

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
Band: 22 (1942)
Heft: 1

Artikel: Das Problem der Granitbildung
Autor: Niggli, Paul
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-19515>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Das Problem der Granitbildung

Von *Paul Niggli*.

„Indem wir uns in dem Bereich der altkrystallinen Gebilde zuvörderst namentlich der Frage nach der Bildungsweise des Granit zuwenden, berühren wir einen Gegenstand, welcher wie wenige die Aufmerksamkeit gefesselt hat, und betreten ein Feld, auf dem ein heisser längstentbrannter Meinungskampf noch immer nicht geschlichtet ist, dessen allseitig befriedigende Lösung von der nächsten Zukunft auch wohl kaum erhofft werden darf. Der Granit dient gewissermassen als der Repräsentant der ganzen Gruppe der alten krystallinisch-körnigen, nicht vulkanischen Gesteine; um ihn wird vorzugsweise der Streit geführt, dessen Ausgang auch für die andern verwandten Gebilde in mehr oder minderm Masse entscheidend sein wird.

Wir werden dabei erkennen, wie Gründe gewichtiger Art, wenigstens für die meisten Granite zu der Annahme führen, dass dieselben ursprüngliche Eruptivgesteine sind, welche in einem plastischen Zustand emporgedrängt wurden. Die Untersuchung, wie beschaffen dieser Zustand gewesen sei, bildet einen zweiten streng geschiedenen Theil der folgenden Erörterungen. Dass der Granit in seiner jetzigen Gestalt ein Meeressediment sei, ist eine Ansicht, welche längst nicht mehr der Widerlegung bedarf; eine Anzahl von Forschern sieht aber in dem Granit ein umgewandeltes Sedimentärgestein, ein Product des Metamorphismus; dass diese Hypothese für die meisten genauer bekannten Granitablagerungen sich keiner Wahrscheinlichkeit erfreut, soll durch die vorurtheilsfreie Erwägung aller Umstände zu zeigen versucht werden.“

F. ZIRKEL, Lehrbuch der Petrographie, II. Bd.,
Seite 337/338. Bonn 1866.

Vor 20 bis 30 Jahren hatte das unserer Abhandlung vorangestellte Zitat nur noch historische Bedeutung. Heute besitzt es wieder Wort für Wort höchste Aktualität, und in gegenüber früher etwas verändertem, jedoch weit prinzipiellerem Sinne erinnert man sich an die Verse von GOETHE:

„Wie man die Könige verletzt,
Wird der Granit auch abgesetzt,
Und Gneiss, der Sohn, wird zum Papa,
Auch dessen Untergang ist nah.“

1942/617

Nach der Jahrhundertwende schien das, was H. VOGELSANG 1867 in „Philosophie der Geologie“ erhofft hatte, „die endgültige Verabschiedung der sogenannten Universaltheorien“, erreicht zu sein. Man versuchte die verschiedenen durch Beobachtungen gestützten Theorien der Gesteinsbildung sinngemäss und nur innerhalb gewisser Bereiche anzuwenden, unterschied Sedimentgesteine neben Eruptivgesteinen und metamorphen Gesteinen, legte das Hauptgewicht auf die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bildungsbedingungen, entwickelte die Theorien der pneumatolytischen, hydrothermalen und thermalen Kontaktmetamorphose, der Assimilationsvorgänge, der magmatischen Differenzierung und der Dislokationsmetamorphose, der Beziehungen zwischen Gesteins- und Erzlagerstättenbildung, und versuchte vor allem die Petrogenesis nicht nur feldgeologisch und mikroskopisch, sondern auch physikalisch-chemisch zu untermauern. Die Zukunftsaufgabe war die eines Ausbaues, verbunden mit Grenzbereinigungen, unter Ersatz der unbestimmten Ausdrucksweise durch exaktere Begriffsbestimmung. Die Fülle neuer Beobachtungen liess die Möglichkeit von Synthesen erhoffen, die weitumfassende Gesetzmässigkeiten ins richtige Licht stellen sollten, ohne der unberechtigten Verallgemeinerung zu verfallen.

Der Verzicht auf eine Universaltheorie führte jedoch zwangsläufig zum Ausbau der Systematik. Die Berücksichtigung der Mannigfaltigkeit in genetischer Hinsicht verlangte öfters für kartographische und pädagogische Zwecke Entscheidungen in der Frage der Zuordnung von Gesteinstypen, ohne dass in Einzelfällen schlüssige Beweisführung möglich war. Die von allen Feldpetrographen erkannten Konvergenzerscheinungen wurden zudem durch Geologen hin und wieder falsch gedeutet oder es traten, bedingt durch primitive Klassifikationsschemata, ungerechtfertigte Vereinfachungen in der petrologischen Problemstellung auf. Dadurch entstandene Unsicherheiten mussten eine neue Epoche vorbereiten, doch scheint auch für sie der Hauptgrund bereits von H. C. VOGELSANG vorausgesehen worden zu sein, der 1867 schrieb (loc. cit. Seite 214):

„Es scheint, dass die Erschütterung der Universalhypothese für manche Geologen die Veranlassung wurde, dass sie sich mit einem gewissen Dilettanteneifer in einzelne pikante Fragen der Zeit vertieften, deren Lösung zunächst, wie dies gewöhnlich bei neuen und anreizenden Problemen zu geschehen pflegt, beinah von Allen, die sie in die Hand nahmen, in ihren Schwierigkeiten unterschätzt wurde, und welche überdies durch gesunde kritische Bearbeitung sich bald in ein Detail verloren, welchem der Geologe nicht nachfolgen kann, ohne sein nächstes scharf begrenztes Ziel fast gänzlich aus dem Auge zu verlieren.“

Eine in der Geologie seit ca. 15 Jahren sich bemerkbar machende Zeit ist dadurch ausgezeichnet, dass sie ausnahmslos auf ältere, vor 150 und 100 Jahren im Kampf der Meinungen unterlegene Ansichten zurückgreift. Das braucht in keiner Weise den Wert dieser Theorien zu beeinträchtigen. Häufig ergibt sich ja in der Entwicklung der Wissenschaften auf Grund neuer Einsichten und in neuerer, schärferer Formulierung die Rückkehr zu Theorien, die scheinbar endgültig erledigt waren. Das Merkwürdige ist nur, dass ein Studium der älteren Literatur in unserem Falle zeigt, dass weder neue Argumente ins Feld geführt noch schärfere Begriffsbestimmungen ver-

wendet werden. Es scheint im Gegenteil oft der frühere Meinungsstreit den Tatsachenbestand schärfer beleuchtet zu haben, so dass es durchaus zweckmässig ist, an die früheren Epochen zu erinnern. In dieser Rückkehr zu älteren Ansichten, die in neuen Lehrbüchern kaum mehr erwähnt wurden, liegt anderseits auch der wesentliche Wert der sich fälschlicherweise als Neuschöpfungen ausgebenden antikonventionellen Darstellungen. Eine Wissenschaft muss sich immer wieder mit den Grundfragen beschäftigen: sie muss aus dem Zeitwissen heraus alte Fragestellungen überprüfen, damit Grenzbereinigungen nicht einseitig zu Gunsten einer Schulmeinung vollzogen werden.

Es ist kein Zufall, dass die Frage der Granitbildung im Zentrum der neuen Diskussionen steht:

„Es gibt kein Experiment, welches darüber entscheiden kann, wie der Quarz, der Feldspath oder der Glimmer entstanden sei, und noch viel weniger eins, welches der Schlüssel wäre für die Granit- und Gneissbildung. ... hier kann uns nichts Anderes helfen, als die genaueste Erforschung des formellen Auftretens, der Vergesellschaftung, der Lagerung, kurz der geognostischen Verhältnisse, unter denen wir den Stoff, die Masse in der Natur antreffen“ (H. C. VOGELSANG: „Philosophie der Geologie, usw.“ Bonn 1867, Seite 210); und weiter (ebenda): „In dem Vergleich der geognostischen Analyse mit der synthetischen Erfahrung der Physik und Chemie beruht, soweit es sich um Stoffbildungen handelt, die Aufgabe der theoretischen Geologie.“

Besondere Schwierigkeiten entstehen, weil sich bei der Beurteilung, wie Granit entstanden ist, verschiedene durch Gegenüberstellung charakterisierbare Problemkreise durchschneiden, z. B.: Neptunismus—Plutonismus, Metamorphismus—Magmatismus, Idiogenesis—Differentiation, Krustentektonik—Magmentektonik. Argumente, die bei der Urteilsbildung in bezug auf die eine Frage ins Feld geführt wurden, sind nicht selten, ohne dass ein innerer Zusammenhang ersichtlich ist, von anderer Seite mitbenützt worden. Trotzdem wollen wir versuchen, wenigstens in grossen Zügen nach den oben erwähnten Fragestellungen zu gliedern.

I. Neptunismus-Plutonismus

Gegen die Ansicht, Granite und Gneise seien mechanische Sedimente (wir würden heute sagen „Arkosen“), hat sich in aller Schärfe H. B. DE SAUSSURE gewandt, der bereits 1776 Granitadern aus der Gegend von Lyon beschrieb: „Quarzteile, Schörlteile und Teile von Feldspat in einerlei Fluidum gelöst, schossen im Grund dieses Fluidums zu Kristallen an, die hier abgesondert und dort vermischt sind;

so wie wir in einem mit verschiedenen Salzen gesättigten Wasser im Grund von einerlei Gefäss die regelmässigen oder unregelmässigen Kristalle von diesen Salzen sich bilden sehen“.

Es war dies bevor J. HUTTON und J. PLAYFAIR 1788, 1795, 1802 und J. MACCULOCK 1814, 1819 auf die bis heute unbestrittene Tatsache der eruptiven, durchgreifenden Lagerung vieler Granite aufmerksam machten. Der Streit, ob Granit eine Art chemisches Sediment (hydatogen entstanden, eventuell z. T. mit Gneis aus einem Urmeer) sei oder „feurig flüssigen“ (pyrogenen) Ursprungs, ging trotzdem weiter¹⁾. Es ist zweckmässig, einige Argumente in Erinnerung zu rufen, die ihre Schlagkraft völlig verloren haben, jedoch merkwürdigerweise in wenig veränderter Form ihre Wiederauf-
erstehung erfahren haben.

a) Die vulkanische Tätigkeit, die unmittelbar über das Vorhandensein von Schmelzlösungen innerhalb der Erdrinde Auskunft gibt, wurde früher als untergeordnete, auf wenige Stellen beschränkte Erscheinung gedeutet. Es hiesse alle Erkenntnisse der historischen Geologie verleugnen, wollte man heute noch diesen Standpunkt einnehmen. So hat beispielsweise R. A. DALY 1933 folgende Zahlen mitgeteilt: Von 60 990 kartierten Quadratmeilen der nordamerikanischen Cordillern werden 9584 Quadratmeilen von typischen vulkanischen Gesteinen bedeckt. (In dem gleichen Gebiet stehen nach der üblichen Auffassung nur 5204,7 Quadratmeilen intrusive Tiefengesteine und 284 Quadratmeilen intrusive hypabyssische Gesteine an.) Wie eigenartig mutet da eine 1938 geäusserte Ansicht R. VAN BEMMELENS an, nach der die Magmenbildung ein lokales Phänomen (vereinzelte Magmenkammern) sei. Selbst wenn wir nur jene Gesteine berücksichtigen, die als sogenannte vulkanische Bildungen oder Ergussgesteine per analogam unzweifelhaft aus Laven sich entwickelt haben, folgt die Ubiquität der Magmen. Nicht nur finden wir prä-, syn- und postorogenetischen Magmatismus dieser Art in allen Faltengebirgen, selbst in deren Vor- und Rückländern und in den Kratogenen mit Bruchbildung sind Schmelzlösungen emporgestiegen. Jede Theorie, die lokale und nur in Sonderfällen wirksame Magmenbildung voraussetzt, steht mit dem geologischen Tatsachenkomplex in unlösbarem Widerspruch. In dieser Beziehung kann es kein Zurück mehr geben.

¹⁾ J. F. D'AUBUISSON DE VOISIN hat z. B. in seiner „Geognosie“ (deutsche Übersetzung 1821/22) noch ganz den WERNER'schen Standpunkt vertreten, obgleich er das Vorkommen von Granitgängen gleichfalls erwähnt.

b) Die — wie man einst glaubte — vulkanischen Gesteinen völlig fremde Bildung von Quarz sowie eine mit der Reihenfolge der Schmelzbarkeit der Einzelminerale in keinen einfachen Zusammenhang zu bringende Ausscheidungsfolge der Gemengteile des Granites schien gegen den magmatischen oder, wie man damals sagte, pyrogenen Ursprung zu sprechen. Kein Geringerer als R. BUNSEN²⁾ hat bereits 1861 in der Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft auf das Irrtümliche derartiger Schlussfolgerungen hingewiesen, und heute gibt es eine sorgfältig ausgebaute physikalische Chemie der Schmelzlösungen, die nicht übergangen werden darf.

