber, wie sie entstanden sind, ist damit noch wenig gesagt.

Zur Beantwortung dieses ganz großen „wie“ hat eine ganz große Anzahl von Forschern der ganzen Welt beigetragen, Geologen, Petrologen, Mineralogen, Mineralchemiker, Geophysiker, von denen manche darin ihre Lebensaufgabe erblickten und erblicken. Ihre Ansichten gehen weit auseinander, manches hat sich heute schon als unwahrscheinlich herausgestellt, aber daß wir doch heute mitten im Stande der Entwicklung sind, das verdanken wir allen diesen Forschern, auch wenn sie in ihren Folgerungen manchmal zu weit gegangen sind. Ohne Phantasie ist ein derartiges Riesenproblem nicht zu fördern. Phantasie greift manchmal zu weit, bereitet aber dadurch keinen bleibenden Schaden, denn sie kann fast immer in die richtigen Bahnen gelenkt

werden. Schädlich ist zweierlei: Phantasielosigkeit, die schlechteste Eigenschaft eines Naturforschers, und allzu starres Beharren und Beharrenwollen um jeden Preis ⁶⁾, das Fehlen jeder Revisionsbereitschaft. Gerade das hat sich im Fortschritt unserer Probleme als schwere Hemmung erwiesen. Keine Namen seien genannt. Aber für uns alpennahe Bewohner eines der köstlichsten Gebiete der Erde, möchte ich als vorbildlich nur einen Namen nennen: Hans Peter *Cornelius*, der nur für die Alpen gelebt hat, und wie nur wenige die Entwicklung unserer Alpengeologie gefördert hat, der nicht leicht seine Meinung verließ, aber immer revisionsbereit war und gewußt hat, daß Entwicklung nur dann möglich ist, wenn man bereit ist, seine Meinung, die man für gut hält, durch eine bessere zu vertauschen, daß sich der Forscher damit nicht nur nichts vergibt, sondern dadurch den Beweis liefert, daß es ihm nur um die Förderung unseres Wissens geht.

⁶⁾ Abwartendes, beobachtendes Beharren hingegen hat sich öfter als nützlich erwiesen, gewissermaßen als eine Ruhestätte, zu der man gerne zurückkehrt, wenn es einmal allzu stürmisch hergegangen ist. Niemand darf in unserer Wissenschaft gezwungen werden, mit Neuerungen mitzugehen, niemand darf es einem verdienten Forscher verübeln, wenn er da nicht mitmacht, nur darf er dem Neueren nicht feindselig gegenüberstehen und nur seinen Namen in die Wagschale werfen.

Eines darf aber bei allem Suchen nach Möglichkeiten bei allen Gedankenbildern von den Vorgängen, die zur Entstehung granitischer Gesteine und aller anderen Tiefengesteine geführt haben könnten, niemals vergessen werden: Daß sich das alles nur in größerer Tiefe unter Überlagerung bedeutender Mengen bereits festen Gesteins der verschiedensten Art vollzogen haben muß. Daß sehr lange Zeiten vergehen mußten, bis durch die Erosion soviel abgetragen und zerstört worden ist, daß wir Einblicke in diese Bildungen der Tiefe gewinnen können. Daß sich aber Bewegungen auch in der Tiefe vollziehen können, das lehren uns u. a. die tektonischen Beben.

Noch bevor sich die Zyklentheorie entwickelt hat, war der Zusammenhang der granitischen Gesteine unserer Erdkruste mit gebirgsbildenden Prozessen erkannt worden. Man wußte auch, daß dort diese Gesteine fast immer mit basischeren zusammen vorkommen und man fand solche große Gesteinsprovinzen, in denen die granitischen Gesteine vorwalten, an den verschiedensten Stellen der Erde und man studierte ihre Ähnlichkeiten und ihre Verschiedenheiten. Da ergaben sich mehr oder weniger ähnliche auch bis zur Kongruenz gleichgebaute Gesteinsfolgen in den verschiedensten Gebieten der Erde, auch wenn sie nicht das gleiche Alter haben. So kennen wir solche ähnliche großräumige Gesteinskomplexe in Skandinavien, mit ihren großen uralten Gebirgen, die große Gesteinsprovinz Mitteldeutsch-

lands mit dem Odenwald, Schwarzwald, Vogesen, den Mittelgebirgen Mährens und Böhmens (Böhmerwald und Sudeten), zu denen unser Waldviertel und Mühlviertel gehört; ähnlich, zumindest in der Gesteinsfolge, sind auch unsre Alpen und die Karpathen. Ihnen entsprechen in Gesteins- und Mineralverteilung riesige Gesteinsprovinzen in Südamerika Anden—Cordilleren, die Nevadiden Nordamerikas, die Antillen Mittelamerikas und viele andere. Alle diese Gesteine unterscheiden sich mineralogisch, besonders aber in ihrer chemischen Zusammensetzung charakteristisch von ganz unvergleichlich selteneren Gesteinsprovinzen, deren Gesteine ein anderes Verhältnis der Alkali-Mengen (Na und K) zu Al, Ca und Si zeigen, die auch andersartige mineralische Bindungen haben, ausgezeichnet durch das Auftreten bestimmter Mineralien und bestimmter Gesteine, die den früher genannten, um ein mehr als Tausendfaches häufigeren Gesteinen, fehlen. Solche selteneren Gesteinsprovinzen, in denen die granitischen Gesteine nicht immer vorwalten, fand man u. a. im Gebiete von Oslo (Christiania), von wo sie zuerst eingehend beschrieben worden sind, in Brasilien (Rio, San Paolo), auf der Kolahalbinsel, auf Madagaskar, in Abessinien, in Portugal (Serra de Monchique u. a.), in Frankreich die Auvergne, auf Korsika, in Deutschland Eifel und Kaiserstuhl, das böhmische Mittelgebirge, die kleine Gesteinsprovinz von Predazzo und des Monzoni in den Vorbergen der

Marmolata in Südtirol. Diese Provinzen mit ihren mannigfaltigen, seltenen Gesteinen erweckten das besondere Interesse der Forscher. Man erkannte auch in den großen Vulkangebieten der Erde, an ihren Ergußgesteinen die gleichen Unterschiede und bezeichnete die erste riesengroße Reihe nach der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung als die **Kalkalkaligesteine** oder als die **pazifische**, weil ihre vulkanischen Vertreter im Raume des pazifischen Ozeans vorherrschen, die andere kleinere als die der **Alkaligesteine** oder der **atlantischen** Reihe, weil ihr die meisten um den Atlantik gruppierten vulkanischen Gesteine zugehören. Man hat später als zweite Alkaligesteinsreihe und gleichzeitig gewissermaßen vermittelnde Mischprovinz noch die **mediterrane** Reihe angenommen, die sich dadurch von der atlantischen Alkalireihe unterscheidet, daß diese Reihe Natron-Vormacht, die mediterrane aber Kali-Vormacht besitzt. Die großen Granitgesteinsmengen, die der großen Orogene, die in ihre Zyklen und Teilphasen (*Stille*) gruppiert werden konnten, gehören zu den pazifischen Kalkalkaligesteinen.

Alle diese wichtigen Feststellungen konnten nur dadurch gemacht werden, daß die Methoden der Gesteinsuntersuchungen sehr weit ausgebaut worden waren. Seitdem das für diese Untersuchungen geschaffene petrographische Polarisationsmikroskop in Gebrauch war, kann man die Gesteine ebenso wie

tierische und pflanzliche Gewebe in feinsten Schnitten, den Dünnschliffen, untersuchen. Zahlreiche Methoden der Gesteinsuntersuchungen wurden ausgearbeitet. Sie wurden verbessert und durch neue ergänzt. Große Namen, wie der Heidelberger *Rosenbusch*, der Wiener *Becke* und der Russe *Fedorow* sind mit diesen Arbeiten für immer verbunden. Zur gleichen Zeit wurde die chemische Zusammensetzung der Gesteine durch analytische Methoden quantitativ festgestellt. Damit und mit den optischen Untersuchungen konnte die chemische und mineralische Zusammensetzung ermittelt werden und auch die Mengen der einzelnen Mineralien im Gestein durch Auszählen der Bestandteile mit ausreichender Genauigkeit festgestellt werden, das Verdienst des Wiener *Rosival*. In späterer Zeit kam, durch zwei Österreicher, *Walter Schmidt* (in Leoben, später in Berlin) und dem Innsbrucker *Sander* begründet, die Lehre vom Gefüge der Gesteine hinzu, die nach *Schmidts* frühem Tode *Sander* zu seiner großartigen Gefügekunde ausgebaut hat, die u. a. sagt, wie die Mineralien im Gestein gegeneinander liegen und die Richtungen angibt, in denen sie gewachsen oder durch Umbildung gekommen sind, was für die Entstehung vieler Gesteine von größter Wichtigkeit sein kann. Darüber hinaus ist die Gefügekunde für die Geologie, aber auch für die Technik, von größtem Wert.