Es blieb R. VAN BEMMELEN³⁾ vorbehalten, auch diese längst erledigten Einwände wieder aufzugreifen, indem er eine Liste von „Mineralschmelzpunkten“ angibt und schreibt: „But physico-chemically it seems a rather hazardous hypothesis to assume that precisely the mineral with the highest melting point of all other major rock minerals should stay longest molten. Is it not more logical to assume that also the quartz of the biotite granite had nothing to do with a silicate rest-melt but that it should be considered as deposited by a watery solution containing dissolved quartz?“ Durch die vom Autor der Sentenz selbst hervorgehobene Gegenüberstellung von „melt“ und „solution“, d. h. Schmelze und Lösung, wird ausserdem auf einen längst über-

²⁾ R. BUNSEN: Über die Bildung des Granites. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. XIII, 1861, Seite 61 ff.

Daraus z. B.: „Der Quarz erstarrt bei einer höheren Temperatur als der Orthoklas, der Orthoklas bei einer höheren als der Glimmer. Bestand daher der Granit ursprünglich aus einem feuerflüssigen Gemenge dieser drei Fossilien, so muss — behaupten die Gegner der plutonischen Entstehung dieser Gebirgsart — bei dem Abkühlen eines solchen Gemenges der Quarz zuerst, der Orthoklas darauf und der Glimmer zuletzt fest werden. Da nun die petrographische Structur der granitischen Gesteine gewöhnlich eine andere Reihenfolge der Erstarrung erkennen lässt, so können — behauptet man weiter — jene Gebirgsarten nicht feuerflüssigen Ursprungs sein. Es ist in der Tat schwer begreiflich, wie ein solcher Fehlschluss sich jahrelang hat bei den Geologen in Geltung erhalten können und schwerer noch begreiflich, wie derselbe selbst heute noch immer wieder zur Stütze geologischer Hypothesen reproducirt zu werden pflegt. Niemand scheint daran gedacht zu haben, dass die Temperatur, bei welcher ein Körper für sich erstarrt, niemals diejenige ist, bei welcher er aus seinen Lösungen in anderen Körpern fest wird. Der Erstarrungspunkt einer chemisch reinen Verbindung hängt allein von ihrer stofflichen Natur und dem Drucke ab, wogegen der Erstarrungspunkt eines mit anderen Substanzen zu einer Lösung verbundenen Körpers ausserdem noch und zwar hauptsächlich von dem relativen Verhältnis der sich gelöst haltenden Substanzen bedingt wird.“

³⁾ R. VAN BEMMELEN: „On the origin of some granites from Singapore“, Seite 31.

brückten Gegensatz hingewiesen, der sich leider auch heute in Definitionen hervorragender Petrographen wieder bemerkbar macht.

Gerade die Erkenntnis vom „Lösungscharakter“ magmatischer Schmelzflüsse und von der Wirkungsweise eines Gehaltes an leichtflüchtigen Substanzen, wie Wasser, hat ja ein für allemal dem Streit der Neptunisten und Plutonisten die Schärfe genommen und ausserdem den innern Zusammenhang für einen ungeheuren Komplex von Beobachtungstatsachen hergestellt.

Bereits G. POULETT SCROPE (1825), SC. BREISLACK (1822), J. N. FUCHS (1837) hatten auf die Möglichkeit der Kombination von „Feuer“ und „Wasser“ aufmerksam gemacht, so dass TH. SCHEERER⁴⁾ 1847 die Theorie von der *Hydatopyrogenese* plutonischer Gesteine entwickeln und F. ZIRKEL in seinem „Lehrbuch der Petrographie“, I und II (Bonn 1866) schreiben konnte:

„Immer weitere Bahn hat sich in letzter Zeit die Meinung gebrochen, dass das eruptive Magma des Granit nicht rein pyrogener Natur gewesen sein könne; man hat, wie schon bei Erwähnung der Beobachtungen Sorbys (1858) berührt worden ist, in Berücksichtigung aller oben angeführter Verhältnisse den Zustand des Granit bei seiner Eruption als den eines dampfbeladenen bedeutend durchwässerten Schmelzflusses betrachtet, 'combining at once', wie Sorby sagt, 'both igneous fusion, aqueous solution and gaseous sublimation'.“

Der genauere Zusammenhang dieser Erscheinungen, verbunden mit einer Klärung des Begriffes „gasdurchtränktes Magma“ war in den vergangenen 30 Jahren Gegenstand experimenteller und theoretischer Untersuchungen. An den Ergebnissen dieser Forschungen ist festzuhalten.

c) Zu Beginn des Streites der Neptunisten und Plutonisten galten nur Basalte als typische Vulkanbildungen. Heute wissen wir, dass Laven von der Zusammensetzung der Granite häufig sind, dass gerade diese Laven oft glasig erstarrten, somit Kunde von einem ursprünglich völlig flüssigen Zustand geben. Von den 9584 Quadratmeilen Ergussgesteinen, die R. A. DALY aus den pazifischen Cordilleren erwähnt, sind 2145,7 Quadratmeilen Rhyolithe und 82,1 Dacite: also entstammen mehr als $\frac{1}{5}$ von deutlich an SiO_2 übersättigten Magmen. Es ist somit heute unbestritten, dass aus dem Erdinnern Magmen granitischer Zusammensetzung hervorbrechen, und es wird zur Notwendigkeit zu verfolgen, was geschieht, wenn diese Schmelzlösungen bereits vor der Extrusion kristallisieren. Um diese Fragestellung kommt keine Theorie der Granitbildung herum. Ausserdem ist an vielen Orten durch Erosion der Übergang vulkanischer Bildungen in subkrustal erstarrte Massen freigelegt worden, derart, dass der Strukturwechsel direkt beobachtbar ist. Ja, es stellt

⁴⁾ Interessant die Kontroverse SCHEERER-DUROCHER in Bull. de la soc. géol. de la France, 1847—1850.

sich immer mehr heraus, dass sogenannte granitische Tiefengesteinsstruktur gar keine grosse Bedeckung benötigt.

d) Von Anbeginn an ist das Granitproblem durch das Zusammenvorkommen von Granit und Gneis kompliziert worden. Es genügen einige Zitate: F. ZIRKEL (Lehrbuch der Petrographie II, Seite 353) schreibt: „Während also alle diese Erscheinungen und Verhältnisse für diejenigen Granitablagerungen, welche dieselben erkennen lassen, ein Zeugnis des eruptiven Ursprungs abgeben, darf man gleichwohl nicht übersehen, dass es auch Granite gibt, welche in der That an und für sich keine eruptiven Lagerungs- und Verbandsverhältnisse aufweisen, diejenigen nämlich, welche in inniger Wechsellagerung und durch petrographische Übergänge verknüpft innerhalb gewisser Gneissablagerungen als vollständig zugehörige Glieder derselben erscheinen“. Und C. F. NAUMANN (Lehrbuch der Geognosie II. Band, Leipzig 1862) drückt sich wie folgt aus: „Granit ist wirklich ein Gestein, welches in manchen Gegenden als ein Glied der Urformation auftritt, und mit dem primitiven Gneisse durch petrographische Übergänge und durch Wechsellagerung so innig verbunden erscheint, dass eine Trennung beider Gesteine ganz unmöglich sein würde“.

Keiner dieser grossen Petrographen hat jedoch deshalb die magmatische Herkunft vieler Granite bezweifelt, ebensowenig wie J. J. SEDERHOLM, dem man so wichtige Arbeiten über die Beziehung Granit-Gneis verdankt und der so häufig im Widerspruch zu seinen eigenen Ansichten zitiert wird.

In dem abschliessenden Werk: „On the Geology of Fennoscandia, with special reference to the Pre-Cambrian“, Bulletin de la Commission Géologique de Finlande, No. 98, 1932, finden wir beispielsweise folgende Sätze: „At the time of the intrusion of the post-Bothnian granites, the older rocks were brecciated on a great scale, and the granite injected between the fragments, forming a variety of migmatites. In extensive tracts of Fennoscandia, the migmatites originated in this epoch of intrusion“ (Seite 13). Ferner: „The Lappish rocks are usually rich in garnet and were obviously formed during a period of strong tectonic movements when at the same time granitic magma was injected into older granites and gneisses, metabasites, anorthosites, and sedimentary schists“ (Seite 13). Seite 22 der gleichen Arbeit steht: „All the supracrustal formations hitherto described, beginning from the Svionian and ending with the Jatulian, have this in common that they are at many places 'highly metamorphic and interwoven with granitic veins. That these veins really in most cases are granitic intrusions, and not formed by the 'ultra-metamorphic' change of certain sedimentary layers, is proved by the fact that they are closely connected with granites occurring in greater masses, and whose age is well defined. Where these granitic veins have injected the older rocks very intimately, the different supracrustal rocks and also the rocks,

of their former substratum have become so welded together that only a very detailed study can determine the character of the components. This interweaving is however much less conspicuous in the youngest formations. In them we find much clearer relations over large areas, both as to their stratigraphy, their tectonics and their petrological character. The difference is solely due to the fact that the supracrustal rocks of the older cycles have been dug out by the erosion from much greater depths and have in some cases been repeatedly subject to metamorphosing processes. It is not possible to find any definite difference in the primary characters, showing a gradual change of petrogenetical conditions from older to later times."

Oder Seite 25: "The Rapakivi granites have solidified as laccolithlike sheets under a cover of older rocks, in a few instances also as effusive sheets lying upon older sediments and volcanics."

Daraus geht hervor, dass dieser beste Kenner präkambrischer Gesteine Europas, der Schöpfer des Begriffes „Migmatit“, die Intrusion granitischer Magmen als fundamentale Erscheinung ansah. Extreme Migmatitiker von heute, die sich immer wieder auf SEDERHOLM'sche Arbeiten beziehen, vertreten Ansichten, die mit denen des grossen finnischen Forschers praktisch nichts mehr gemein haben.

In Wirklichkeit ist somit der alte Streit zwischen Neptunismus und Plutonismus auf Grund von Beobachtungen und heute noch zu Recht bestehenden theoretischen Überlegungen entschieden worden. Teils erfolgte (Hydatopyrogenese) eine Synthese, teils eine Abklärung zu Gunsten der Eruptivität, die durch keine neueren Beobachtungen widerlegt werden konnte. Allein, obgleich die Ansicht, Granit sei ein chemisches Sediment, aufgegeben werden musste und auch heute kaum mehr ernsthaft vertreten wird, der Lehre vom magmatogenen Ursprung des Gesteins wurde bereits zu Beginn und dann um die Mitte des 19. Jahrhunderts eine neue Hypothese, die der Entstehung durch Metamorphose, gegenübergestellt.

Alle ernsthaft in Betracht zu ziehenden Deutungsversuche setzen somit seit über 100 Jahren die hypogene Bildungsweise der granitischen Gesteine (d. h. unter der Erdoberfläche entstanden oder aus dem Erdinnern herstammend) voraus. Bereits CH. LYELL hat 1830 diese hypogenen Gesteinsbildungsprozesse in vulkanische, plutonische und metamorphosische getrennt. Plutonisch bedeutete: aus nach aussen dringender, die Erdoberfläche nicht erreichender heisser Masse entstanden, zunächst ohne nähere Präzisierung des Zustandes dieser Masse. Später wurden im Schmelzfluss befindliche Massen Magmen genannt.

II. Metamorphismus und Magmatismus

Man wird gewiss nicht glauben, dass ein Vertreter der Zürcher Petrographen die Bedeutung des Gesteinsmetamorphismus für den

Aufbau der Erdrinde zu unterschätzen gewillt ist. Aber wenn man neuere Abhandlungen liest, versteht man, dass vor ca. 100 Jahren einer ähnlichen Situation gegenüberstehend die Gesteinsmetamorphose, „la flexible théorie du métamorphisme“ (E. DE BEAUMONT), „la théorie complaisante“ (RIVIÈRE), „the sweeping hypothesis“ (H. DE LA BÈCHE) genannt wurde und A. ERDMANN 1844 schreiben musste: „Unlängbar ist der Letztere, ist der Metamorphismus da, wo er durch Beobachtung erfasst und durch physikalisches Wissen überhaupt erklärt werden kann. Doch der Kreis der Gesteine, bei denen dies der Fall, ist nur beschränkt, und keineswegs der bodenlosen Hypothese günstig, so wie sie jetzt auf die Spitze getrieben wird“.