Aber noch eine andere Wissenschaft, die heute allgemeinste Bedeutung gefunden hat, die physikalische Chemie, wurde ganz besonders für die Erkenntnis des Baues und der Entstehung der Mineralien, vor allem für die aus dem Schmelzflusse gebildeten, wichtig. In der Form der Experimentalchemie, besonders der Untersuchung der Silicatschmelzen, denn das sind ja die Schmelzen, aus denen die Gesteine bzw. die gesteinsbildenden Mineralien auskristallisieren, wurde sie für die Petrogenesis von größter Bedeutung. Auch hier hat, allerdings nur für den Beginn, ein Österreicher bahnbrechend gewirkt, *Doelter* (zuerst in Graz, dann in Wien). Die Kostspieligkeit der zur Weiterführung nötigen Apparaturen hatte zur Folge, daß diese Forschungsrichtung von den Amerikanern weiter betrieben wurde, denen *Carnegie* ein eigenes großartiges Laboratorium in Washington zur Verfügung stellte, das seinen Namen trägt und heute noch das größte derartige Institut ist. Es wurden die Schmelzpunkte der Silicate gemessen und aus diesen zumeist über 1000⁰ gelegenen Werten geschlossen, daß die Erstarrungspunkte bei der Gesteinsbildung ebenso hoch lägen. Es wurde die Ausscheidungsfolge der Mineralien aus künstlichen Silicatschmelzen, die *Rosenbusch* für die Kristallisationsbeginne der einzelnen das Gestein bildenden Mineralien auf Grund der gegenseitigen Wachstums-Beeinflussung an einer enormen Zahl von Gesteinsdünnschliffuntersuchun-

gen ausgearbeitet hatte, an den entsprechenden künstlich hergestellten Silicatschmelzen studiert und auch die Kristallisationsdauer der einzelnen Mineralien untersucht und daraus Schlüsse auf die Gesteinsbildung in der Natur gezogen. Die Auskristallisationsbedingungen von zwei, drei und vier Mineralien in einer Schmelze und ihr Verhalten zueinander (Mehrstoffsysteme) bei den verschiedensten Temperaturen, konnte festgestellt und daraus Schlüsse auf ihr Verhalten in den auskristallisierenden Gesteinsschmelzen der Natur gezogen werden. Die Existenzgebiete und Existenzbedingungen der einzelnen Mineralien wurden untersucht. Obwohl die Gesteine aus noch mehr Bestandteilen bestehen, konnte doch zumindest die Bildung der an der Oberfläche erstarrten Silicatgesteine, also der Ergußgesteine, völlig geklärt werden, denn die hier herrschenden Bedingungen sind, außer den größeren Mengen, die gleichen, wie im Laboratorium. Für die Bildung der Silicatgesteine in der Tiefe unter hohem Druck, bei ganz allmählicher, im Laboratorium niemals erreichbarer langsamer Abkühlung, wurden zahlreiche Hinweise gegeben, die von großer Bedeutung waren.

Aus allen diesen sich allmählich entwickelnden und stellenweise auch festigenden Kenntnissen, auf das engste miteinander verbunden, während früher die einzelnen Disziplinen nebeneinander herliefen und jeder für sich forschte (was allerdings auch

heute noch manchmal geschieht), wurde die Petrographie und mit ihr die Petrogenesis geschaffen, die man heute mit Recht als die k l a s s i s c h e bezeichnen darf, die, wenn auch nur für kurze Zeit, ein geschlossenes Bild geben konnte, ohne das niemals eine gesunde Weiterentwicklung möglich gewesen wäre. Das muß heute auch der Forscher zugeben, der gegen das Starre dieser klassischen Petrologie ankämpft. Der Fortschritt über diese klassische Petrologie hinaus aber steht fast ausschließlich im Zeichen der Granitforschung.

Worin bestand nun diese klassische Form der Petrogenesis? Von den Forschern, die sie vor allem vertraten und sie gegen alle Angriffe bis in die jüngste Zeit verteidigten, sollen zwei der führenden genannt sein, die schon verstorbenen *Niggli* (Zürich) und der Amerikaner *Bowen*, zwei der größten Petrologen unseres Jahrhunderts. Sie gingen von der Übereinstimmung der Naturbeobachtung, daß die Granitodioritgesteine anscheinend in sehr vielen, besonders in pazifischen Gesteinsprovinzen, die letzte Auskristallisierung sind, mit den Ergebnissen der Forschungen an den Silicatschmelzen im Laboratorium, aus. Denn auch dort kristallisieren zuerst die an Kieselsäure ärmsten Verbindungen, wie dies auch im Anteil der Ergußgesteine, der an der Oberfläche auskristallisiert, der Fall ist. Dann erst folgen die an Kieselsäure reicheren und reichen Mineralien in der Natur und zum Schluß die reine Kieselsäure, der

Quarz, der allerdings im Laboratorium nicht zur Kristallisation kommt, sondern nur Kieselglas bildet, wie dies auch bei besonders rasch, ganz an der Oberfläche abgekühlten Teilen der Ergußgesteine der Fall ist. Daraus wurde geschlossen, daß sich auch in den großen Auskristallisierungsräumen der Tiefengesteine beim Bildungsvorgang einer Gesteinsserie vom basischen Gestein bis zum Granit zuerst die basischen Gesteine mit den an Mg und Fe reichen Mineralien, wie Olivin, Augit und Hornblende bilden. Dann folgen die anderen Gemengteile, wie der dunkle Biotitglimmer, die basischen Feldspate der Plagioklasreihe, die reichlich Anorthit enthalten, vom Anorthit zum Labrador und dann zum Andesin. Dann erst kommen die sauren Plagioklase bis zum Albit, der Kalifeldspat und schließlich der Quarz. Dieser Ausscheidungsfolge entspricht auch die Tiefengesteins-Reihenfolge vom Gabbro über den intermediären Diorit zum Granit. Es kommt also im Magmabassin der simatischen Schmelze zu einer Art Sonderung, *D i f f e r e n t i a t i o n* der Bestandteile von den basischen zu den sauren. Die ersteren können wegen ihrer größeren Schwere in der leichteren Schmelze⁷⁾ absinken und zusammenhängende Massen basischer und ultrabasischer Gesteine bilden. Dann folgen, wenn keine tektonischen Störungen eintreten, die Feldspate vom basischen bis zum

7) leichter geworden durch die Absonderung der schweren Bestandteile.

sauren Feldspat und schließlich der Quarz. Diese Feldspatreihe stimmt mit optischen Beobachtungen im großen und ganzen überein, denn in den Erstarrungsgesteinen kann man diese Abfolge der Plagioklase, besonders bei intermediären Gesteinen der Diorite und auch noch manchmal der Quarzdiorite, dadurch feststellen, daß zonar gebaute Plagioklase auftreten, bei denen immer die innere Zone, der Kern, basischer ist als die Hüll-Schichten, die oft als Schichtkristalle von mehrfachen Schichten ausgebildet sind⁸⁾. Auch der Quarz liegt ersichtlich als letzte Bildung niemals in Einzelkristallen, sondern nur als körnige Masse und einzelne Körner zwischen den anderen Kristallen. Er ist nachweisbar letzte Bildung, was auch *Rosenbusch* in seiner Abfolge feststellen konnte (vgl. S=). Wurde auch nicht behauptet, daß dieser Prozeß störungsfrei verläuft, daß er vielmehr mancherlei Abweichungen zuläßt, so liegt doch diese Mineral- und ihr entsprechend diese Gesteinsfolge allen Vorstellungen der klassischen Petrologie zugrunde. Nicht immer blieb die Abfolge tektonisch ungestört, die saure Restschmelze konnte abgequetscht werden und in andere Räume kommen, so daß dann basische Abfolge und saurere räumlich getrennt von einander liegen können. Der

⁸⁾ Die optischen Untersuchungsmethoden geben uns die Möglichkeit, die einzelnen Schichten der zonaren Plagioklase genau nach ihrem Anorthitgehalt zu bestimmen.

Differentiationsvorgang nimmt oft sehr lange Zeit in Anspruch.

Niggli nannte die Gesamtheit dieses Vorganges gravitative, selektive, komplexe Kristallisationsdifferentiation. Gravitativ, weil basische Massen durch ihre Schwere räumlich in die Tiefe abgesondert werden können, selektiv, weil eine Aussonderung eintritt. Diese Entstehungsart der Gesteine wurde allgemein anerkanntes Prinzip, steht es doch z. T. tatsächlich auf dem Boden des Aktualitätsprinzipes, das von den meisten Forschern, bewußt oder auch unbewußt, anerkannt wurde. Diese Theorie, als *Tatsache* angenommen, wurde von vielen Forschern ausgebaut, allen Gesteinsprovinzen, den pazifischen und den atlantischen, zur Bildungsgrundlage gegeben, vornehmlich den pazifischen großen Gebirgen mit ihren Granitmassen. Es kann nicht geleugnet werden, daß vieles für dieses Prinzip spricht und es muß auch heute als durchaus wahrscheinlich gelten, daß die meisten basischen Gesteine und manche Granitgesteine auf diese Weise entstanden sind. Dies ist auch dann möglich, wenn nicht alle Zwischenstadien vorhanden sind, da Unterbrechungen, Rekurrenzen, Wiederverflüssigung etc. durchaus im Bereich der Möglichkeit liegen. Auch das Eindringen, die *Intrusion*, der granitischen Restschmelze, differenziert von den anderen basischen, bereits verfestigten Bestandteilen, in überlagernde Schichten, muß als

gegebene Tatsache anerkannt bleiben. Alle diese Prozesse können nur in verhältnismäßig größerer Tiefe der Erdkruste vor sich gehen, denn dorthin hat man jegliche, zumindest die meiste Granitbildung zu verlegen.

Man ging noch weiter mit der Annahme des Wirkungsbereiches dieser Kristallisationsdifferentiation. Man nahm an, daß auch das gesamte Sial, also die oberste Schichte der Erde, unsere Kruste, durch diese Kristallisationsdifferentiation aus dem Sima entstanden sei. Dieses leichtere, saure, granitische Sial wäre zuerst gewissermaßen wie Eisberge auf der schwereren noch undifferenzierten simatischen Schmelze mit mehr oder weniger Tiefgang geschwommen, und hätte sich dann zu einem festen Mantel zusammengeschlossen, der ja gegenüber dem mächtigeren Sima nicht allzu dick angenommen werden müßte.