Metamorphose bedeutet Umbildung eines bereits vorhanden gewesenen Gesteins, aber von Anfang an sind Grenzfälle ausgeschlossen oder als Ultrametamorphismus besonders bezeichnet worden. Es ist notwendig, daran wieder zu erinnern, da gerade heute die Diskussion durch die verschiedene Ausdehnung des Begriffes „Gesteinsmetamorphose“ erschwert wird. Entsteht aus einem Eruptivgestein durch Verwitterung, Transport und Ablagerung ein mechanisches Sediment, so ist dieses kurzweg ein Sediment und kein metamorphes Eruptivgestein. Wird ein Gestein vollständig geschmolzen und bildet sich daraus später am gleichen Ort oder nach Wanderung der Schmelzlösung ein neues Gestein, so ist letzteres ebenso selbstverständlich magmatischer Entstehung, hat man doch früher überhaupt geglaubt, dass Laven oder Magmen nur durch streng lokale Verflüssigung entstehen. Im engeren Sinne wurde der Begriff Metamorphose (HUTTON, BOUÉ, LYELL) mit Gesteinsumwandlung identifiziert, ohne dass die magmatische oder sedimentäre Bildungsmöglichkeit sich dazwischen schaltet. Damit in Übereinstimmung wenden wir mit U. GRUBENMANN diese Bezeichnung nur an, wenn während der Umbildung in jedem Zeitmoment der durch den festen Zustand charakterisierte Gesteinsverband als Ganzes im wesentlichen erhalten blieb. Das schliesst die schon sehr frühzeitig erkannte Mitwirkung von mobilen Phasen, Gasen, Dämpfen oder Lösungen nicht aus; ja sie ist auf Grund von eindeutigen Beobachtungen von fast allen Forschern immer und immer wieder nachdrücklich betont worden. Dass ein Gesteinsmetamorphismus dieser Art besteht, wird durch Reliktstrukturen, Beibehaltung des Grossverbandes und insbesondere durch die mikroskopische Untersuchung bestätigt. Rein theoretisch lässt sich der Fall denken, dass (im Gegensatz auch zur einfachen Sinterung) der Hauptteil eines

Gesteins zur gleichen Zeit verflüssigt ist, jedoch Relikte ungeschmolzen zurückbleiben, und dass dann der flüssige Anteil ohne Abwanderung wieder erstarrt. Es lässt sich voraussehen, dass es oft Schwierigkeiten bereiten wird, eine derartige Bildungsweise zu unterscheiden von derjenigen der Erstarrung eines irgendwoher stammenden Magmas, das Schollen oder Gesteinsbruchstücke (sogenannte fremde Einschlüsse) mit sich führt oder die Kontakthülle teilweise assimiliert hat. In solchen Fällen ist es somit durchaus am Platz, im Gegensatz zum normalen Gesteinsmetamorphismus von einem *Ultrameta-morphismus* zu sprechen.

Zunächst wollen wir jedoch die Frage besprechen, ob Anzeichen vorhanden sind, dass sich die grossen Massen granitischer Gesteine durch *normale* Gesteinsmetamorphose aus anderen Gesteinen entwickelt haben. Diese vor rund hundert Jahren von B. M. KEILHAU, CHR. KEFERSTEIN und G. H. O. VOLGER geäusserte Ansicht hat ja neue Verteidiger gefunden. B. M. KEILHAU hat 1826 in einer schönen Arbeit: „Darstellung der Übergangs-Formation in Norwegen“ (Leipzig 1826) das später durch die Arbeiten von W. C. BRÖGGER und V. M. GOLDSCHMIDT als Musterbeispiel der magmatischen Differentiation, der Kontaktmetamorphose und der magmatischen Pegmatit- und Erz-lagerstättenbildung berühmt gewordene Gebiet von Christiania (Oslo) behandelt. Er beschrieb die Kontakterscheinungen, die er zunächst im Sinne der Huttonianer (übliche Kontaktmetamorphose) deutete. In einem „vorläufigen Wort über Contactbildungen“ hat er dann 1828 in den Annalen der Physik und Chemie von J. C. POGGENDORFF die Frage gestellt, ob nicht bereits der mechanische Kontakt ursprünglich verschiedenartiger Gesteine durch Reaktion im festen Zustand ohne Mitwirkung von Lösungen oder Schmelzen ähnliche Erscheinungen zur Folge haben könne: „Es ist also die Möglichkeit da, dass in dem festgewordenen Theile des Erdkörpers ganz wesentliche Veränderungen, in Folge der Bewegbarkeit der Theilchen in starren Massen, haben vorgehen können und immer noch vorgehen.“

Zehn Jahre später, 1837 und 1838, sprach er die Ansicht aus, dass viele kristallinische Massen nichtmagmatischen Ursprungs seien, sondern metamorphe Sedimente, der Granit z. B. aus Tonschiefer entstanden, der Porphyry aus Sandstein.

CH. KEFERSTEIN fasst in seiner so verdienstvollen „Geschichte und Litteratur der Geognosie“ (Halle 1840) seine Ausführungen von 1829 und 1831 selbst wie folgt zusammen: „Sehr allgemein sahe man den Granit, Porphyry und Basalt als ein von unten heraufgestie-

genes, vulkanisches, fremdartiges Gestein an, wogegen KEFERSTEIN durch viele Thatsachen darzulegen suchte, dass diese Gesteine, vermittelt der innern Thätigkeiten der Erde, durch Umbildung aus verschiedenartigen, stratificierten Gesteinen entstanden wären; manche Granite und Porphyre in Steiermark, Kärnthen usw. stammten aus dem dasigen Schiefer- oder Übergangsgebirge, man könnte sie als Killasgranite usw. bezeichnen; die roten Porphyre in Tyrol usw. wären secundaire Umbildungen des dortigen rothen Sandsteins, wurden daher Melsporphyr usw. genannt, aber die Hauptmasse der kristallinen Gesteine in den Centralalpen in Salzburg, Tyrol, der Schweiz und Savoyen, der dortige Glimmer- und Talkschiefer, der Gneis, Granit usw., sei durch Umbildung, in minderm oder höheren Grade, aus dem dortigen Mergel- und Sandsteingebirge entstanden, daher sie als Flyschgranite usw. bezeichnet werden könnten; dies lehrten besonders die unzweideutigsten Übergänge, auf die man überall stosse, die man hier ohnmöglich von der Einwirkung eines heraufgestiegenen, flüssigen Granites auf das Nebengestein ableiten könne. ... Meist hat man die Alpen als innig verbundenes Ganze betrachtet, was sich am besten erklärt, wenn man die kristallinen Massen als Product der geschichteten Straten ansieht, nur erscheint das Gebirge nicht mehr als ein sehr altes, sondern in jeder Hinsicht als ein junges.“

Gemeinsam ist diesen Anschauungen, dass Granit im Gneis-, Schiefer- und Hornfelskontakt nur als eine höhere spezielle Form der Metamorphose betrachtet wird, wobei, wie auch häufig in neueren Arbeiten, unberücksichtigt bleibt, dass der Granit eine ganz andere chemische Zusammensetzung als Mergel, Ton oder Kalkstein besitzt, also sicherlich nicht unmittelbar aus diesen entstehen konnte. Jede ernsthafte Lehre, die Granit und ähnliche Gesteine als metamorphe Sedimente deuten will, muss daher gewaltige Stoffwanderungen zu Hilfe nehmen. In gewissem Sinne hat dies der ausgezeichnete Beobachter alpiner Mineralkluftparagenesen, G. H. O. VOLGER, getan. In „Studien zur Entwicklungsgeschichte der Mineralien“, Zürich 1854, und in „Die Entwicklungsgeschichte der Mineralien der Talkglimmer-Familie und ihrer Verwandten“, Zürich 1855, versuchte er die Ausscheidungsfolgen und Verdrängungen (Metasomatosen) der Zerrkluftparagenesen festzustellen. Da dies fast ausschliesslich an Sammlungsobjekten (der Zürcher mineralogischen Schausammlungen) geschah, übertrug der sonst sehr vorsichtige Mineraloge die Resultate teilweise auf die Entstehung der die Klüfte beherbergenden Gesteine. Es fehlte ihm die petrogra-

phische Kenntnis. So finden wir im zweiten Werke Seite 12 folgenden Passus: „Die Umwandlung der Kalksedimente in Feldspathgesteine habe ich an alpinischen Handstücken mineralogisch nachweisen können⁵⁾, so wie Studer dieselbe schon längst geologisch nachgewiesen hatte. Noch liegt diese Metasomatose, diese Substitution von Feldspath für Kalkkarbonat, als reine „Verdrängung“ vor uns — bald vielleicht nicht mehr; allein so viel ist gewiss, dass es hier zum Verschwinden des Kalkkarbonates — und es handelt sich nicht um untergeordnete Vorkommnisse, sondern um ungeheure alpinische Massen — nicht Revolutionen, noch Katastrophen, verbunden mit dem Zusammensturz von Kalk- und Sandsteingebirgen und ihrer Verschmelzung im Innern der Erde, sondern einer ruhigen Entwicklung bedurft hat, welche Atom für Atom den chemischen Prozessen unterwirft und der haarfeinen Rutilnadeln schont, welche aus einem früheren Zustand überlebend bis in den neuen Zustand hineinreichen. So weit die Alpen im Zustand des „Urgebirges“ sind, ist, nach Obigem begreiflich, auch in diesen Gebirgen der Mangel an ausgedehnten Kalksedimenten in hohem Grade, wie nur in irgend einem Gebirge, spürbar; und doch sind es nicht Formationen der „kalkarmen“ ältesten Perioden, sondern die ungeheuren triassischen, jurassischen und kretazeischen Kalkformationen, aus deren Umwandlung die „Urgesteine“ der Alpen hervorgegangen sind. —“

VOLGER denkt sich Granit, Gneis und Glimmerschiefer durch ausgedehnte Prozesse der Metasomatose unter dem Einfluss rein wässriger Lösungen langsam aus älteren Sedimenten gebildet, derart, dass sogar Kalkstein Granit ergeben kann.

Untersuchen wir zunächst, wie sich hervorragende Petrographen jener Zeit diesen Hypothesen gegenüber verhielten, denn vieles, was sie einzuwenden hatten, ist auch heute noch gültig.

Die grossen Granitmassive als an Ort und Stelle metamorphosierte Folge von Sedimenten zu deuten, gerät mit der gleichmässigen Ausbildung dieser Gesteine, dem Fehlen jeglicher Stratifikation, in Widerspruch.

Schon LEOPOLD v. BUCH hat 1810 geschrieben: „Wir kennen Granit aus allen Ländern der Erde und immer ist es dasselbe Gemenge aus denselben Mineralien. Warum ist es immer dieselbe Auswahl bei so mannigfaltiger Verschiedenheit der Mineralspecies? Warum hat die Natur nicht in China Gesteine aus Axinit und Epidot gebildet, in Sachsen aber aus Feldspath, Quarz und Glimmer?“

⁵⁾ Beschreibung einer Verdrängung von Calcit durch Adular in einer Druse.

F. ZIRKEL schreibt in Band II seines Lehrbuches der Petrographie (Seite 344—348): „Namentlich hat man den Granit als Umwandlungsproduct von Thonschiefer und Kalkstein angesehen. Keilhau hat schon seit dem Jahre 1825 in mehreren Abhandlungen aus den um Christiania von ihm beobachteten geognostischen Verhältnissen den Beweis zu führen versucht, dass Granit aus Gliedern der Thonschieferformation hervorgegangen ist.... Volger hat namentlich der Umwandlung von Kalkstein in Granit das Wort geredet.... Vor allen Dingen aber sollte man erwarten, dass die Anhänger der Theorie von der Granitgenese aus Thonschiefer, Grauwacke und Kalkstein die Untersuchung nicht vergessen, ob denn auch das Vorkommen der Granite in der Natur dazu angethan sei, eine solche Ansicht zu stützen. ... Wenn auch wirklich dereinst unzweifelhafte Übergänge aus sedimentären klastischen Gesteinen oder Kalksteinen in Granit aufgefunden werden sollten, so würde daraus noch keineswegs für alle Fälle gefolgert werden dürfen, dass hier Umwandlungen ersterer in letzteren vorliegen. Manchmal kann der Granit für auflagernde klastische Gesteine das Material dargeboten haben (wie es bei dem Übergange der Porphyre in Conglomerate und Sandsteine des Rothliegenden erwiesen ist), und bei diesem Prozess muss natürlich ein allmählicher Übergang beobachtbar sein. Weiter unten werden die Einwirkungen erörtert, welche das mit verschiedenen Stoffen beladene Wasser bei der Graniteruption in den angrenzenden Gesteinen hervorzubringen vermag, und welche vorzugsweise in einer Imprägnation derselben mit Mineralien, namentlich mit denen des Granit selbst beruhen; dabei kann sich die Grenze verwischen und ein Übergang hergestellt werden; es ist alsdann in der That der Thonschiefer lokal in Granit umgewandelt, aber nur auf Grund der Eruption des letzteren“ ...

„Ebenso voreilig wie der Schluss: weil in Sangerhausen die Bildung pyrogenen Feldspathes beobachtet wurde, deshalb kann in dem Granitmagma der Feldspath aus dem Feuerfluss krystallisiert sein, ist derjenige: weil Verdrängung von Feldspath, Quarz und Glimmer nach anderen Mineralien oder Neubildungen derselben auf nassem Wege bekannt sind, können die Granite Umwandlungsproducte von Kalkstein und Thonschiefern sein“ ...

„Wenn wir gewahren, wie auf meilenweite Erstreckung hin Granitablagerungen ihren petrographischen Habitus in nichts verändern, wie sie immer ein und dasselbe gleichmässig körnige einförmige Gemenge von Feldspath, Quarz und Glimmer darbieten, wie die chemische Zusammensetzung in grösster Constanz sich gleichbleibt und

kaum spurenhafte Abweichungen in den Procentzahlen der constituirenden Stoffe sich einstellen, dann wird es klar, dass diese Ablagerungen von Anfang an diese chemische Zusammensetzung besessen haben, dass ihre petrographische Ausbildung in einem Act vollendet gewesen sein muss. ... Wie staunenswerth regelmässig hätten solche Umwandlungen vor sich gehen müssen, um auch nirgends gegen dasselbe quantitative Verhältniss der Gemengtheile zu verstossen, wie vollständig, da in dem Granit auch hier keine Spur von kohlensaurem Kalk erscheint, nichts an eine frühere klastische Natur erinnert, niemals auch nur der geringste Fossilrest sich gefunden hat, wie früh endlich, da schon die ältesten Sedimentschichten Granitgeschiebe und Granitfragmente enthalten.“

Und C. F. NAUMANN sagt im Lehrbuch der Geognosie, II, Seite 154, nach einlässlicher Diskussion über die Bildungsweise der im Grundgebirge vorkommenden Granite: „Sind wir auch nicht im Stande, die Modalität ihres Bildungsprocesses zu begreifen (gemeint ist die primärmagmatische Bildung der Urgebirgsgranite), so können wir uns mit den Anhängern des Ultrametamorphismus trösten, denen es in dieser Hinsicht nicht besser ergeht. Am Ende würde es vielleicht gleichgiltig sein, ob wir einen räthselhaften Umbildungsprocess, oder einen räthselhaften Urbildungsprocess voraussetzen wollen; wenn aber einmal zwischen beiden Räthseln gewählt werden soll, so werden wir uns wohl lieber zu der Anerkennung des letzteren verstehen, welches wenigstens mit dem Thatbestande der Erscheinungen im Einklang ist.“ Und Seite 257: „Die geotektonischen Verhältnisse des Granites und Syenites, zu denen besonders ihre Lagerungsformen, ihre Verbandsverhältnisse, die in ihnen suspendirten Fragmente, und die Störungen der Lagerung des Nebengesteins gehören, alle diese Verhältnisse beweisen unwiderleglich, dass das Material beider Gesteine eruptiver Natur ist, das heisst, dass solches in einem plastischen Zustand aus den unbekannten Tiefen der Erde hervorgepresst worden sein muss.“

Manche Petrographen werden einwenden, dass diese Reminiscenzen nur mehr historischen Wert besitzen, dass heute die Vorstellung, Granitmassive seien Komplexe von Sedimenten, die einem normalen Metamorphismus (\pm langsam verlaufendem Metasomatismus) unterlagen, nicht mehr verteidigt werde. Dem ist nun nicht so. In einer Arbeit „On the origin of some granites from Singapore“ hat R. W. VAN BEMMELEN gerade diese Anschauung vertreten. Die Arbeit erschien in „De Ingenieur in Nederlandsch-Indië“. IV. Mynbouw en Geologie. „De Mijningenieur“, im Jahre 1940. Letzteres ist besonders notwendig zu erwähnen, da der Autor dieser Arbeit fast Jahr für Jahr seine Ansichten über die Bildung granitischer Gesteine geändert hat.

Eine kurzgefasste Diskussion mag zugleich Auskunft geben, ob neue Gesichtspunkte oder Beobachtungen zur Wiederaufnahme der alten Hypothesen

geführt haben. VAN BEMMELEN hat in zwei Steinbrüchen (Bukit Timah quarry und Manday quarry) einer grossen, Zinnsteinlagerstätten umfassenden plutonischen Intrusion der Malayischen Halbinsel Proben gesammelt und sich dann die Frage gestellt, ob die Granite und Granodiorite des Sundabogens Produkte fraktionierter Kristallisation von Magmen seien, "or whether they are of mig-matic origin (transformation in situ of pre-existing solid rocks)" ... "Is it possible that at least part of the so called 'holokristalline Eruptivgesteine' derived their 'igneous appearance' by recrystallization of pre-existing material in the solid state?" Es seien ja jetzt neue Theorien entwickelt worden, basierend auf Emanationen, die im festen Gestein Reaktionen und Rekristallisationen auslösen. "The special importance of these theories lies in the fact that they are based on exact observations both in the field and with the microscope, whereas the theories of magma differentiation by fractionated crystallization (such as proposed by BOWEN) are formed by a complex of hypotheses on the course of crystallization of silicate melts."

Schon dieser Satz muss stutzig machen, da er völlig kritiklose Leser voraussetzt. Wie hat man im Feld oder unter dem Mikroskop das Eindringen von Emanationen beobachten können? Was ist komplexer: die unbewiesene Annahme von eindringenden Lösungen oder Dämpfen unbekannten Ursprungs, unbekannter Zusammensetzung und mit unbekannter Wirkung oder die Vorstellung einer fraktionierten Kristallisation einer Schmelzlösung? Das einemal wird von Beobachtungen gesprochen, die nur am Endprodukt ausgeführt werden konnten, und diese werden mit einem Vorgang verglichen. Im gleichen Sinne sind Bemerkungen zu werten: „Magmenemporstieg“ sei ein „deus ex machina“, während Emporstieg von Lösungen oder Dämpfen unbekannten Ursprungs und unableitbarer Zusammensetzung als das Natürlichste und Selbstverständlichste angesehen wird. Dabei ist an gewissen Vulkanen der Aufstieg granitischer Magmen reine Beobachtungstatsache!

Im "Bukit Timah quarry" findet man sehr homogene Biotitgranite mit lokalen strukturellen Variationen ins „Porphyrische“ oder „Aplitische“. VAN BEMMELEN vergisst, dass experimentell mannigfach verschiedene Strukturarten bei Schmelzerstarrungen erzeugt werden können und wundert sich über diese Strukturdifferenzen. Er steht noch auf dem Standpunkte, porphyrische Struktur setze unter allen Umständen einen Hiatus in den Erstarrungsbedingungen voraus, dieser müsste aber dann das ganze Gebiet umfassen. Da dies nicht der Fall sei, könne der Granit kein „Erstarrungsprodukt“ sein. Mit solchen primitiven Vorstellungen sich auseinanderzusetzen wäre sinnlos. Ihm aber gaben sie Veranlassung nachzuprüfen, ob nicht die „Diffusionstheorie“ eine einfachere Erklärung dieser Strukturvariabilität gestatte.

Der Granit wäre danach durch Metasomatose aus Triassedimenten entstanden. Nun erwartet man natürlich eine genaue chemische und mikroskopische Beschreibung der umhüllenden Sedimente, der Übergangsverhältnisse und der Lagerungsverhältnisse. Doch nichts von alledem ist da; es scheint, dass der Autor nicht einmal die Kontaktregion selber studiert hat, denn er schreibt: "These shales occupy the western half of the island and the contact between the granite and the shale lies about one mile to the west of the Bukit Timah and Mandai quarries (according to the geological map by SCRIVENOR, 1924). The contact metamorphism of these arenaceous shales produced fine grained granulitic hornfelses." Trotzdem wird vermutet, die porphyrischen Granite



hätten sich durch Sammelkristallisation aus ähnlichen, von VAN BEMMELEN überhaupt nicht beschriebenen Hornfelsen entwickelt. "According to the hypothesis that the medium-grained granitic texture might be formed by recrystallization and homogenisation of a finer grained granulitic texture, the phenocrystals in the porphyritic state of transition should be younger than the groundmass." Gelingt dieser Nachweis, so sei metamorpher Charakter der Granite wahrscheinlicher als magmatischer. Liegen schon dieser Schlussfolgerung Fehler zu Grunde, da selbstverständlich, wie F. RINNE immer betont hat, Sammelkristallisation auch bei der magmatischen Erstarrung eintreten kann, so sind nun, abgesehen davon, dass der Analogienachweis mit den Hornfelsen überhaupt nicht erbracht wird, die für nachträgliche Bildung der Einsprenglinge angeführten Beobachtungen völlig ungenügend, z. T. sogar der Hypothese widersprechend. Beigegebene Dünnschliffbilder zeigen prachtvoll korrodierte zersprungene Quarze mit Ausfüllung der Einbuchtungen durch die Grundmasse; das aber sind nach VAN BEMMELEN Reste der feinkörnigen Ursprungsstruktur und der Quarz ist eine Neubildung.

Die spärlichen mikroskopischen Beobachtungen lassen sich, wie jeder Leser der Arbeit selbst finden wird, weit zwangloser als Phänomene normaler magmatischer Erstarrung deuten (porphyrtartige Struktur). Sätze wie: "Why should unhindered growth of a phenocryst in a molten matrix produce twinned, even complex twinned crystals instead of completely homogeneous crystals? The phenomena of twinned feldspar crystals seems to be more in favour of the solid-state theory than that of the molten-state conception", zeigen die Schwäche der „Beweisführung“, besonders, wenn man an die intensiv verzwillingten Einsprenglinge von Laven und die oft gar nicht verzwillingten Plagioklase unzweifelhaft metamorpher Gesteine denkt. Doch derartige Interpretationen von Beobachtungen an wenigen Dünnschliffen genügen zur Schlussfolgerung, der Granit sei ein metamorphes Gestein: "The porphyritic granite variety can be seen (!) as a fixed stage in the process of granitisation by homogenisation and transition of fine-grained granulitic (hornfelsic) rocks into the medium-grained granitic rocks. Both granite varieties were formed under the same conditions of pressure and temperature and their textural difference is due only to the extreme slowness of the reactions in the solid state ..."

Noch weniger überzeugend sind die Überlegungen, die am weniger homogenen, mit Aplitadern, Pegmatitnestern und Einschlüssen ausgestatteten Granit des Manday quarry angestellt werden. Hier wird Kristallisation aus Restschmelze (rest-melt) und aus Lösung (solution) als Gegensatz hingestellt (siehe Seite 31) und die Frage gestellt: "Why should the quartz in the one case be the product of crystallization of a rest-melt and in the other be the deposition of a solution?" Ja, warum gibt es Berge, die Vulkane sind und andere, die es nicht sind?!

Unzweifelhaft haben sich KEILHAU, KEFERSTEIN und VOLGER mehr Mühe gegeben, ihre Ansichten plausibel zu machen als VAN BEMMELEN 1940. Eigenartig ist auch die Art, wie er zur Stütze seiner Sätze andere Äusserungen interpretiert, beispielsweise von RITTMANN und CLOOS. "According to these authors the plutonic masses of orogenic zones are all of migmatic origin. This means that they origi-

nated in situ by transformation (ultra-metamorphism) of pre-existing solid rocks by supply of material from the depth (by diffusion in gaseous or fluid states) combined with a general heating of the rocks. Perhaps such a rise of temperature might cause locally palingeneitic magmatic melts of granitic composition" (called "Migma" by Reinhard). Man kann nicht glauben, dass der intrusive, eruptive Charakter solcher granitischer Gesteine von den zitierten Autoren als "transformation in situ" umgedeutet wird. VAN BEMMELEN scheint der „Blumenkohlhypothese“ (cauliflower) zu huldigen, nach der offenbar das intrusive Verhalten nur ein Abbild einer blumenkohlartig sich ausbreitenden Metasomatose ist, was mit jeder Feldbeobachtung im Deckgebirge im krassesten Widerspruch steht. Zwei Fragen drängen sich im übrigen natürlich sofort auf:

1. Warum steigen „Emanationen“ (das ist der von HOLMES bevorzugte Ausdruck) empor?

2. Was führt ausgerechnet immer zu einem granodioritisch-granitischen Endprodukt, so dass unabhängig von den so verschiedenartigen Sedimenten die ursprüngliche Stratifikation völlig verloren geht?

Mystisch mutet die Antwort ⁶⁾ von VAN BEMMELEN an: "The transformation of pre-existing rocks into granites or "granitisation"

⁶⁾ Wenig anders drückt sich übrigens H. G. BACKLUND (Mitt. Naturf. Gesellschaft Schaffhausen, Bd. XVII, 1941, Seite 57) aus: „Die Granitisierung muss, mit Rücksicht auf das dominierende Auftreten des (Granit-)Gneises innerhalb zentraler Teile aller Orogene (vgl. die „zentrale kristalline Achse“ älterer Geologengenerationen), irgendeine Art Endresultat aller metasomatischen Einwirkung darstellen, somit ein bestimmtes, geophysikalisch-chemisches Gleichgewicht repräsentieren“. Und unmittelbar darauf ist diese aus einer Hypothese gefolgerte Forderung bereits Gesetz: „Die Deutungsversuche der Feldbeobachtungen führen somit zu einer bemerkenswerten Übereinstimmung: das Endprodukt einer vollständigen Metasomatose (der Gneis), für welchen der Ursprungsort des Zuschussmaterials unbekannt ist, zeigt eine sehr weitgehende petrographische Ähnlichkeit, ja nahezu eine vollständige Identität mit einem ‚Magmagestein‘, dessen Genesis in Dunkel gehüllt ist (Granit)“. Und damit ist eben auch der Granit eine metasomatisch veränderte Gesteinsart! Dabei ist keineswegs der Beweis erbracht, dass Gneise, die ja oft eine normale Sedimentzusammensetzung oder normale Granitzusammensetzung aufweisen, überhaupt bei der Metamorphose eine Stoffzufuhr erfahren haben. Es ist heute doch undenkbar, dass ein Petrograph aus dem Umstand, dass Quarz, Feldspäte und Glimmer, d. h. Mineralien verschiedenster Bildungsmöglichkeiten, in zwei Gesteinen vorkommen, folgert, die Gesteine seien notwendigerweise gleichen Ursprungs. Es gab eine Periode, wo dieser Trugschluss häufig war, aber auch diese „Universaltheorie“ ist durch die physikalisch-chemische Forschung und die Feldbeobachtung als unzulässige Verallgemeinerung verabschiedet worden. Man kann sich in der Wissenschaft nicht immer mit den gleichen

might be interpreted as a textural and chemical homogenisation of the outer rock shell of the earth. Such a homogenisation fits into the general conception that every process during the evolution of the earth's crusts strives for physico-chemical equilibrium (called by the author: "equilibrio-petal" reactions) ... Granite, in the present state of development (cooling) of our planet, seems to be the ultimate stable rock type in the earth's outer rock shell ..., the chemical and petrographical differences within plutonic masses might be the last traces of the different composite of the pre-existing rock formations which were granitized".