Daß sich gelegentlich bei dieser Art der Gesteinswerdung in nebensächlich angenommenem Ausmaß noch andere Vorgänge abspielen können, haben auch unbedingte Anhänger der komplexen, gravitativen Kristallisationsdifferentiation nicht bestritten, aber ausdrücklich daran festgehalten, daß ihnen nur untergeordnete Bedeutung zukommt. Man hat angenommen, daß die Laven der heute noch ab und zu tätigen Vulkane und die enormen basaltischen Ergußmassen der Tertiärzeit und der früheren geologischen Perioden dem Sima entstammen, ohne daß

diese Schmelzen auf ihrem Wege nach oben weitgehende Veränderungen erlitten haben. Sie stellen also gewissermaßen die urbasaltische Schmelze des Erdinneren unter dem Sial dar⁹⁾. Man gab aber die Möglichkeit zu, daß diese aufdringenden Schmelzen an anderen Stellen infolge der höheren Schmelz- bzw. Erstarrungspunkte ihrer Bestandteile, die höher liegen als die der meisten Sialgesteine, sich ab und zu Bestandteile des Sials auch in größerer Menge durch Einschmelzen einverleiben und sie auflösen können. Dieser Vorgang der Einschmelzung wurde *Assimilation*¹⁰⁾ genannt. Dadurch verlieren diese Schmelzen mehr oder weniger ihren basaltischen basischen Charakter, sie werden saurer und können bei ihrer späteren Auskristallisation intermediäre dioritische Gesteine bilden oder sie differenzieren in ihrer Gesamtheit und liefern dann je nach der Menge des eingeschmolzenen Sials und nach dessen Zusammensetzung bestimmte Mengen basischerer und granitischer Gesteine. Solche Schmelzen, die Sial verschiedener Zusammensetzung,

⁹⁾ Sie können aber auch, noch bevor sie undifferenziert an die Oberfläche gelangen, auf ihrem Wege nach oben differenzieren und so die Reihe der Ergußgesteine vom basischen Basalt zum Andesit, dem intermediären Trachyt und dem sauren Quarzporphyr oder dem jungen Liparit bilden.

¹⁰⁾ Man hätte einen anderen Ausdruck für diesen Vorgang verwenden sollen und den Namen Assimilation den Botanikern zum Alleingebrauch überlassen sollen.

wenn auch vornehmlich granitischer, assimiliert haben, hat man Migma zum Unterschied vom Magma genannt, eine Bezeichnung, die für unveränderte simatische Schmelzen hätte erhalten bleiben sollen. Denn heute sagt man zu jeder Schmelze Magma, z. B. synorogener Magmatismus¹¹⁾, nennt die gesamten Erguß- und Tiefengesteine Magmatite. Auch der Name entartete Schmelze ist für dieses Migma im Gebrauch. Gesteine, die aus Migma entstanden sind, heißen dann Migmatite (Mischgesteine). Die eingeschmolzenen Gesteine des Sials können die verschiedenste Zusammensetzung gehabt haben, Erstarrungsgesteine, Sedimentgesteine, Metamorphite der verschiedensten Abkunft gewesen sein. Solche Migmatite enthalten aber immer Anteile der emporgedrungenen simatischen Schmelze. Aber auch durch Absinken, z. B. der Geosynklinalen, und Absinken durch Brüche kann Sial und mit ihm auch Sedimentgestein in eine Tiefenschmelze simatischen Ursprungs gelangen. Die durch das Einschmelzen verursachte Abkühlung kann dann zur Auskristallisierung eines Mischgesteines führen, oder das so erzeugte Migma kann aufsteigen und, wie eben ausgeführt, zur Verfestigung kommen. Auch durch die sorgfältigste Gesteinsanalyse und Berechnungsart ist es nicht immer möglich, ein granitisches Misch-

¹¹⁾ der, wie wir noch sehen werden, wohl zumeist ein Migmatismus ist.

gestein von einem Differentiationsprodukt zu unterscheiden, denn diese Mischgesteine sind echte Granitodioritgesteine.

Durch das Einsinken in größere Tiefen mit höherer Temperatur oder durch das Aufsteigen höherer Temperaturen (eventuell durch Wirkung von radioaktivem Zerfall) kann festes Sial auch aufgeschmolzen werden, ohne daß es zu einer Reaktion mit dem Sima gekommen ist. Diese Wiederaufschmelzung bezeichnet man als *Anatexis*, die Auskristallisierung aus einer anatektischen Schmelze als *Palingenese*. Auf diese Weise kann ein Palingengranit (Anatexit) nicht nur dadurch entstehen, daß ein schon vorgebildetes altes granitisches Gestein, z. B. aus einer älteren Orogenese, wieder aufgeschmolzen (*mobiliert* nennt man einen solchen Vorgang auch)¹²⁾, wird, oder ein aus ihm entstandener Metamorphit, z. B. ein Gneis, sondern auch ein Sedimentgestein, ein Sandstein, Ton, Mergel, der chemisch in seiner Zusammensetzung einem Granitgestein nahe stand, oder ein aus einem Sedimentgestein entstandener Metamorphit (Phyllit, Glimmerschiefer, Quarzit, Gneis, der ja auch sedimentärer Abkunft sein kann). Ist auch basischeres im aufgeschmolzenen Sial enthaltenes Gestein mit-

¹²⁾ Aus der Überfülle der geschaffenen, z. T. überflüssigen Namen habe ich nur den zum Verständnis nötigen Teil ausgewählt.

aufgeschmolzen worden, dann kann auch ein an Kieselsäure ärmerer Palingengranit entstehen. Natürlich sind solche Palingengranite dann Mischgesteine, wenn sie nicht nur aus granitischen, sondern aus verschiedenen Gesteinen entstanden sind, die ihrerseits schon als Migmatite gebildet worden sein können. Es ist oft schwer, oder gar nicht festzustellen, meist nur durch Reliktgefüge oder Relikte von nicht mehr ganz aufgeschmolzenen Anteilen aus dem früheren Zustand, ob ein solcher Palingengranit vorliegt, oder ein simatisches Differentiationsprodukt, oder ein Assimilationsgranit. Auch durch Wärmeausstrahlung einer aufdringenden Schmelze kann leicht verflüssigbarer Anteil irgend eines Sialgesteines aufgeschmolzen werden. Bei der Anatexis (Aufschmelzung) kann auch nur der leichtest-schmelzbare Anteil sialischer Gesteine herausgeschmolzen werden (selektive Mobilisation). Es gibt also Einschmelzung, Aufschmelzung und Ausschmelzung. Vor allem der Palingenese kommt im Bereich neuerer Vorstellungen über die Granitbildung, besonders beim syntektonischen Magmatismus, größere Bedeutung zu. Es ist anzunehmen, daß diese Prozesse der Tiefe mehr oder weniger zusammenwirken und nicht immer von einander getrennt werden können. Alle so entstandenen Schmelzen können, besonders in Orogenstadien, nach oben dringen (mobilisiert werden), auch Intrusionen der verschiedensten Art bilden und das

Nebengestein durch Kontaktbildungen ebenso wie ein eindringender Differentiationsgranit verändern, wenn sie dazu genug reaktionsfähig sind.

Diese Vorgänge aber wurden zur Zeit der allgemeinen Annahme der Granitbildung durch selektive, gravitative, komplexe Kristallisationsdifferentiation als nebensächlich angesehen, die da und dort einmal vorgekommen sein mögen, aber für die Bildung der granitischen Gesteine in den großen Massiven keinerlei Bedeutung besäßen.

Recht bald schon nach der extremen Verallgemeinerung dieser Lehre für die Bildung aller granitischen Gesteine der Erde, begannen da und dort Einwände aufzutauchen, die, wie gewöhnlich, zuerst wenig beachtet wurden und erst längere Zeit brauchten, um in den Vordergrund zu dringen. Das war auch dadurch bedingt, daß diese Anschauungen kaum in das altgewohnte und doch auch liebgewordene Schema vom Ablauf der Granitbildung einzubauen waren. Die Stichhaltigkeit der gemachten Einwände war aber nicht abzuweisen. Trotzdem, oder eben deshalb wurde immer noch ausgeführt, daß diese Einwände zwar prinzipiell richtig seien, daß aber die Vorteile der fast ausschließlichen Annahme von Kristallisationsdifferentiation noch viel größer seien. Sehr erschwert wurden die neuen Anschauungen dadurch, daß es auch zu allzu extremen, allzuwenig fundierten Behauptungen kam, die als völlig unbeweisbar, leichter abzutun waren, wo-

bei auch andere gemäßigtere Anschauungen leiden mußten. Auf diese extremen Anschauungen soll hier nicht näher eingegangen werden.

Zwei Einwände stehen im Vordergrund, die Art der Platznahme der durch Kristallisationsdifferentiation neugebildeten granitischen Gesteine (*mise en place*) in den schon vorhandenen Gesteinsmassen und die Mengenverhältnisse der aus dem Schmelzfluß in der großen Erstarrungsgesteinsmasse neugebildeten basischen Gesteine zu den sauren granitischen.