Also an Stelle der Tatsache, dass aus dem Erdinnern basische (gabbroide) bis saure (granitische) Schmelzlösungen (Magmen) hervorbrechen, an Stelle überzeugender, physikalisch-chemisch begründeter Beweise, wie diese sich auseinander entwickeln können oder unter bestimmten Umständen entwickeln müssen, tritt die „weit einfachere Hypothese“, es gebe eine geheime Kraft, die in einer sich abkühlenden Erde Lösungen und Dämpfe emporsteigen lasse, mit dem Ziel, jedes Gestein vom Kalkstein bis zum Sandstein zu Granit umzuformen. Und während jeder Petrograph bemüht ist, ein noch so kleines Problem mit Hilfe vieler Feldbeobachtungen, Dünnschliffe und chemischer Untersuchungen abzuklären, genügen dem Autor die wenigen Beobachtungen zu nachstehender Schlussfolgerung: "The general conclusion of this paper is that modern(!) study of petrology in the field and under the microscope of plutonic masses of granite and associated rocks has resulted in a noteworthy tendency to the conceptions of migmatization, granitization, diffusion, differentiation, etc., in other words: a genesis by diffusions of emanations in the solid state. This study of some granites of Singapore, which by no means claims to be exhaustive on the subject, also provides strong (!) evidences in this direction."

Die VOLGERSche Idee von einer ganz bestimmt verlaufenden Entwicklungsgeschichte im Mineralreich wird ins Grosse übertragen, ohne dass neue Fakten, sorgfältigere Beobachtungen oder Versuche einer theoretischen Begründung zu erkennen sind. Die für eine Erupitivität sprechenden, seit MACCULLOCH durch unzählige Beobachtungen gestützten Erscheinungen scheinen nicht zu existieren.

Im Gegensatz zu den Arbeiten von VAN BEMMELEN stehen die sorgfältigen Untersuchungen von F. K. DRESCHER-KADEN (Beiträge zur Kenntnis der Migmatit- und Assimilationsbildungen, sowie der fehlerhaften Folgerungen auseinandersetzen, wenn neue produktive Arbeit geleistet werden soll.

synantetischen Reaktionsformen, I und II, Chemie der Erde, 12. und 14. Band, 1939/40 und 1942). Hier handelt es sich um äusserst gewissenhafte Beobachtungen und um so ausgezeichnete textliche und bildliche Darstellungen, dass es leicht möglich ist, nachzuprüfen, ob die Schlussfolgerungen zwingend sind. In der während des Druckes dieser Abhandlung erschienenen Arbeit II: „Über die schriftgranitische Kristallisation und ihre Beziehung zur normalen Silikatmetasomatose granitischer Gesteine“ (mit 67 Abbildungen im Text; Chemie der Erde, 14. Band, 1942, Seite 157—238) wird „die Platznahme des Schriftgranites als Resultat metasomatischer Lösungsvorgänge gedeutet.“ Hauptargument ist das Verhalten des Schriftgranitquarzes gegen Perthiteinlagerungen. Quarz soll jünger sein als die Perthitentmischung, noch jünger als Quarz sind häufig die Albitisierungsvorgänge. Die Abbildungen 39 und 40 sind unbedingt verschieden deutbar, Abbildung 42 spricht eher für die ältere Annahme. Auch in bezug auf die Myrmekitbildung (I. Über Schollenassimilation und Kristallisationsverlauf im Bergeller Granit, mit 81 Abbildungen; Chemie der Erde, 12. Band, 1939/40, Seite 304—417) kommt F. K. DRESCHER-KADEN zu neuen Interpretationsversuchen. Im Gegensatz zu F. BECKE deuten nach ihm die „Beobachtungen daraufhin, dass die Kalifeldspatsubstanz — wie es der normalen Bildungsreihenfolge der Kornarten in granitischen Gesteinen entspricht — in der weit überwiegenden Mehrzahl der Fälle jünger als Plagioklas ist. . . . Ferner ist die Myrmekitisierung keineswegs ein erst nach abgeschlossener Gefügebildung einsetzender Vorgang. Die Myrmekitbildung findet ganz überwiegend vor der Kalifeldspatbildung und vor der Platznahme des jüngeren Hauptquarzes statt, welcher nicht selten Myrmekitpartien aus ihrer genetischen Verbindung zwischen Plagioklas und Kalifeldspat herauslöst und sich einverleibt.“ Auch hier sprechen nicht alle Abbildungen eindeutig zu Gunsten der neuen Ansicht, obgleich unbestritten bleibt, dass in vielen granitischen Gesteinen Plagioklas durch Quarz + Kalifeldspat ersetzt wird.

Zunächst zeigen diese ausgezeichneten Beobachtungen im Vergleich mit denjenigen von A. FERSMANN und F. BECKE, wie ausserordentlich vieldeutig Gefügebilder sein können. Nur in seltenen Fällen sind für alle Beobachter zwingende Schlussfolgerungen möglich. Fast stets stützen sich die Interpretationen bewusst oder unbewusst auf eine „besondere Art des Sehens“ und auf Werturteile, die eine mechanisch vielleicht einfachere Deutungsmöglichkeit als komplizierter hinstellen, weil erstere Induktionen und komplexen Verlauf der Kristallisationsvorgänge voraussetzt. Trotzdem muss

selbstverständlich auf diesem Gebiet mit der von F. K. DRESCHER-KADEN angewandten Sorgfalt weitergeforscht werden und mit dem Mut zur Synthese der Beobachtungen.

In bezug auf die Auswertung der Ergebnisse zur Frage der Granitentstehung ist jedoch zweierlei zu bemerken:

1. Die granophyrische, schriftgranitische Verwachsung findet sich besonders häufig in unzweifelhaften Ergussgesteinen und Spaltengängen. Sie ist in analoger Ausbildung (mit anderen Kristallarten) experimentell als Erstarrungsstruktur aus Schmelzflüssen dargestellt worden. Es kann somit kein Zweifel obwalten, dass sie, welches auch ihre spezielle Deutung im Einzelfalle sein mag, als Struktur magmatischer Erstarrung interpretierbar bleibt.

2. Noch scheinen bei den Auswertungen gefügekundlicher Studien drei Vorurteile über die Bildung magmatischer Gesteine eine Rolle zu spielen:

- a) Die Meinung, die Erstarrung einer Schmelzmasse sei ein einmaliger, kurzfristiger Akt. Man muss sich immer mehr daran gewöhnen, dass sich gerade bei plutonischer Gesteinsbildung die Gesamtheit der Vorgänge, die zum mineralogisch und strukturell diagnostizierbaren Endprodukt führt, über Zeiträume erstreckt, die denen der metamorphen Gesteinsbildung unter Kata- und Mesobedingungen analog sind. Dazu kommt die generell relativ hohe Temperatur, die Durchdringung des bereits gebildeten Festbestandes mit restlicher Porenlösung und später noch mit pneumatolytischer bis hydrothormaler Phase, was nicht selten zur Autometamorphose und Warmverformung führt. Das ist eine logische Forderung, experimentell in der Metallkunde in noch keineswegs geologischen Zeiträumen nachprüfbar. In diesem Sinne ist durchaus zutreffend, dass das Studium der magmatischen Gesteine die Erfahrungen der Lehre von der Gesteinsmetamorphose zu Hilfe nehmen muss, dass beiderorts analoge Vorgänge in Betracht zu ziehen sind. Eine allgemeine Gefügelehre muss Begriffe enthalten, die in allen drei Gesteinsklassen auftreten. Unzulässig ist es jedoch, aus derartigen notwendigerweise vorhanden sein müssenden Analogien zu folgern, es gäbe keine magmatischen Gesteine. Immer wieder ist daran zu erinnern, dass es Beobachtungstatsache ist, dass völlig flüssige Magmamassen aus dem Erdinnern hervorquellen und dass die aus ihnen durch

Erstarrung entstehenden Gesteine Strukturen besitzen wie die Gesteine, über deren Bildung man heute streitet. Granophyrische Verwachsungen und Myrmekitbildungen treten bereits in gewissen Basalten auf, die keine Allo-metamorphose erlitten haben und die, soweit mir bekannt ist, noch von keinem modernen Forscher als „nichtmagmatisch“ bezeichnet wurden.

b) Entgegen allen physikalisch-chemischen, experimentellen und theoretischen Ausführungen scheint immer noch die Meinung vorzuherrschen, dass Reaktionsserien, peritektische Umwandlungen, Resorptionen und Wiederausfällungen, Verdrängungen, synanthe-tische Reaktionsformen etwas dem normalen Erstarrungsverlauf eines Magmas Widersprechendes seien. Restschmelzen, die genetisch als eutektische Residua bezeichnet werden können, brauchen gar nicht im weiteren Verlauf „eutektisch“ (ohne Reaktionsvorgänge) zu erstarren. Das sind so prinzipielle elementare Erkenntnisse, dass man sich fast scheut, sie immer und immer wieder in Erinnerung zu rufen. Gerade im Gebiet der Pegmatitbildung und der späteren Stadien der Graniterstarrung müssen fast zwangsläufig derartige Phänomene auftreten. Es sei an folgenden Passus Seite 11 der Abhandlung „Versuch einer natürlichen Klassifikation der im weiteren Sinne magmatischen Erzlagerstätten“ (P. NIOGLI, Abhandlungen zur praktischen Geologie und Bergwirtschaftslehre, Halle 1925) erinnert: „Die Theorie lässt erwarten, dass jetzt an der Grenze von den pneumatolytischen zu den hydrothermalen Lösungen im allgemeinen die Löslichkeitskurve etwas rückläufig wird. Das heisst, im normalen Verlauf der Abkühlung vermögen spätere Stadien der Restlösungen früher ausgeschiedene Mineralien wieder aufzulösen. Selbstverständlich werden solche Reaktionen in komplexen Systemen, infolge der Veränderungen der chemischen Verhältnisse, auch bei hohen Drucken häufig stattfinden müssen (Reaktionsprinzip). Als Löslichkeiterscheinung von allgemeiner Geltung tritt das Phänomen erst bei mittleren Drucken auf. Diese Resorptionerscheinungen sind aus Erzgängen gut bekannt. Sie treten aber oft schon deutlich in Pegmatiten in Erscheinung. Die Figuren 4 und 5 zeigen nach H. SUTER zwei Dünnschliffbilder durch Pegmatite. Die Mikrokline sind stark resorbiert, neu hat sich bei weiterem Abkühlen ein Gemenge von Albit und Quarz (untergeordnet Kalifeldspat) abgesetzt. In der Fig. 5 ist deutlich ersichtlich, wie diese Neubildungen (Albit) in Hohlräumen, die durch Resorption entstanden sind, auch drusenartig auskristallisieren können.“

N. L. BOWEN hat mit besonderer Intensität auf das Reaktionsprinzip bei der normalen Schmelzerstarrung aufmerksam gemacht und bei der Frage der Eklogitentstehung (P. ESKOLA) ist gerade die Kelyphitbildung oft als Ausdruck spätmagmatischer Vorgänge angesehen worden.

Es ist somit, gelinde gesagt, unzutreffend, wenn heute Erscheinungen dieser Art, die von der Eruptivgesteinskunde vorausgesagt und aus diesbezüglichen physikalisch-chemischen Untersuchungen abgeleitet wurden, als „Beweise gegen die magmatische Entstehung“ in die Literatur eingehen.

c) Immer wieder findet man in den Arbeiten der „Granitmetamorphiker“ die Bemerkung, dass die physikalisch-chemischen Experimente ja doch nur an einfachen trockenen Schmelzflüssen ausgeführt worden seien und dass jede noch so sorgfältige Übertragung der Ergebnisse auf die Magmen mit ihren leichtflüchtigen Bestandteilen völlig unzulässig sei. Bereits vor 30 Jahren habe ich (vielleicht als einer der Ersten) dieses Dilemma erlebt und versucht, auf experimentellem und theoretischem Weg eine Abklärung herbeizuführen. Heute ist der Phantasie nur noch ein relativ kleiner Spielraum gelassen; generell lassen sich die neu hinzukommenden Effekte übersehen. Diejenigen jedoch, welche auch jetzt noch natürliche experimentelle Schwierigkeiten so hoch einschätzen, dass sie den Wert des bereits Vorhandenen glauben bagatellisieren zu dürfen, müssen sich darüber klar sein, dass für ihre Ansichten überhaupt noch keine einigermaßen dem Naturvorgang adäquaten Experimente ins Feld geführt werden können. Es ist leicht, dem Gegner vorzuwerfen, es fehle die exakte experimentelle Bestätigung, wenn man zur Erhärtung der eigenen Ansichten überhaupt kaum daran denkt, Experimente auszuführen. Schon seit längerer Zeit beschäftigen wir uns im Mineralogischen Laboratorium der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich mit Versuchen des Kristallum- und -abbaues, wohl wissend, dass sowohl für die Bildung der Eruptivgesteine wie der metamorphen Gesteine diese Vorgänge von Bedeutung sind. Aber alle bisherigen Versuche haben zunächst nur eines bestätigt, nämlich das, dass zu einer eigentlichen pseudomorphosenartigen Metasomatose das Zusammenwirken einer Reihe günstiger Faktoren notwendig ist. Es handelt sich um ein ausserordentlich kompliziertes Geschehen, das nur in der Phantasie der Theoretiker so einfach erscheint, dass bereits der Glaube daran als Erklärung deklariert werden kann.

Beim Lesen der Zitate wird aufgefallen sein, dass Begriffe wie *Migmatite*, *Migmatisation*, *Granitisation* mitverwendet wurden, obgleich sie ihrer ursprünglichen Bedeutung nach etwas anderes bedeuteten. Darin liegt eine grosse Gefahr, weil auf diese Weise Erscheinungen mit umschlossen oder gar zur Stützung der Ansichten herangezogen werden, die unbestritten sind, jedoch prinzipiell auf einer anderen Ebene liegen. Leider sind an dieser Begriffsverwirrung Forscher mitschuldig, die ausgezeichnete Beobachtungen von A. BOUÉ, E. DE BEAUMONT, J. FOURNET, J. J. SEDERHOLM u. a. zu einer „Universaltheorie“ umgestalteten. Es handelt sich um die komplexe Einwirkung, die von Magmen ausgeht und die zur thermischen, pneumatolytisch-hydrothermalen Kontaktmetamorphose, zur Injektionsmetamorphose oder gar zur Assimilation und Umschmelzung der Hüllgesteine führen kann. Das Vorhandensein von Magmen (und später daraus entstandener magmatischer Gesteine) war Ausgangspunkt der Betrachtungen, wurde als Ursache des Metamorphismus angesehen. Fraglich blieb höchstens die Abgrenzung zwischen magmatischen und metamorphen Gesteinen, der Grad der Verunreinigung der Magmen durch Assimilation, die Intensität der Einwirkung der Magmen und der von Magmen ausgehenden molekulardispersen Phasen, und ob eigentliche Umschmelzung mit in Betracht zu ziehen ist.

A. BOUÉ, der 1822 in „Mémoire sur l'Allemagne“ zum ersten Mal die Granite und Syenite Deutschlands als magmatische Gesteine beschrieben hat, entwarf bereits 1824 von der Gneis- und Schieferbildung im Grundgebirge folgendes Bild (*Annales des sc. nat.* 1824, Seite 417 ff.): „La chaleur ignée et les émanations gazeuses de l'intérieur de la terre auraient donné aux schistes peu à peu et sous une plus ou moins forte compression une espèce de liquéfaction ignée... Les éléments des schistes auraient perdu de leur force de cohésion, leurs parties constituantes auraient été écartées les unes des autres, et les émanations gazeuses auraient pu s'insinuer dans les vides ainsi laissés. De cette manière les affinités chimiques auraient pu s'exercer dans certaines limites, posées par les forces adverses de la cohésion, et les parties constituantes des roches auraient pu prendre pendant la liquéfaction et le refroidissement lent un arrangement plus ou moins cristallin suivant les circonstances, et sans déranger ou détruire notablement la structure feuilletée primitive. De plus, le jeu des affinités chimiques aidé par les substances étrangères, introduites, pour ainsi dire, par sublimation dans ces roches, auraient donné naissance à cette foule d'espèces minérales cristallines, qui sont disséminées en nids, en amas et en petit filons au milieu des schistes cristallins.“

Die gesamte Mannigfaltigkeit der Erscheinungen wurde in vorzüglicher Weise um die Mitte des 19. Jahrhunderts von J. FOURNET dargestellt, der vielleicht einer der besten Beobachter war, ideenreich, mit dem Blick für Zusammenhänge, ohne sich jedoch in

unbegründete Spekulationen zu verlieren. Eine der wichtigsten Arbeiten befasste sich mit dem Unterwallis. Sie wurde 1847 unter dem Titel: „Die Metamorphose der Gesteine, nachgewiesen in den westlichen Alpen“ ins Deutsche übertragen und von B. COTTA mit einem Vorwort versehen. In diesem Vorwort heisst es: „Die Eruptivgesteine wirkten je nach der Grösse ihrer Masse, der Art ihres Weges, ihrer Temperatur und der Beschaffenheit, Lage und Temperatur der durchsetzten Gesteine auf diese ein. Mächtige Granitmassen konnten ähnlich wirken, wie der heisse Erdkern, krystallinische Schiefer bilden und das Durchsetzte sogar selbst wieder bis zur Eruption umschmelzen. Geringmächtigere haben nur Hornfels, Knotenschiefer und dergl. erzeugt. Je grösser die Temperaturdifferenzen der sich berührenden Gesteine waren, um so greller wird die Einwirkung an den Contacträndern hervortreten.“ ... „Was nun den vorliegenden Aufsatz Fournets betrifft, so entsinne ich mich nicht, Gesteinsumwandlungen im grossen Masstab so speciell und wissenschaftlich irgendwo nachgewiesen gefunden zu haben.“

FOURNET hat die Variation im Grade der Metamorphose genau verfolgt. Er schreibt: „Auch SAUSSURE gelangte, als er gegen das Ende seiner rastlosen Laufbahn seine Erfahrungen zusammenzufassen suchte, zu dem kurzen Endresultate: „dass es in den Alpen nichts Constantes gäbe, als ihre Mannichfaltigkeit.“ Damals glaubte man, es sei ein vollkommener Skeptiker aus ihm geworden; nichts weniger als das, war dieser Ausspruch vielmehr ein Einwurf gegen die WERNERSche Theorie. Auf seinen Reisen fand er an mehr als zwanzig Punkten Gelegenheit, die damals allgemein gültigen Ansichten bündig zu widerlegen; denn die ausserordentliche Einfachheit jener Theoreme macht sie wohl ganz gewöhnlichen Fähigkeiten zugänglich und geniessbar und kann der geognostischen Constitution mancher Länder wohl angepasst sein; in den Alpen existiert eine solche Einfachheit aber durchaus nicht. Dafür kämpfte SAUSSURE, und die metamorphische Theorie hat ihn vollkommen in seinem guten Rechte bestätigt. In der Reihenfolge der Schichtgesteine, wie wir sie im Vorstehenden verfolgt haben, bestehen ganz regellose Schwankungen zwischen den sehr metamorphischen und den fast unverändert gebliebenen Gesteinen, und diese Schwankungen nehmen zu, je mehr man sich dem Heerde der plutonischen Thätigkeit nähert.“ FOURNET unterscheidet in diesem Alpengebiet, was wir eigentlich auch heute noch tun:

1. die Eruptivgesteine,
2. die sehr veränderten Sedimentärgesteine,

3. die nur unbedeutend modifizierten Gesteinsschichten.

Er betrachtet eingehend die Durchaderungen, beschreibt die Injektionsgesteine, die Marmorisierung, die Anthracitbildung, und ist trotz der Erkenntnis der Mannigfaltigkeit in seinen Verallgemeinerungen noch zu weit gegangen, weil jegliche tektonische Gliederung des Gebietes fehlte.

Gerade beim Studium solcher älterer Arbeiten vorzüglicher Beobachter und richtiger Interpreten von Einzelphänomenen wird uns die Fragwürdigkeit einfacher Deutungsversuche an präkambrischen Gesteinen, deren geologische Geschichte überhaupt nur in grossen Zügen enträtselt werden kann, und die meist nur zweidimensional aufgeschlossen sind, bewusst. Es ist prinzipiell fehlerhaft, dort gewonnene, auf unsicheren Prämissen fussende Anschauungen auf das in seiner Geschichte weit besser erforschte Deckgebirge gewaltsam übertragen zu wollen, wie es anderseits auch falsch wäre zu glauben, Aufschlüsse in tiefstgelegenen Gesteinsformationen könnten uns nicht etwas Neues zeigen.

Andere Arbeiten FOURNETS, das ganze Gebiet der Metamorphose durch Magmen betreffend, sind bereits im historischen Abschnitt des Buches: „Die leichtflüchtigen Bestandteile im Magma“, Leipzig 1920 (Seite 22 ff.) besprochen worden; es sei darauf verwiesen.

Interesse erwecken zwei kurze Notizen über die von FOURNET in den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts benützten Gesteinsklassifikationen im „Jahrbuch für Mineralogie“ 1837 und 1838. Im Bande 1837 (Seite 522 ff.) berichtet Lortet „über die geologischen Vorlesungen des Herrn Fournet in Lyon“, der damals erst 36jährig war. Es werden unveränderte geschichtete Gesteine (Kalke, Dolomite, Gypse, Thone, Sand, Grus, Sandsteine, Puddingsteine, Kombustibilien), Eruptionsgesteine (Quarzgänge, Granite, Syenite, Porphyre, Diorite, Eurite, Gabbro, Melaphyre, Lherzolithe, vulkanische Gesteine, Serpentine usw.) von metamorphen Gesteinen unterschieden. Letztere können einfach umkristallisiert sein bis teilweise umgeschmolzen oder Materialzufuhr oder -wegfuhr erlitten haben. Als Beispiele werden erwähnt: Glimmerige Modifikation des Thonschiefers: A ohne Feldspathisierung (Tonschiefer, Glimmerschiefer verschiedener Art, Chistolithschiefer), B mit Feldspathisierung (Gneise, Leptinite, Granulite). Daneben werden eine Hornblendekristallisation, eine Chloritkristallisation, Talkkristallisation, Asbestkristallisation als besondere Facies, wie wir vielleicht heute sagen würden, ausgeschieden und schliesslich werden „Modifikationen durch beinahe vollkommene Schmelzung der Schiefer“ mitangeführt. Analog werden die metamorphen Produkte von Sandsteinen, Grauwacken, kalkigen Gesteinen, Dolomiten gegliedert. Es ist dies der erste Vorläufer einer Klassifikation, wie sie U. GRUBENMANN dann ausgebaut hat.

Interessant ist der 1838 (Seite 158 ff.) in Briefform erschienene Kommentar zu dieser Systematik von J. FOURNET selbst. Darin wird erwähnt, dass äusserlich analoge Gesteine verschiedener Entstehung sein können, dass sie z. B. deutlich als Eruptionsgesteine oder aber als Einlagerungen auftreten. In erster

Linie wird an Gneise und Diorite (gemeint sind nach dem heutigen Sprachgebrauch in der Hauptsache Amphibolite) erinnert: „Es gibt in Wahrheit Eruptions-Gneisse, Eruptions-Diorite, Eruptions-Protogyne, die ursprünglich geschmolzen waren und in solchem Zustand der Erdtiefe entstiegen sind. Aber von der anderen Seite gibt es auch modifizierte Gneisse, Diorite, Protogyne: Gesteine, welche erweicht gewesen, die mehr oder weniger vollkommen geschmolzen worden und folglich mit den vorhergehenden gemeinschaftliche Kennzeichen tragen müssen.“ „... wie soll man entscheiden, ob dieser oder jener Gneiss, welchen man im Gebirge trifft, ein geschmolzenes Gestein sey oder ein feldspathisierter und zu Glimmer kristallisierter thoniger Schiefer usw. Im Allgemeinen erleichtern geologische Verhältnisse solche Bestimmungen sehr.“

FOURNET hofft jedoch, dass die nähere Untersuchung der chemischen Verhältnisse der Mineralien und des Gesamtgesteins in Zukunft eine sicherere Unterscheidung gestatten werden. „Ich erwähne diese Umstände, um Ihnen den Beweis zu geben, dass ich mich keineswegs unter dem unbedingten Einfluss einer höchst übertriebenen theoretischen Idee befinde, sondern dass ich Wahrheit suche, welche ich nur mittelst solcher genauer Merkmale, wie die erwähnten, finden werde.“

Damit sind einerseits die Fragen Ortho-Paragneis, Ortho-Para-Amphibolit, Schmelzfluss und Gesteinsfliessbarkeit bereits scharf gestellt, andererseits ist darauf hingewiesen worden, dass Metamorphose bei hoher Temperatur bis zur Umschmelzung reichen kann. Auch wird auf Konvergenzerscheinungen aufmerksam gemacht.