Die Vorstellung, daß eine simatische Schmelze, die nach der Bildung basischer Gesteine durch Kristallisationsdifferentiation nur mehr die saureren, also die granitodioritischen Anteile enthält, in eine bereits vorhandene Serie anderer, jedenfalls älterer verschiedenartiger Gesteine eindringen kann, ist dann einigermaßen verständlich, wenn diese aufsteigende Schmelzmasse gegenüber den bereits vorhandenen Gesteinen keinen allzu großen Raum beansprucht. Da sich dieser Prozeß in der Tiefe vollzieht, ist ein Beiseiterücken, ein Platzmachen für das werdende neue Gestein in größerem Ausmaß wohl auch dann kaum vorstellbar, wenn der ganze Vorgang sehr lange gedauert hat. Wenn aber diese von unten nach oben aufdringenden Massen große geologische Körper darstellen, dann drängt sich doch die Frage auf, wohin denn das gekommen ist, was früher da war. Wenn es sich dabei aber gar um

Riesenmassen handelt, was dann? Es sollen als Beispiel nicht ganz alte präkambrische Gebirge und deren Gesteine herangezogen werden, sondern junge. Nach *Gerths* Forschungen reichen in der Westcordillere Mittelperus alpidische (Oberkreide bis Jungtertiär) granitische Gesteine über 6 Breitegrade, sie verdrängen mesozoische Sedimentgesteine. Ein bloßes Eindringen in solcher Menge wäre wohl eine völlig abwegige Annahme. Die Ansicht, daß bei diesen enormen Dimensionen das Emporgehobene (es handelt sich ja um Vorgänge in der Tiefe) und Beiseitegeschobene heute schon durch Erosion völlig entfernt worden wäre, kann wohl nicht geäußert werden, wo wären die ungeheuren Erosionsmassen hingekommen? In weit bescheidenerem Ausmaße gilt dies z. B. auch für unseren Zentralgneis, dem Tauerngranit, wie man ihn jetzt gewöhnlich nennt. Eine Bildung durch anatektische Aufschmelzung (Palingenese) wäre viel leichter vorstellbar, wie es für den Fall der peruanischen Cordillere auch angenommen wird. Hierbei wird es kaum zu einer Raumvergrößerung irgendwie größeren Ausmaßes kommen müssen.

Ebenso berechtigt ist die Frage nach dem Mengenverhältnis. Nehmen wir an, daß sich eine so riesengroße Masse wie die Granitgesteine der Cordillere Perus, oder bedeutend kleinere, wie unser s. g. Tauerngranit vom Hafner im O bis zur Brennerfurche im W, von dem wir auch heute noch nicht

wissen, welche Anteile der varistischen (Oberkarbon) oder der alpidischen Orogenese zugehören, als restliche Differentiationsprodukte aus einer angenähert basaltischen (simatischen) Schmelze gebildet habe. Wo sind die vorher gebildeten basischen Gesteine, die sich nach der Theorie einer Entstehung durch die Kristallisationsdifferentiation gebildet haben müssen? Vielleicht sind sie in die Tiefe abgesunken. Dazu war ihre Menge viel zu groß. Denn man kann das gegenseitige Mengenverhältnis aus dem Mineralbestand, der chemischen Zusammensetzung der angenommenen Schmelze, aus dem, was uns die Erstarrungs-Kristallisationsversuche aus einer derartigen künstlichen Schmelze im Laboratorium zeigen, errechnen. Selbst wenn man annimmt, daß ein Teil der basischeren Bestandteile mit in die granitischen Gesteine gekommen sei, die z. T. Granodioritgesteine sein können, so beträgt die Menge der vor der Bildung der granitischen Restgesteine aus der Schmelze notwendigerweise festgewordenen basischen Gesteine ein Vielfaches der sauren. Es müßten also enorme Mengen in die Tiefe abgesunken sein, die man nirgends feststellen kann, denn je tiefer wir in unsere Kruste eindringen, umso geringer wird der Anteil an basischen Gesteinen. Ja, diese Mengen basischer Gesteine werden deshalb noch größer angenommen werden müssen, weil von den sauren, die nicht in die Tiefe abgesunken sind, ein nicht abzuschätzender Anteil heute schon durch

Erosion entfernt worden sein dürfte. Ich nahm das Verhältnis basischer Gesteine zu granitischen mit 10 : 1 an. Dieses ja nur beiläufig geschätzte Verhältnis konnte im Sinne des Aktualitätsprinzipes, in der Natur überprüft werden. In der kleinen Gesteinsprovinz Predazzo-Monzoni im ehemaligen Südosttirol, von der schon gesprochen wurde (S. 114), sind die Gesteine so gut aufgeschlossen und untersucht, daß man sie, natürlich nur soweit es unser Tagesschnitt des Aufgeschlossenen zuläßt, in ihrem Mengenverhältnis überblicken kann. Es gibt auch eine gute geologische Karte von diesem Gebiet, das ich aus wiederholten Begehungen und eingehenderen Untersuchungen kenne, das eine ungestörte echte Differentiationsreihe vom ultrabasischen Gestein bis zu saurem Granit zeigt, wie man sie schöner nicht finden wird. Diese Tiefengesteinsserie ist tertiären Alters. Das Ausgangsmaterial war entweder neuerdings emporgedrungene basaltische Schmelze, deren Ergußgesteine in diesem Gebiete aber auch noch weiter entfernt, z. B. auf der Riesenfläche der Seisser-Alpe und ihrer Umgebung, große Verbreitung besitzen. Das sind ältere basaltische Gesteine der unteren Trias (Anisien), z. T. als basischere Melaphyre, z. T. als etwas an Kieselsäure reichere Labrador- und Augitporphyrite auskristallisiert, die in ihrer Gesamtheit durchaus dem angenommenen Sima entsprechen, die in der Trias Südosttirols Ströme und Vulkane (Buffaure, Mte. Mulatto) bil-

deten. Oder es handelt sich um wieder mobilisierte, durch tektonisches (geosynklinales) Absinken im Tertiär verflüssigte tiefere Teile, dieser basaltischen Gesteine, was mir wahrscheinlicher erscheint. Brüche, die dieses Absinken anzeigen, sind durch Albr. *Penk* festgestellt. Nach der Bildung dieser basischen Ergußgesteine im Anisien sedimentierte im ganzen Mesozoikum die gewaltige Masse der Fassaner und Grödener Dolomitgesteinsmassen, die in der Marmolata ihren höchsten Punkt erreichen (wenigstens für unseren heutigen Tagesschnitt). Als nun zur Tertiärzeit wieder basaltische Schmelze aufdrang, konnte sie wegen dieser mächtigen Auflage nicht mehr an die Oberfläche gelangen. Sie blieb in den überlagernden Gesteinen, aber auch im alten basischen Ergußgestein als ein kleiner tertiärer Pluton stecken, und es konnte eine Tiefengesteinsserie durch langsame Differentiation entstehen. Seit der Bildungszeit dieser Tiefengesteine ist ein großer Teil der Sedimentgesteine der Fassaner Dolomiten, der alten basischen Ergußgesteine aber auch ein Teil der jüngeren Tiefengesteine durch die Erosion wieder entfernt worden. Dadurch ist der Einblick in diese abwechslungsreiche Gesteinswelt möglich geworden. Die Gesteine dieser Differentiationsreihe umfassen: Pyroxenit, Gabbro, Monzonit, Syenit (mit Nephelinsyenit) und Granit. Die Hauptmasse, ca. 80%, bildet der Monzonit mit seinen bei weitem überwiegenden basischeren Abarten (Labrador-,

Augitmonzonit). Monzonit ist der Vertreter der Diorite in dieser mediterranen Alkaligesteinsreihe. Die Hauptmasse dieses Monzonites liegt am basischen Ende seines Zusammensetzungsbereiches. Er ist daher den basischen Differentiationsprodukten zuzuzählen. Der ultrabasische Pyroxenit tritt nur im Monzonistock etwas reichlicher auf, der Gabbro setzt größere Teile des Monzonistockes zusammen, der aber hier auch aus stellenweise etwas an Kieselsäure reicheren Monzonit (im Gegensatz zum Monzonit von Predazzo) besteht. Der Syenit, der chemisch dem saureren Monzonit gleichzusetzen ist, und der rote Granit treten an Menge gegen den Monzonit vollkommen zurück. Man kann den Granit mit höchstens 10% annehmen. Dabei ist es nach *Vardabasso*, von dem die Kartierung stammt, durchaus möglich, daß der Granit gar nicht mehr echtes Differentiationsprodukt der basaltischen Ausgangsschmelze, sondern vom mobilisierten Basalt eingeschmolzener und so in die Schmelze geratener permischer Quarzporphyr ist, der allenthalben in unmittelbarer Nähe des alten triadischen Basaltes liegt. Hier sind die Verhältnisse durchaus klar, soweit man Gesteinsmassen mengenmäßig nach dem sichtbaren Tagesschnitt abschätzen kann.

Unter der peruanischen Cordillere müßte demnach die etwa zehnfache Menge basischer Differentiate liegen. Nimmt man das gesamte Sial als Differentiationsprodukt des Simas an, dann müßte im

Vergleich zum Sial die zehnfache Menge basischen differentiationsunfähigen Gesteins, Glas oder Schmelze zwischen dem noch differentiationsfähigem Sima und dem Sial liegen, ein basischer (z. T. ultrabasischer) Gürtel von mindestens 200 bis 300 km Stärke. Das würde alle Vorstellungen vom Verhalten des Sials zum Sima unmöglich machen, die wir für die Granitbildung benötigen. Neben den granitischen Massen im Sial liegen sie nicht, denn sonst müßte das Sial zu neun Zehntel aus basischen und nur zu einem Zehntel aus granitischen Gesteinen bestehen. Dies gilt auch für die Cordillere Perus.

Das sind die Hauptgründe dafür, daß man sich heute immer mehr und mehr der Ansicht von der Granitbildung durch Anatexis-Palingenese oder durch Sial-Assimilation zuwendet und diese Vorgänge in den Vordergrund stellt.

Es gibt aber noch andere Beobachtungen, die z. T. schon sehr alt sind, aber anscheinend vergessen wurden, weil sie ganz und gar vereinzelt blieben, wonach aus irgend einem vorgebildeten Gestein, auch Sedimentgestein, ein granitisches entstehen kann, ohne daß es dabei zu einer tatsächlichen Ein-Auf-Umschmelzung gekommen wäre. Man hat neuerdings beobachtet, daß ein Sedimentgestein, z. B. ein Konglomerat, das aus verkitteten Geröllen und einer Kittsubstanz besteht, die verschiedenste Zusammensetzung haben können, also aus zwei Körperarten be-

steht, in ein granitisches Gestein umgewandelt ist, und man kann Übergänge feststellen. Im neugebildeten Gestein sind noch als deutlich abgehobene Bereiche die Umrisse der ehemaligen Gerölle erkennbar, wenn auch das neugebildete Gestein ganz anders zusammengesetzt ist. E. Wegmann, einer der ersten, die sich mit Erfolg gegen die absolute Verallgemeinerung der Entstehung aller granitischen Gesteine durch Kristallisationsdifferentiation wandten, hat solche Umbildungen beschrieben und bei seinen Vorträgen im Bilde gezeigt. Aber auch basischere Gesteine, z. B. Grünschiefer, können in Granitodiorite übergehen. Diesen Übergang eines Grünschiefers, der in früherer Zeit aus einem Sedimentgestein zum Metamorphit Grünschiefer geworden war, durch allmählich steigenden Feldspatgehalt (Feldspatisierung) zum Granit, hat Wegmann von Hamnholmen in Finnland im Bereich von Helsinki beschrieben und abgebildet. Man kann die allmählich immer reichlicher gewordene Feldspatbildung verfolgen und beobachten, daß im neugebildeten Granit stellenweise die ursprüngliche Gefügestalt noch „nebelhaft“ erhalten geblieben ist. Solche Gesteine mit noch erkennbarem ursprünglichen Gefüge nannte man *N e b u l i t e*. Ich sah solche nebelhafte Gefügerelikte z. B. auf der glatten, flachen Oberseite von großen Blöcken granitischen Gesteines aus unzugänglicher Wand im mittleren Teile des vom Großvenediger nach S schauenden Dorfertales in Osttirol

unter der Johannishütte. Die Blöcke waren leider nicht zu photographieren. Auch Übergang von Phylliten und Tonschiefern in Granitgesteine ist schon früher beobachtet worden. Der Schwede *Sederholm* hat schon vor längerer Zeit festgestellt, daß altbekannte s. g. Durchäderungsgesteine in Granite übergehen. Verschiedenartige Gesteine, auch solche, die von Sedimenten abstammen, sind mit feinkörnigen weißen Adern und Äderchen aus Quarz und Feldspat (Kalifeldspat, Albit) also Hauptbestandteilen des Granites, gröber bis ganz feinst durchädert. Diese Durchäderungssubstanz kann z. B. *Aplit* sein, ein feinkörniges Ganggestein, das als Restbildung bei jeglicher Art von Granitgesteinsentstehung angenommen, als selbständiges Ganggestein von großer Verbreitung ist, in seiner mineralogischen Zusammensetzung ein an SiO_2 reichstes Gestein der Granitreihe. Nicht nur in Skandinavien sind solche Arterite und Venite genannte Durchäderungsgesteine, die durchaus nicht immer zur Bildung granitischer Gesteine führen, häufig. Im Ankogel-Gebiet unserer Tauern und in manchen Tälern, die vom Großvenediger nach N in den oberen Pinzgau führen, so im Hollersbachtal, Habachtal und im Unteren Sulzbachtal, sind sie bekannt (*Kölbl, Angel*). Viele Forscher, in neuerer Zeit z. B. der Finne *Eskola*, haben den Übergang dieser Durchäderungsgesteine in granitische Gesteine beschrieben. Sie sind somit Migmatite, deren Bestandteile, auch räumlich getrennt,

nebeneinander auftreten können und uns zeigen, aus welchen Bestandteilen solch ein Migmatit gebildet ist, und wie er — in diesem Falle — entstanden ist, obwohl man sie weder als Einschmelzgesteine (Assimilationsgesteine), noch als Aufschmelzgesteine (palingene Gesteine) bezeichnen kann, da es hier überhaupt zu keiner eigentlichen, beweglichen, selbständigen Schmelze (Migma) gekommen ist. Granitische Schmelzen, Schmelzlösungen, die aus der Tiefe aufdringen und in andere Gesteine eindringen, wandelten also diese letzteren Gesteine ganz allmählich zu Graniten um, metamorphosierten sie. Dies ist ein Analogon zu Prozessen der Umwandlung anderer Mineralien zu Erzen, den man schon längst aus der Lehre von den Erzlagerstätten kennt und dort *Metasomatose* genannt hat, Prozesse, die nicht auf die Vererzungen beschränkt sind. Der große schwedische Forscher *V. M. Goldschmidt*, der lange in Göttingen wirkte, hat die allgemeine Verbreitung metasomatischer Prozesse erkannt, und folgende grundlegende Formulierung für die Metasomatose gegeben: Sie ist ein Prozeß, bei dem Substanz zugeführt wird, wobei die Bindung oder Anreicherung dieser zugeführten Substanz durch bestimmte chemische Reaktionen charakterisiert ist, an denen ursprüngliche und neugebildete Mineralien teilnehmen. Vermittlerin der Neubildung ist die wässerige oder schmelzflüssige Lösungsphase, aber auch die Dampfphase, sowie Diffusion im festen, kristalli-

sierten Zustand. Es handelt sich somit um einen Umwandlungsvorgang von Kristallbaustein zur Kristallbaustein. Solche Umwandlungsvorgänge führen auch zur Bildung kristalliner Schiefer, z. B. von Gneisen. Aus Tonschiefern und Phylliten wurden unter Zufuhr von Natrium Albitgneise, Vorgänge, die sich bis ins Detail an verschiedenen Stellen der Erde verfolgen lassen. Eine solche Metasomatose und zwar eine allergrößten Stiles ist die im Vorstehenden beschriebene metasomatische Granitbildung. Die umwandelnden Lösungen dringen in die feinsten Zwischenräume, zwischen die Korngrenzen der Gesteinsbestandteile, in die feinsten Spaltrisse oder Sprünge irgendwelcher Art und von diesen aus reagieren sie mit dem alten Gestein. Die Bedeutung dieser feinsten Kapillaren hat man erst in neuerer Zeit erkannt, auf ihr beruhen viele Umwandlungsvorgänge im Bereich der Mineralien und Gesteine, sie vermitteln eindringenden Lösungen jeglicher Art die Wege, sie zeigen ihnen die Wegsamkeitsrichtungen. *Sander* hat sie beim genialen Bau seiner Gefügekunde in den Vordergrund gestellt. Bei der Bildung der kristallinen Schiefer bilden sie nach unseren heutigen Anschauungen eine ebenso große Rolle, wie bei der Granitbildung. Man hat das System dieser zusammenhängenden feinen und feinsten Grenzen und Risse im Gestein als die *I n t e r g r a n u l a r e* bezeichnet. Den Vorgang solcher Umwandlungen ganz großen Stiles selbst können wir natürlich

nur aus den erzielten Produkten ableiten, manchmal im Dünnschliff den Ablauf der Reaktion in Zwischenstadien beobachten. Restgefüge des umgewandelten Gesteines, seltener erhaltene Restsubstanz kann man manchmal mit dem Mikroskop, selten mit freiem Auge erkennen (Nebulite). Diese ermöglichen dann bei der Untersuchung des neugebildeten Gesteines (Neosom) Schlüsse auf die Natur des umgewandelten alten Gesteines (Paläosom) zu ziehen, wenn der Umwandlungsprozeß zur Gänze erfolgt ist und vom Paläosom nichts mehr vorhanden ist. Solche große umgewandelte Gesteinsserien enthielten wohl auch Karbonate, die bei Auf- und Einschmelzungsprozessen von der Schmelze aufgenommen wurden, bei der metasomatischen Umwandlung aber nicht immer ganz verarbeitet werden konnten, sodaß oft mitten im Migmatitgestein noch Kalkstein-Reste als Marmor oder Kalksilikate erhalten sind ¹³⁾. So entstandene Granitodioritgesteine sind natürlich auch Migmatite.

An vorderster Stelle steht natürlich die Frage nach der Zusammensetzung der Lösungen, welche die metasomatische Umwandlung hervorgerufen haben und nach deren Herkunft. In den Hohen Tauern und

¹³⁾ So fand ich in Blöcken des innersten Habachtales im Habachkees solche Reste, und es gelang, ein Handstück zu schlagen, das auf der einen Seite aus Marmor, auf der anderen aus Migmatitgestein besteht (geschlagen von W. Siegel).