Noch sei auf die „Gesteinsmetamorphose I“ (Berlin 1924, Seite 242—367) verwiesen, in der eingehend erläutert wird, wie pneumatolytische Kontaktmetamorphose, Granitisation, Injektions- bis Einschmelzungsmetamorphose, Kontaktmetasomatose, Anatexis, Migmatitbildung, Palingenese in ihren Wirkungen beobachtet werden können. Es sei deshalb nur hinzugefügt, weshalb es in den letzten 15 Jahren dazu kommen konnte, im Widerspruch mit jenen Auffassungen und den klaren Deduktionen von J. J. SEDERHOLM eine „Universaltheorie“ zu entwickeln, die schliesslich dazu missbraucht wurde, fast die Gesamtheit der Granite und Granitgneise zu Migmatiten zu stempeln. Drei Hauptursachen scheinen vorzuliegen:

1. die unerwünschte Ausdehnung des Begriffes Migmatit,
2. eine unkontrollierbare allgemeine Durchgasungs- und Emanationstheorie,
3. die sehr starke Betonung der Wiederverflüssigung fester Erdrindenteile.

Davon gehören in dieses Kapitel nur die ersten zwei Gesichtspunkte.

1. In einer fundamentalen Arbeit hat sich C. E. WEGMANN 1935 (Geologische Rundschau) „Zur Deutung der Migmatite“ geäussert.

Er geht von den Begriffsbestimmungen J. J. SEDERHOLMS aus, nach der *Migmatite* (Mischgesteine) zwei Bestandteile unterscheiden lassen müssen, nämlich

1. das Substrat oder Wirtgestein,
2. die zugeführten Stoffe oder die Zufuhr.

Weniger betont wird der andere Standpunkt SEDERHOLMS, der plutonistische (siehe z. B. J. J. SEDERHOLM: "On Migmatites and associated pre-cambrian rocks of southwestern Finland". Bull. Comm. Géol. de Finlande, No. 77, Helsinki 1926, besonders Seite 138 und die bereits früher von uns zitierten Stellen, sowie nachstehendes Zitat der Arbeit von 1926, Seite 136). "For all these reasons, the present writer (J. J. Sederholm) thinks it necessary to use a designation for these hybrid rocks which really characterizes their appearance and origin. They look like mixed rocks, and they originated by the mixture of older rocks and a later erupted granitic magma, and therefore the name *migmatite* is the most appropriate". Für SEDERHOLM war somit *Migmatit* ein genetischer Begriff.

Das Vorwort von W. C. BRÖGGER zum Festband Sederholm der „Fennia 50“ 1928 beweist, dass dies die allgemeine Ansicht seiner Zeitgenossen war, wie auch SEDERHOLM ausdrücklich betont, dass seine Anschauungen mit denen den gleichen Standpunkt vertretenden der Zürcherschule übereinstimmen. ("Especially in the somewhat modified form in which the ideas of the Zurich school were expressed in the latest work of Grubenmann and Niggli „Die Gesteinsmetamorphose“, the similarity between their ideas and the opinions of the writer is very great", loc. cit. 1926, Seite 120.) BRÖGGER schreibt: „Tu as rassemblé dans un système une série de roches hybrides, produits de l'influence des magmes granitiques sur les terrains sédimentaires et sur les roches basiques ou acides; tu les a groupées en y appliquant tes vues sur leur genèse (artérites, migmatites, agmatites, nébulites, stictolites, gneiss d'injection ptygmatisques, polymigmatites etc.). Tes investigations t'ont amené à admettre des transformations radicales: en injectant les roches encaissantes, les granites auraient pu finalement arriver à les fondre entièrement (anatexis), donnant ainsi naissance à des magmes hybrides agissant de leur côté à la manière du magme initial (palingénèse).“

Auch für WEGMANN sind die *Migmatite* nicht eine Erscheinungsgruppe, sondern eine genetische Gruppe; er unterscheidet jedoch zwei Fälle der Bildungsweise, erweitert somit die genetische Begriffsbestimmung.

„a) Die *Migmatitzone* sensu stricto ist die Randzone eines als Schmelzfluss eingedrungenen Granites;...

b) Die *Migmatitzone* sensu stricto ist in anderem Sinne eine

Übergangszone, nämlich diejenige, in der der Berggrund in ein granitisches Gestein verwandelt wird“⁷⁾).

SEDERHOLM würde b) höchstens zulassen, wenn es heissen würde „in der der Berggrund in ein granitisches Magma verwandelt wird“. WEGMANN hat somit die ursprüngliche genetische Definition bewusst verlassen und von vornherein den Komplex der sogenannten „Granitisation“ und „Feldspatisierung“ der Migmatitbildung subsummiert. Selbstverständlich sind derartige Begriffserweiterungen nicht nur an sich zulässig, sondern oft sogar erwünscht. Sie entspringen meist dem Wunsche, ähnliche Erscheinungen verschiedener Genesis mit ein und demselben bereits eingebürgerten Namen zu versehen, einem Namen, der ursprünglich eine spezifisch genetische Bedeutung hatte. Das besonders von K. H. SCHEUMANN in den Vordergrund gestellte Bedürfnis, Bezeichnungen zu schaffen, die lediglich beschreibenden Charakter besitzen, ist ja in der Tat vorhanden. Sofern jedoch nicht neue Namen gewählt werden, entsteht mindestens für eine Übergangszeit die Gefahr der Verwirrung. Man redet aneinander vorbei, weil die Begriffe in verschiedenem Umfang verwendet werden. Unselbständig denkende Wissenschaftler werden sowohl von der einen wie von der andern Seite verführt, zweckdienliche Argumente mitzubenutzen, selbst wenn zwischen diesen kein Zusammenhang besteht.

Bereits Granitisation und Feldspatisierung braucht man in verschiedenem Sinne:

a) nur mineralogisch-strukturell: Entwicklung einer körnigen Struktur mit Feldspat als Neubildung. Es kann sich um eine reine Umkristallisation und Sammelkristallisation handeln ohne stoffliche Veränderung.

b) „Granitähnlichwerden“ von Gesteinen durch Umkristallisation, verbunden mit pneumatolytisch-hydrothermalen Stoffzufuhr, z. B. Alkalienzufuhr.

c) Granitisation durch Injektionsmetamorphose.

d) Durch Ultrametamorphose entstehende Granitisation z. B. ursprünglich sedimentärer Gesteine, verbunden mit Durchschmelzung oder gar Umschmelzung und Stoffzufuhr. Die paligenetische Graniterstarrung gehört als Grenzfall hieher.

Werden auch a) und b) zur Migmatisationszone gerechnet, so hat gegenüber SEDERHOLM eine Begriffsverschiebung stattgefunden. So verwundert nicht, dass WEGMANN Migmatite als häufige Gesteine

⁷⁾ Es steht „granitisches Gestein“, nicht Granit. Es erhöht natürlich die Vieldeutigkeit.

der oberen Hälfte der Sialschicht bezeichnet, obgleich er ausdrücklich sagt (Seite 318), dass Einschmelzungen und Aufschmelzungen einen geringen Raum im Körper der Gebirge einnehmen. Ein wesentlicher Teil der Migmatisierung und Granitisierung kommt nämlich nach ihm durch molekül- oder atomweise Stoffzufuhr durch das Gestein zustande. In solchen Fällen ist eine Trennung von Substrat und zugeführtem Stoff im Endprodukt meistens nicht mehr sichtbar, es fehlt somit ein wichtiger Teil der ursprünglichen Definition von Migmatit: "They look like mixed rocks". Ausserdem gilt es jetzt in jedem Einzelfalle nachzuprüfen, ob wirklich eine einigermaßen erhebliche Stoffzufuhr stattgefunden hat, denn jedem Petrographen ist bekannt, dass „Anreicherung von Feldspäten“ erfolgen kann, ohne dass die geringste stoffliche Veränderung des Bauschalgesteinschemismus analytisch-chemisch nachweisbar ist. Es gibt eben noch andere alkaliführende Mineralien, wie z. B. die Glimmer, die unter besonderen Bedingungen teilweise durch Feldspat ersetzt werden. Viele Gneise haben genau den gleichen Chemismus wie Glimmerschiefer; ob sich viel oder wenig Feldspat entwickelt hat, ist dann eine Angelegenheit der physikalischen und nicht der chemischen Bedingungen.

So wird selbstverständlich, dass C. E. WEGMANN eine Fülle von Gesteinen der normalen und metasomatischen Metamorphose (mit Stoffwanderung) als Migmatite bezeichnen muss, die weder SEDERHOLM noch die Zürcher Schule so benennen würden. Das ist vorerst eine rein terminologische Angelegenheit.

SEDERHOLM hat die vom granitischen Magma ausgehenden, die Gesteine durchdringenden „Säfte“ „Ichor“ genannt. "The ichor of the granite has been able intimately to penetrate the older rocks, giving them a new, "palingene" eruptivity, even in cases when their chemical composition has remained unchanged. In most cases, however, they have been gradually changed, when soaked with the granitic magma, or its ichor, and their composition has more and more approached that of the new granite".

Nun greift C. E. WEGMANN auf die allgemein gebräuchliche, von GRUBENMANN-NIGGLI besonders betonte Vorstellung zurück, dass an der Grenze zwischen den verschiedenen Kristallarten eines Gesteins bei Bedingungsänderungen die instabilsten Zustände herrschen (siehe „Die Gesteinsmetamorphose I“, Berlin 1924, Seite 159 und 162). „Es kann sich... in dem dünnen Film zwischen den beiden Kristallgittern ein ungeordneterer Zustand bilden, der dem flüssigen oder gasförmigen ähnlich

ist“ (C. E. WEGMANN loc. cit. S. 325). Er nennt diese Zwischenpartien den Intergranularfilm und nimmt an, dass in diesem zugeführte Stoffe wandern können.

Es war folgerichtig, dass daraufhin andere Forscher den Intergranularfilm (der an sich ja gar keine zugeführten Stoffe zu enthalten braucht) auch als „Saft“ oder „Ichor“ bezeichnen wollten und letzten Endes alles Migmatit nennen mussten, das unter Mitwirkung eines Intergranularfilmes oder einer mobilen, Stoffumtausch bewerkstellenden Phase umkristallisierte. Damit war (im Gegensatz zu C. E. WEGMANN, der stets Stoffzufuhr voraussetzte) der Kreislauf geschlossen; praktisch die Gesamtheit der metamorphen Gesteine ist, diesem Sprachgebrauch folgend, zu Migmatiten geworden. Gewonnen wurde jedoch durch diese Begriffsverwässerung nichts. Es war ja ein grosses Verdienst von F. BECKE und U. GRUBENMANN, darauf hingewiesen zu haben, dass Lösungsumsatz oder Stoffumsatz im oben genannten Sinne bei der Gesteinsmetamorphose fast stets beteiligt sind, dass jedoch bei der sogenannten gewöhnlichen Metamorphose in jedem Zeitmoment die Menge der in molekulardispersen oder mobilem Zustand befindlichen Stoffe gegenüber dem anwesenden Festbestand klein ist.

Heute werden unter Führung von J. A. HEDVALL die Reaktionen im festen Zustand erneut eingehend studiert. Wer sich im Laboratorium damit beschäftigt, weiss, wie beschränkt die Wirkung ist, was für Vorsichtsmassnahmen ergriffen werden müssen, um einigermaßen homogene Produkte zu erhalten. Aber ganz unabhängig von dieser Erkenntnis bleibt die Feststellung im Feld und unter dem Mikroskop bestehen, dass metamorphe Gesteine fast durchwegs Effekte besitzen, die nur auf L ö s u n g s u m s a t z rückführbar sind (siehe z. B. „Die Gesteinsmetamorphose I, Seite 171—174 mit dem Schlusssatz: „So wird es möglich, dass ein dem Stress unterworfenen Gestein bei Anwesenheit von Lösungsphasen nicht nur beständig mechanisch, sondern auch chemisch auf dem Wege Fest-Lösung (— eventuell Reaktion) - Fest arbeiten kann und unter bestimmten Umständen sogar arbeiten muss. Der gesamte Umsatz erfolgt im mikroskopischen Bereich, kann aber im Laufe geologischer Zeiträume zu einer mehr oder weniger vollständigen Umlagerung und Neukristallisation führen“; oder ebenda Seite 155—156.)

Selbst wenn wir uns das Produkt als Resultat von Umsetzungen im festen Zustand entstanden denken können, ist zu berücksichtigen, dass die Felsmassen keine absolut trockenen Systeme sind und die natürliche Metamorphose sich an einem vorgegebenen Stoff auswirkt⁸⁾. Nicht immer sind

⁸⁾ Das gilt auch gegenüber H. SENG (Die Migmatitfrage und der Mechanismus parakristalliner Prägung, Geologische Rundschau, Bd. XXVII, 1936, Seite 471 ff.). Mit Recht wird in dieser Arbeit betont, dass Fliesstextur und schlierige Verteilung noch nicht Umschmelzung bedeuten, dass zwischen pseudofluidalem, parakristallinem Verhalten bei der Metamorphose einerseits

Adern, Klüfte oder Zerrungshohlräume um Porphyroblasten vorhanden, die Bereiche abgrenzen lassen, innerhalb welcher unzweifelhaft Kristallisation aus molekulardisperser Phase erfolgte. Das bedeutet aber noch lange nicht, dass beim Fehlen derartiger Strukturbilder Lösungsumsatz fehlte.