auch anderswo in den Alpen, aber auch in vielen anderen Gebieten dürften es aplitische Schmelzen gewesen sein, die keine sehr hohe Temperatur hatten, vielleicht auch schon viel Wasser enthalten haben mochten, so daß sie nicht mehr als echte Sili-catschmelzen, sondern als Mittelding zwischen ihnen und wässerigen Lösungen angenommen werden können. Solche Aplite, reich an Albit, kennt man im ganzen Bereich der Hohen Tauern an vielen Stellen, an denen sie nicht als Durchäderungen, sondern in etwas breiteren Gängen in die Nebengesteine eindringen und manchmal in Quarzgänge übergehen, Zeugen dafür, daß es sich dabei schon um wässrige, wahrscheinlich hydrothermale Lösungen handelte. Andere Forscher in anderen Gebieten nehmen rein granitische Schmelze verschiedener, z. B. palingener Entstehung als umwandelndes Agens an. In vielen Fällen muß man aber doch voraussetzen, daß diese Lösungen saurer, also reicher an Kieselsäure, ebenso reicher an Alkalien gewesen sein mußten als gewöhnliche Granite, sollen sie im Stande sein, auch aus irgend einem basischeren Gestein, wie etwa die erwähnten Grünschiefer von Hamnholmen, einen Granit zu machen. Man sprach daher von durchaus theoretischen Tiefenlösungen, die aus der Tiefe aufsteigen und eine Art Destillate (Ausschwitzungen) aus anderen Gesteinen der Tiefe darstellen. Dies wäre etwa so zu verstehen. Bei der Abfolge der Mineralbildung durch Kristallisationsdifferen-

tiation in auskristallisierendem Granitgestein wird angenommen, wie schon ausgeführt wurde, daß zuletzt Kalifeldspat, bzw. Natronfeldspat, als der sauerste Feldspat auskristallisiert (er hat den niedrigsten Kristallisationspunkt, bzw. Erstarrungspunkt und Schmelzpunkt), was mit den Erfahrungen an den Silicatschmelzen im Laboratorium in Einklang stünde. Es müßte dann auch aus einem bereits auskristallisierten basischeren Gestein, als es der Granit ist, bei Temperaturen, bei denen nicht das ganze basische Gestein zur Aufschmelzung kommen kann, zuerst das letzte Erstarrungsprodukt dieses Gesteines verflüssigt werden. Also der sauerste Teil der Feldspäte, die Kieselsäure, ob sie nun als Quarz oder Glas vorlag, müßten bei einer Erwärmung (Wärmezufuhr), zuerst flüssig (mobilisiert) werden. Dies könnte auch bei der Erhitzung simatischer Gesteine, z. B. auskristallisierter, festgewordener simatischer Anteile der Fall sein. Dieser Vorgang setzt eine Erwärmung voraus, die nicht imstande war, diese festen Anteile des Simas zur Gänze zu mobilisieren, also eine Art selektiver Aufschmelzung in der Tiefe. *Eskola* nahm dies an der Grenze von Sima und Sial an und bezeichnete so entstandene Tiefenlösungen, reich an Kieselsäure und Alkalien (Destillate, Ausschwitzungen) als *Porenlösung*, die gewissermaßen das Sima mit dem Sial verbinde. Diese Lösung kann granitische bis aplitische Zusammensetzung haben. In unseren

Alpen wurde besonders von *Angel* und *Exner* angenommen, daß bei der alpidischen Orogenese in manchen Gebieten und zu Zeiten der synorogenen Hauptphase bei der Granitbildung nur solche Temperaturen herrschten, die man rein schätzungsweise mit ca. 500° angenommen hat. Diese Annahme beruht auf der Bildungstemperatur als neugebildet erkannter Mineralien, denen man für ihre Entstehung keine höheren Temperaturen zubilligt.

Aus granitischen Gesteinen der varistischen Orogenese, die zur Zeit der alpidischen Orogenese in größerer Tiefe lagen und durch diese Orogenese in das Bereich höherer Temperaturen kamen, wurden in der Tiefe nur die niedrigst schmelzenden Anteile flüssig (mobilisiert). Sie drangen nach oben und verwandelten verschiedenartige Gesteine der Schieferhülle, darunter reichlich sedimentogene Gesteine, metasomatisch in Granitodioritgesteine. Während z. B. *Angel* die Hauptmasse aller granitischen Gesteine des Hochalmspitz-Ankogel-Gebietes so gebildet annahm, hat dies *Exner* im selben Gebiet nur für einen viel kleineren Teil granitodioritischer Gesteine getan. Man könnte freilich auch daran denken, daß diese Aplite Restlösungen von alpidischen Granitneubildungen (z. B. durch Palingenese) bei höheren Temperaturen in noch größerer Tiefe sein könnten, die als besonders leichtflüssig höher hinauf gelangt seien.

Dieser Vorgang ist aber nicht auf die alpidische Orogenese beschränkt. Auch im Gesamtbereich der varistischen Orogenese im Oberkarbon, daher auch im Bereich der Alpen, somit auch der Hohen Tauern, kann man solche Vorgänge annehmen, bei denen es zur Teil-Mobilisierung in noch älteren (kaledonischen) Gesteinen gekommen ist.

Für diese Lösungen, welchen Ursprungs sie auch immer sein mögen, wird vielfach der Name *Ichor* in der Literatur gebraucht, für den Vorgang der Umwandlung zu granitischem Gestein der Name *Ichorese*¹⁴⁾. Auch die Bezeichnung Granitisation wird für diese Art der Granitbildung verwendet, die aber zu allgemein gehalten ist und heute immer mehr für alle Arten der Granit-Umbildung aus einem vorgebildeten Gestein in Gebrauch ist. Mit Recht hat der Granitforscher *Read* gesagt: *Granitisation* ist der Sammelname für alle Vorgänge, durch die aus einem anderen Gestein ein granitisches entsteht. Besser ist für diese metasomatische (ichoretische) Umbildung der besonders in Amerika viel gebrauchte Name *Transformismus*. Die Anhänger dieser Lehre haben sich selber *Transformisten* genannt, teils als Ehrenname ge-

¹⁴⁾ *Ichor* = Götterblut. So ist im griechischen Text des 5. Gesanges der *Ilias* das Blut der *Aphrodite* genannt, das aus der Wunde fließt, die ihr *Diomed* mit dem Speer an der Hand zugefügt hat, als sie ihren verwundeten Sohn *Aineias* vor *Diomed* bergen wollte (Vers 341).

dacht, zuerst aber noch mehr von den Gegnern zu gutgemeintem Spott gebraucht ¹⁵⁾. Für Transformismus spricht u. a. auch die Kristallisation des Quarzes in Erstarrungsgesteinen. Die Granitgesteine enthalten den Quarz als Körnermasse (Körner-Pflaster) zwischen den anderen Bestandteilen und als nachweisbar letzte Bildung, was zur Annahme zwingt, daß der sehr hoch schmelzbare Quarz, der sich daher früh verfestigen müßte, bei einer solchen frühen Auskristallisation nicht beständig sei, daß er wieder aufgelöst und bis zuletzt im Schmelzzustand erhalten bliebe, erst kristallisiere, wenn alles Übrige fest geworden ist. Dafür kann auch die Annahme der pegmatitischen oder aplitischen Restbildungen bei der Kristallisationsdifferentiation sprechen, wenn diese wirklich immer aus Restlösungen entstanden und nicht auch Ausschmelzungen sind. Die anderen Bestandteile der Tiefengesteine bilden sich im großen und ganzen in der Reihenfolge ihrer Schmelz-, bzw. Erstarrungspunkte. Man hat für dieses Verhalten des Quarzes eine Erklärung in der Menge fluiden (gasförmig-flüchtiger) Bestandteile in der Schmelze gesucht, vor allem von Wasserdampf, der ja schon in der simatischen Schmelze, wie die Vulkane zeigen, in großer Menge vorhanden ist. Erst wenn der Wasserdampf zu Wasser geworden ist, die Lösung keine reine Silicatschmelze mehr

¹⁵⁾ Ein ganz kleines Pendant zur Bezeichnung Geusen.

ist, sondern ein mittlerer Zustand zwischen einer solchen und einer wässerigen Lösung geschaffen ist, dann könne der Quarz kristallisieren. Aber der in der Tiefe gebildete intratellurische Anteil der sauren Ergußgesteine, wie der alte Quarzporphyr, der jüngere Liparit, aber auch der etwas an Kieselsäure ärmere Dazit enthalten recht reichlich große und z. T. sogar wohl ausgebildete Quarze als erste Auskristallisierung. Er hat sich also da unten in der gleichen Tiefe, wie die Tiefengesteine und wohl auch unter den gleichen Bedingungen recht gut als erste Ausscheidung halten können. Man müßte annehmen, daß die Räume, aus denen sich, zumeist wohl auch durch Differentiation in der Tiefe die sauren Ergußgesteins-Tiefenanteile gebildet haben, nicht die gleichen waren, wie die, in denen die Tiefengesteine entstanden sind, denn Quarzporphyr geht nirgends eindeutig nachweisbar in größerer Tiefe in Granit über, wie auch Basalt nicht in Gabbro. Es ist aber doch kein Grund für eine so einschneidende andere Verteilung der fluiden Bestandteile vorhanden¹⁶⁾. Der Quarzporphyr kann sowohl letztes Differentiat einer basaltischen (simatischen) Schmelze sein, er kann aber auch gleich dem Granit z. B. einer Auf-

¹⁶⁾ Unterschiede im Wasser(dampf)gehalt könnten darin gefunden werden, daß in manchen Räumen der Tiefe durch Aufschmelzung oder Einschmelzung sehr wasserreichen (feuchten) Nebengesteins der H₂O-Gehalt besonders groß geworden wäre.

schmelzung von Sial seine Entstehung verdanken, die zum Unterschied vom so gebildeten Granit den Weg an die Oberfläche fand, dorthin ihre intratellurisch auskristallisierte Phase (vgl S. 99) brachte und als Ergußgestein völlig fest wurde. Aber die *Tiefenlage* der auskristallisierten intratellurischen Phase mit ihren großen Quarzkristallen als Einsprenglingen kann kaum viel von der der Auskristallisierung der Granitminerale verschieden sein, denen größere gut ausgebildete Quarzkristalle fehlen. Die Auskristallisierung der Quarzeinsprenglinge im Quarzporphyr erfolgte gleichzeitig mit Einsprenglingen von Kalifeldspat, während sich diese im Granit vor den Quarzkörnern gebildet haben. Man nimmt heute auch vielfach an, daß der Quarz der granitodioritischen Tiefengesteine überhaupt nicht zur Tiefengesteinsfazies und nicht zur Erstarrungsphase gehört, überhaupt kein primärer Bestandteil des Granites sei, sondern daß er erst später auf wässerigem Wege in die Gesteine längs der Intergrannulare eingedrungen sei und metasomatisch auch Feldspatanteile verdrängt habe. Es sind Beispiele gebracht worden, die für diese Möglichkeit sprechen und die Verdrängungen zeigen (*Drescher-Kaden*). Für die Transformisten besteht diese Schwierigkeit nicht, denn das ganze Gestein wird metasomatisch entstanden angenommen.

Ein Teil der Forscher ist aber noch weiter gegangen, sie benötigten zu dieser Transformation keine

eigentlichen Lösungen, sondern nehmen von der Intergranulare ausgehend, Reaktionen im festen Zustand durch Diffusion an, also eine Metasomatische im festen Zustand, deren Möglichkeit ja schon *Goldschmidt* angenommen hat. Reaktionen im festen Zustand sind zu bekannt, um darüber etwas zu sagen. Man muß solche durch Temperaturerhöhung ganz wesentlich geförderte Reaktionen, welche die zahlreichen Leerstellen, Lockerstellen im Kristallgitter und die Fehlbaustellen benützen, ohne weiteres zugeben. Manche Kontakterscheinungen, die wir als Reaktionen von heißem Gestein im Schmelzfluß oder nur durch die Hitzewirkung (Thermometamorphose) im Nebengestein bei Tiefengesteinsbildungen annehmen, die eine eigene Paragenesis der Kontaktmineralien liefert¹⁷⁾, werden heute von manchen Forschern als Reaktionen im festen Zustand gedeutet. Durch tektonische Bewegungsvorgänge nebeneinander verlagerte Gesteine verschiedenartiger mineralischer und chemischer Zusammensetzung könnten nach dieser Annahme in sehr langen Zeiträumen des Nebeneinanderliegens unter Mineralumbildung und Neubildung mit einander reagieren. Auch bei der Bildung kristalliner

17) Die Mehrzahl typischer Kontaktmineralien (z. B. Grossular-Granat, Vesuvian, Gehlenit u. a.) sind heute auch schon in anderen als Kontaktvorkommen nachgewiesen, so daß dann fast nur noch der Wollastonit als Kontaktmineral gelten könnte.

Schiefer denkt man an Diffusion im festen Zustand. Ob es aber möglich ist, so großräumige Metasomatosen, wie es die Granitbildung ist, auf diese Weise zu erklären, ist doch noch fraglich. Von vornherein aber dürfen solche Ansichten des „Trockenen Transformismus“ keineswegs abgelehnt werden. Wenn freilich vereinzelte Forscher alle Granitgesteinsbildungen auf diese Weise entstanden sein wissen wollen, muß dies als ein Produkt der Phantasie bezeichnet werden, wenn auch in der Wissenschaft schon des öfteren die Phantasie schließlich recht behalten hat. Diese Annahme der Granitbildung wird mit dem Raumproblem noch leichter fertig, als die „Nassen Transformisten“.

Auch das Problem der Gneisbildung ist mit in die neuen Vorstellungen von der Granitbildung einbezogen. Man erkannte schon seit längerer Zeit, daß manche Gneise kaum von Graniten auseinanderzuhalten sind, daß es „Fastgranite“ unter ihnen gibt. Die Gneise teilte die klassische Petrologie in Orthogneise, von denen angenommen werden konnte, daß sie vorwiegend durch mechanischen Einfluß von Druck unter entsprechend erhöhter Temperatur aus granitodioritischen Gesteinen entstanden sind und in die Paragneise ein, die durch Druck und Temperaturerhöhung aus Sedimentgesteinen mit granitnaher Zusammensetzung umgebildet sind, was man in der Natur an vielen Stellen direkt beobachten kann. Der Weg vom Tonschiefer zum Phyllit,

Glimmerschiefer und schließlich Paragneis ist zu sehen. Ein weiter und dorniger Pfad führte dahin, daß es heute zu der zwar keineswegs allgemeinen, aber doch schon sehr verbreiteten Annahme gekommen ist, daß dieser erste Weg der einfachen mechanischen Umformung eines Tiefengesteines zum Orthogneis entweder überhaupt nicht besteht, oder doch nicht mehr in den Vordergrund zu stellen ist, während der Weg vom Sedimentgestein zum Gneis insoferne Bereicherung erfahren hat, als man einen sehr großen Teil der Orthogneise ebenso wie der Granitodiorite aus Sedimentgesteinen entstanden annimmt, daß der Weg vom Sedimentgestein zum Granit über den Gneis führen kann. Das besagt, daß durch die Granitisation im Sinne von *Read* auch aus einem Sedimentgestein, das sehr oft eine dem Granit nahe Zusammensetzung haben kann, aber auch aus solchen, die ihm ferner stehen, ein Granitodioritgestein mit Tiefengesteinsgefüge wird, daß unter Druck aber ein Gneis ¹⁸⁾ der gleichen Zusammensetzung mit mehr oder weniger deutlichem Schiefergefüge, also Parallelgefüge mit gerichteten, eingeregelter Bestandteilen entstehen kann, denn das sind ja die sichtbaren äußeren Unterschiede von Ortho-

¹⁸⁾ Dazu können bei solchen Gneisen noch manchmal nur unter Druck gebildete Mineralien hinzukommen, die in den verschiedenen Tiefenstufen (Becke, Grubemann) charakteristisch, nach Eskolas Fazieslehre kritisch oder typomorph sind.

gneis und Granit auch im alten, klassischen Sinne gewesen. Ist dieses Gefüge der Einregelung deutlich, dann kann man das Gestein als Gneis bezeichnen, ist es nicht vorhanden, dann als Granit. Dabei handelt es sich nur um eine äußere Erscheinungsform, genetisch können beide Gesteine vollkommen übereinstimmen. Ein typisches Beispiel: Die einen sagen Tauerngranit, Zentralgranit, andere, zu denen ich mich zähle, Tauerngneis, Zentralgneis. Wir meinen dasselbe Gestein und wissen das auch. Daß ein großer Teil der Tauerngneise und mit ihnen wohl der ganzen Welt die gleiche Entstehung haben wie s. g. echte Granite, das wußte schon um die Jahrhundertwende ein ganz großer Forscher, Ernst *Weinschenk*, dessen Ergebnisse aber von vielen, z. T. völlig bewußt, ignoriert wurden. Er nahm Gneisgefüge, also mehr oder minder sichtbar gerichtete, eingeregelter Bestandteile, auch bei Bildung granitischer Gesteine aus dem Schmelzfluß an, die während ihrer Auskristallisierung unter schwächerem oder stärkerem Druck standen¹⁹⁾. Der Weg Sediment → Sedimentgestein (verfestigtes Sediment) $\begin{matrix} \nearrow \text{Granit} \\ \searrow \text{Orthogneis} \end{matrix}$ ist heute ein allgemein

¹⁹⁾ Diese Annahme macht es verständlich, daß ein sehr großer Teil aller Granitodioritgesteine, besonders der ältesten Gebirge unserer Erde (vgl. S. 104) mehr oder weniger deutliches Parallelgefüge zeigen (Einregelung der mineralischen Bestandteile) und daher als Gneise bezeichnet werden können.

anerkannter. Da die Sedimente in unserem Sial zumeist durch die mechanische Zerstörung granitischer Gesteine entstehen, so haben wir hier einen ungeheuren, aber geschlossenen Kreislauf vor uns, wohl den größten, den es auf unserer Erde gibt. Diese Parallele Granit—Gneis ergänzt die großartige Lehre von den kristallinen Schiefern. Die Umwandlung von Sedimentgesteinen in Granitgesteine, die gesicherte Tatsache ist, bedeutet aber Ausrichtung zum Neptunismus hin, da die weit- aus meisten Sedimente durch Absatz aus dem Wasser entstanden sind. Dieser Kreislauf ist bestimmt durch den Wechsel von Gebirgsbildung und Erosion, der zumindest in den oberen Partien der Erdkruste seit den ältesten Zeiten ihres Bestehens eine stete und wiederholte Erneuerung des Sials durch Gebirgsbildung, Erosion und Granitgesteinsbildung bedingt.

Es wäre noch vieles über Vorteile und Nachteile unserer neuen Ansichten von den Möglichkeiten der Bildung granitischer Gesteine zu sagen. Z. B. daß die Annahme von Transformismus (Ichorese) manchmal die einzige Erklärung ist für den un- gemein raschen und kleinräumigen Wechsel, der oft auf wenige Meter im ganzen Gehaben, Gefüge, Zu- sammensetzung, Mineralverteilung besonders bei Granitgneisen, wie man die s. g. Orthogneise auch nennt, zu beobachten ist. Dieser Wechsel kann nicht

in verschiedener äußerer Beeinflussung liegen, die ja tektonisch bedingt, gleichmäßiger und großräumiger sein müßte, wohl aber in verschiedener Zusammensetzung des Ausgangssedimentgesteines oder anderweitigem Ausgangsgesteins. Manches wäre über die zur Granitisation nötigen Temperaturbedingungen zu sagen, sie sind in unseren Annahmen heute zweifellos niedriger geworden. Man hat ihre Bildung, das geht schon auf *Weinschenk* zurück, auch in höhere Stockwerke unserer Erdkruste verlegt. Es gibt epizonale (die oberste der Tiefenstufen im Sinne *Beckes* und *Grubenmanns* der Entstehung der kristallinen Schiefer) Granite und Granitgneise, ehemals ausgesprochene Stammgäste der untersten Zone. Wenn in neuerer Zeit auch sehr niedrige Temperaturen für die Granitbildung angenommen werden, so kann dies nur für die Ichorese (Transformismus) gelten. Es gibt Autoren, die annehmen, daß ein Tiefengestein auch bei Temperaturen nicht weit von 300° entfernt (und auch noch niedriger) entstehen kann, daß dies auch in der Tiefe von 2—3 km möglich sein soll. Ich möchte diese Zahlen heute nur als symbolisch dafür ansehen, daß wir jetzt nicht mehr mit den hohen Temperaturen der früheren Zeit zu rechnen brauchen, wie bei der ausschließlichen Annahme von Bildung durch Kristallisationsdifferentiation. Auch die s. g. „geologischen Thermometer“, die besonders im Bereich der Granitbildung verwendet wurden, waren

von dem Gedanken ausgegangen, daß die Bildung gewisser Mineralien, charakteristische Mineralumwandlungen, Reaktionen, die im Laboratorium bei meßbaren Temperaturen nachgemacht werden konnten, sich bei diesen auch in der Natur bei der Mineral- und Gesteinsbildung vollzögen. Sie haben heute manches von ihrer Bedeutung verloren. In der Tiefe unter Druck-Temperaturbedingungen, die wir zu wenig kennen, bei der großen Menge fluider Bestandteile, vor allem Wasserdampf, von denen wir wissen, daß sie alle Reaktionstemperaturen herabsetzen, könnte es anders zugehen, als in unseren Laboratorien. Auch das Verhältnis der reagierenden Mengen und der Reaktionszeiten ist ganz und gar verschieden. Eine geistreiche Frau und anerkannte Forscherin, schwer von einem der Begründer der damals noch allein giltigen Kristallisationsdifferentiation angegriffen, Doris Reynolds, rief einmal aus: „Muß denn das, was sich in einem kleinen Reaktionstiegel abspielt, in der Natur auch immer so vor sich gehen?“ oder so ähnlich. Wir wissen heute von der Wahrheit dieser Worte. Niemand darf die Ergebnisse aus Laboratoriumsversuchen, wie sie mit so großer Vorsicht und solchem Aufwande an möglichen Hilfsmitteln, etwa im Washington Carnegie-Laboratorium vorgenommen werden, unterschätzen, aber sie sollen auch nicht überschätzt werden. Treten Unstimmigkeiten zwischen den Ergebnissen der Untersuchungen im Felde und solchen im Laborato-

rium auf, dann haben im Sinne des Aktualitätsprinzipes die ersteren den Vorrang. Es gibt noch manche andere Unstimmigkeiten. Auch die neuen Vorstellungen von der Granitgesteinsbildung können die erste Bildung des Sials nicht erklären. Es sind zwar Anisichten geäußert worden, darunter ein geistreiches, großartiges Gedankenbild von dem hervorragenden Geologen und Vulkanologen *Rittmann*. Manches, nur in breiterer Darstellung Vorzuführende, wäre noch von den s. g. basischen Fronten oder vom Verhältnis der Granitbildung zu *Eskolas* Fazieslehre, die auf den Gesetzen der Gleichgewichtslehre aufzubauen versucht, zu berichten ²⁰⁾. Es soll aber in vollster Klarheit und durchaus unmißverständlich festgestellt werden, daß in keiner Weise an der Bildung basischerer Gesteine, als es die der Granitodioritreihe sind, durch Kristallisationsdifferentiation zu zweifeln ist, alle Einwände richten sich ausschließlich gegen die Verallgemeinerung dieser

²⁰⁾ Die Fazieslehre ist von großer Bedeutung für die s. g. Metamorphite, besonders für die kristallinen Schiefer, die aus Erstarrungsgesteinen und Sedimentgesteinen dadurch entstanden sind, daß sie durch tektonisch bedingte Lageveränderungen vor allem bei den Orogenesen in andere Druck- und Temperaturverhältnisse gekommen sind. Aus Metamorphiten bestehen große Teile des Sials. Auf die vielen damit verbundenen Fragen konnte hier nicht eingegangen werden.

Bildungsart für alle granitischen Gesteine.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Es besteht heute kein Grund mehr dafür, eine einheitliche Art der Granitbildung anzunehmen. Granitodioritgesteine können sich offensichtlich auf verschiedenen Wegen bilden. „Es gibt Granite und Granite“, hat *Read* einmal gesagt. Es muß ausdrücklich betont werden, daß Granitbildung durch komplexe, selektive, gravitative Kristallisationsdifferentiation nach wie vor durchaus möglich ist, das kann wohl kein erfahrener Forscher bezweifeln. Nur kommt ihr keine immer und immer wieder versuchte Verallgemeinerung zu. Allerdings ist nicht zu leugnen, daß der anerkannten Beispiele immer weniger werden, so ist (mit Recht oder Unrecht?) auch das berühmte Bushveldmassiv in Südafrika, ein starkes Bollwerk der Kristallisationsdifferentiation, nicht mehr unbestrittenes Beispiel geblieben. Aber es gibt deren noch genug, wie etwa der Chosika Pluton bei Lima in Peru. Wie groß die Anteile von Assimilation (Einschmelzung), Anatexis-Palino-genese (Aufschmelzug), metasomatischer Transformismus (Ichorese) sind, kann erst die Zukunft zeigen. Alle diese Möglichkeiten der Granitisation im Sinne *Reads* sind zweifellos in *Stilles* Phase vom sialischen synorogenen Magmatismus, also gleichzeitig mit den Orogenesen, durchaus gegeben, besonders die der anatektischen Aufschmelzung, und sie

werden auch heute von *Stille* so gedeutet. Nur durch die Orogenese, durch die Bewegung nach oben, ist das großräumige Aufsteigen von verschiedenartigen *Migmatitfronten* (aufsteigendes Migma) im Sinne von *Wegmann* und *Backlund* gegeben. Durch Auf- und Einschmelzung sind diese Migmatitmassen entstanden. So sieht heute auch *Kober* die Bildung der „Tauerngranite“. Auch innerhalb der Migmatitfronten ist Differentiation, wenn auch nicht vom simatischen Basalt ausgehend, möglich. Zeit dazu ist vorhanden, denn die Zeit, die diese Migmatitfronten bis zu ihrer völligen Erstarrung haben, sind sehr groß. Mit diesen und im Gefolge dieser Vorgänge ist die metasomatische Umbildung durch Tiefenlösungen durchaus möglich. Im Bereich aufsteigender Migmatitfronten können sich alle die hier geschilderten Vorgänge abspielen. Aufgeschmolzene (mobilisierte) Sialmassen, ohne, mit größeren oder geringeren eingeschmolzenen Anteilen des Nebengesteines, können zu granitodioritischen Gesteinen auskristallisieren oder in höhere Schichten eindringen und diese granitisieren. Damit ist das Problem der Raumfrage gelöst oder doch erleichtert. Nimmt man diese Art der Granitbildung an, dann ist es nicht nötig, nach Massen vorher gebildeter basischer Gesteine zu suchen und nicht zu finden. Bei der Annahme der Bildung durch Granitisation im zusammenfassenden Sinne von *Read* kann es nur zu geringfügiger Bildung solcher basischer Gesteine durch Kristallisa-

tionsdifferentiation kommen, zu keiner größeren, als es bei Differentiation aufgeschmolzenen Sials möglich ist, denn das granitodioritische Sial enthält nur an wenigen Stellen etwas größere Mengen basischer Gesteine, wenn wir auch nicht wissen, wie das erste Sial beschaffen war.

Was ist nun wohl das Wichtigste, um die Weiterentwicklung des großen und schwierigen Problems der Granitbildung zu fördern und nicht zu hemmen: Beobachten und immer wieder beobachten, draußen im Feld, in den Gebirgen (auch in unseren Hohen Tauern), Beobachtungen sammeln und sie vergleichen, als Grundlagen die geologischen Karten, sie erneuern, wo dies nötig ist. Sie sind ihrer Anlage nach vor allem Darstellungen der Gesteinsverteilung. Die größte Fülle von Einzelbeobachtungen kann zur Klärung genetischer Fragen nicht groß genug sein. Aus ihrer vergleichenden Auswertung wird man am besten einmal zu einer gut fundierten Theorie kommen. Mehr als Theorie können unsere Vorstellungen von der Granitbildung wohl kaum jemals werden. Denn schließlich ist die älteste Grundlage, von der alle neueren Ansichten von der Granitbildung ausgehen, daß Granit aus dem Schmelzfluß durch Auskristallisieren der Bestandteile zu festen Kristallgittern seiner das Gestein bildenden Mineralien entstanden sei, letzten Endes doch auch nur eben — eine Theorie. In vielen Bereichen der Geologie, Geo-

physik und Petrologie, vor allem in den genetischen, kann nur die Erstellung einer gut begründeten Theorie das letzte erreichbare Ziel aller wissenschaftlichen Forschung sein. Von großer Bedeutung für die Entwicklung der hier besprochenen Fragen dürfte vorsichtige Einschätzung vielversprechender neuerer und neuester Experimentalforschungen sein, wie etwa *Tuttles* Untersuchungen der Kalimetasomatose bei Temperaturen von 640° zur Erklärung der Kalifeldspatbildung (Kalifeldspatisierung), ein wertvolles Gegenstück zur längst bekannten, experimentell überprüften Natronmetasomatose, zu der die Albitisierung gehört. Durch *Tuttles* schöne Versuche wird die große genetische Bedeutung der Feldspat-Quarz-Reaktionsgefüge bei der Bildung von Granitgesteinen als letzte bereits hydrothermale Phase, wie sie *Drescher-Kaden*, gestützt auf zahlreiche Dünnschliffuntersuchungen, schon vor längerer Zeit angenommen hat, wieder in den Vordergrund gestellt. Kürzlich ist auch *Eskola* für die Bedeutung der Kalimetasomatose für die Granitbildung eingetreten. Große Erwartungen für die gesamte Geologie, im Besonderen aber für die Fragen der Granitbildung, bringt man auch noch in den Anfangsstadien steckenden Versuchen entgegen, verlässliche Angaben für die Altersbestimmung der Gesteine auf verschiedenen physikalischen und chemischen Wegen zu schaffen. Sie könnten die Forschung nach der Bildung der Granite in neue Bahnen führen.