Somit führt auch diese Erwägung dazu, gegen gewisse Begriffsausdehnungen Stellung zu nehmen, die sich im Anschluss an einen Nomenklaturvorschlag von K. H. SCHEUMANN bemerkbar machte (Min. Petr. Mitt. Bd. 48, 1936, S. 297 ff.). Migmatite sind für SCHEUMANN grobgemengte Gesteine, mit heterogenem Durchmischungsverband älterer, nicht geschmolzener (wenn auch veränderter) fester Anteile mit jüngeren magmaähnlichen oder magmagleichen Schmelzlösungen. Im Gegensatz zu SEDERHOLM wird über die Herkunft dieser Schmelzlösungen nichts vorausgesetzt; diese können auch an Ort und Stelle entstanden (ausgeblutet) sein, brauchen also nicht von einem granitischen Magma zu stammen. Nach SCHEUMANN'S Definition grenzen nur mehr zwei qualitative Forderungen den Begriff Migmatit gegenüber irgend einem metamorphen Gestein ab, das sind Beteiligung „magmaähnlicher“ Schmelzlösungen bei der Umwandlung und „groggemengt“. Nun gibt es sicherlich Übergänge von der Schmelzlösung zur pegmatitischen Lösung zur wässerigen Lösung oder zu einer fluiden bis gasförmigen Phase. Ichor von SEDERHOLM hat alles umfasst, sofern es von Magmen stammte. Von seinen Migmatiten und unter denen, die SCHEUMANN oder seine Schüler beschreiben, sind sicherlich viele, bei denen die „jüngere Phase“ pegmatitisch, pneumatolytisch bis hydrothermal war. Gerade bei starker Mischung mit dem Festbestand ist auf

und Erstarrung aus dem Schmelzfluss anderseits streng unterschieden werden muss und dass an sich viele Erscheinungen der Migmatite ohne eigentlichen Lösungsumsatz deutbar wären. Aber derartige Möglichkeiten dürfen nicht dazu führen, zu übersehen, dass in der Natur Lösungen eine Rolle spielten, wenn es auch oft sehr schwer ist, aus dem Strukturbild darüber etwas auszusagen. H. SENG erachtet es für unumgänglich notwendig, von der üblichen Vorstellung eines Lösungsumsatzes abzugehen und eine allgemeine Form der Stoffwanderung anzunehmen, „bei der die Stoffe durch das feste Gefüge selbst hindurchwandern.“ Stoffumsatz dieser Art ist selbstverständlich bei jeder konstruktiven Metamorphose mitbeteiligt, trotzdem führt weder das eine noch das andere zu einer wesentlichen Verwischung ursprünglicher Gesteinsgrenzen. Es muss also bei den echten Migmatiten demgegenüber eine merkliche Erhöhung des Stoffumsatzes in der Zeiteinheit vorausgesetzt werden. Wäre diese nicht verbunden mit grösseren Mengen gleichzeitig anwesender Lösungen höherer Temperatur, so würde petrogenetisch kein Grund vorliegen, neben gewöhnlich metamorphen Gesteinen Migmatite zu unterscheiden. Dann würden aber auch alle die Umschmelzung und sekundäre Magmenbildung betreffenden Schlussfolgerungen dahinfallen.

Grund von Studien am Produkt schwer entscheidbar, welches der Zustand der mobilen Phase während der Metamorphose war. Eine derartige Abgrenzung bereitet schon in der Erzlagerstättenkunde Schwierigkeiten, die im allgemeinen heterogenere, leichter entzifferbare Verbandsverhältnisse zu bearbeiten hat. In 50 von 100 Fällen könnte man sich streiten, ob die Lösungsphase als „magmaähnliche Schmelzlösung“ zu bezeichnen ist.

Wo die Grenze „grob“- und „feingemengt“ liegt, ist natürlich gleichfalls eine Ansichtssache, die sich immerhin besser präzisieren lässt. Es müssen sich makroskopische Bereiche abgrenzen lassen, in denen Kristallisationen aus molekulardisperser Phase ohne vorgegebenen Festbestand das Strukturbild bedingen. Auf alle Fälle sind grobgemengt in bezug auf „alten“ Festbestand und „jungen“, aus Lösungen gebildeten Festbestand alle Gesteine mit zahlreichen Adern, Drusen, Gängen usw., also z. B. durchaderte Marmore, durchaderte Schiefer. Bei ihnen war aber die Lösung oft nicht schmelzähnlich, sondern von wässrigem Charakter.

Es lässt sich durchaus die Meinung vertreten, eine nur das strukturell-texturelle Bild charakterisierende Bezeichnung wäre für alle heterogenen Gesteine (mit grösseren zusammenhängenden Partien, die unmittelbar den Übergang molekulardisperse Phase — Fest veranschaulichen) am Platz. Indessen ist zu berücksichtigen, dass die Klüfte, Adern oder „Löcher“ nicht in der heute erkennbaren Mächtigkeit auf einmal von Lösungen erfüllt gewesen zu sein brauchen. Es kann durch langandauernde „Offenhaltung“ von Räumen kleinsten Ausmasses im Produkt eine grössere gleichzeitig im gelösten Zustand befindliche Menge vorgetäuscht werden. Migmatit selbst würde sich übrigens für einen solchen Oberbegriff nicht mehr eignen, da wesentliche ursprüngliche Charakteristika verloren gingen.

K. H. SCHEUMANN hat die Wünschbarkeit eines rein beschreibenden neuen Namens (über die Bezeichnung *Phlebite* hinaus, die nur für eigentliche Adergesteine gilt) erkannt, jedoch die oben erwähnte Einschränkung in bezug auf den vermutlichen Charakter der am Umsatz beteiligten molekulardispersen Phase hinzugefügt. Er schreibt: „Ich mache deshalb den Vorschlag, für solche hellen Bestandmassen, die Schmelz- oder Lösungsanteile repräsentieren, als einen Sammelbegriff einfach das „*Metatekt*“ (Zwischenschmelze) einzuführen.“ Ferner (in „*Metatexis und Metablastesis*“): „In letzter Konsequenz jener Diskussionen, die sich an die ehemalige Begriffsbildung und -Füllung von Migmatit anschlossen, sollte diesem Terminus eine neutrale, seinem Wort-sinn entsprechende Deutung erhalten bleiben oder gegeben werden, d. h. in dem Vorhandensein von Schmelze neben festem Altbestand (*Paläsom* oder *Metasom*) der Tatbestand der Definition gefunden werden. Diese petrographische Definition sagt nichts aus über die Dynamik des zugrunde liegenden Vorgangs. Sie ist also mit jeder dynamischen Deutung der Vorgänge, d. h. mit jeder Richtung des Ablaufes, zu vereinbaren. Das Zustandsfeld solcher

Vorgänge führt über den Bereich der Metamorphose hinaus. Es wird als *Metatexis* (ebenfalls neutral gedacht) bezeichnet, so dass es für die Feststellung einer Metatexis gleichgültig ist, ob im einzelnen Fall der Schmelzanteil als die Injektion eines herangeführten Magmas (*Entexis*) oder einer exsudativen Schmelze (*Ektexis*) endgültig bestimmt werden kann oder beide Vorgänge ineinander verkettet sind.“

Gesteine mit heterogenem Strukturbild dieser Art werden von K. H. SCHEUMANN *metatektische Gesteine* genannt. Treten nur ausgedehnte porphyroblastartige Neubildungen auf, die nicht völlig zusammenhängen, in Zügen, Wolken, Schlieren angeordnet oder unregelmässig verteilt sind, so spricht SCHEUMANN von *Metablastesis*, in der Meinung, dass hierfür „eine Durchströmung des Festen mit gasförmigen, fluiden oder überkritischen Emanationen mit wechselnder Materialzufuhr, aber erheblicher Mobilisation des durchtränkten Stoffes“ nötig war. Letzteres trifft für viele porphyroblastische Schiefer sicherlich nicht in einem aussergewöhnlichen Masse zu, wie ja schon mehrfach betont wurde, dass dieses Nebeneinander von Fest und Lösungsphase während der Gesteinsumbildung nur graduelle Unterschiede kennzeichnen kann.

Es ist nur schade, dass für „metatektisch“ nicht ein anderer Name gewählt wurde, der wirklich gestatten würde, alle Gesteine mit grob erkennbarer „doppelter“ Struktur (Adergneise, Eruptivbreccien, geaderte, wenig metamorphe Gesteine, Marmorbreccien usw.) einem Oberbegriff zuzuordnen, der nichts Spezifisches über die „Lösungsphase“ aussagt und nicht den Anschein erweckt, als handle es sich um etwas grundsätzlich anderes als bei der Gesteinsmetamorphose mit sukzessivem, zeitlich geringem, jedoch langandauerndem Lösungsumsatz. (Es müsste darin die Tatsache des „Sammelns“ einer molekulardispersen Phase in Teilräumen zum Ausdruck kommen.) Denn es ist und muss tatsächlich schwierig sein festzustellen, woher die einzelnen Stoffe solcher „gesamelter“ oder gewisse Bahnen längere Zeit benutzenden Lösungen stammen. Es kommt ja schon im Ruhezustand des Erdrindenteils, besonders aber bei tektonischen Bewegungen, das verschiedene dynamische Verhalten von Festbestand und Lösung (inklusive Emanationen) zur Geltung. Differentialbewegungen müssen auftreten und ergeben oft das Bild der Injektion, ohne dass an grosse Wege und an einheitliche Abstammung aus einem Herd für dieses injizierte Material zu denken ist. In diesem Sinne mag die Bezeichnung „Injektionsgesteine“ oft mit falschen Vorstellungen verbunden gewesen sein; man würde sie ja auch nicht für Kalksteine mit Calcit- oder Quarzadersystemen anwenden. Das „Einspritzen“ ist oft nur ein „Sammeln und Wandern“, während in anderen Fällen Eigendruck und aktive Wegbahnung ausser Zweifel stehen.

Für Gesteine, von denen aus der Begriff Injektionsgesteine entwickelt wurde, die also der Migmatitzone SEDERHOLMScher Prägung angehören, ist aber folgendes zu bedenken. Sie entstammen oft einer Tiefe, in der an sich infolge erhöhter Temperatur die Menge des in einem gegebenen Zeitmoment Gelösten grösser sein wird als in anderen Erdrindenteilen. Es liegen keinerlei Anzeichen dafür vor, dass von diesen Tiefen ab nach noch grösserer Rindentiefe eine Um-

kehr im Temperaturverlauf statthat. Also werden normalerweise diese Zonen in solche der Vorherrschaft des flüssigen Zustandes, d. h. in eine Magmenzone übergehen. Und die verschiedenartige Beweglichkeit von Fest und Flüssig wird zur Vermischung führen, die eine scharfe Bezeichnung der Herkunft der einzelnen Stoffe in der beweglichen Phase erschwert. Gerade in solchen „Injektionsgesteinen“ lassen sich Resorptions- und Assimilationsvorgänge schön verfolgen. Andererseits ist durchaus begreiflich, dass Magmen, die infolge ihres Gehaltes an leichtflüchtigen Bestandteilen noch weit unterhalb 1000° flüssig sind, mit einem Festverband in Kontakt kommen können, der wasserarm oder wasserfrei viel höhere Verflüssigungstemperaturen als das Magma Erstarrungstemperaturen besitzt. Dann müssen durch wirkliches Eindringen und Durchdringen dieser Gesteine mit magmatischen Lösungen Phlebite usw. entstehen. Solche Magmen mit niedriger Erstarrungstemperatur bei hohem Gehalt an Wasser aber sind die granitischen, so dass es durchaus verständlich wird, warum eine Verknüpfung granitischer mit metatektischen Gesteinen so häufig ist. Im Einzelfalle mag es wertvoll sein festzustellen, ob ein Metatekt im Sinne von SCHEUMANN zur Hauptsache ausgeblutet oder von Magmaherden injiziert ist; man kann jedoch mit Sicherheit erwarten, dass in der gleichen Region beiderlei Fälle mit ihren Übergängen angetroffen werden können, so dass ein in dieser Hinsicht neutraler Ausdruck wirklich am Platze ist. Im Grossen gesehen bleibt indessen doch der Zusammenhang bestehen, wie ihn SEDERHOLM gesehen hat. Je weiter sich das Gebiet vom Magmaherd entfernt, umsomehr kommen nur noch Ausblutungen oder rein metamorphe Differentiationen in Frage oder beschränkt sich die magmatische Einwirkung auf „Emanationen“, die keinerlei strukturell grobgemengte Gesteine erzeugen.

Es muss auch davor gewarnt werden, im Sinne von SCHEUMANN überall zwischen Paläsom (alter, nur umkristallisierter Festbestand) Metasom (alter, unter zusätzlicher Einwirkung der zugeführten Phase veränderter Festbestand) und Metatekt unterscheiden zu wollen. Die Wechselwirkung ist meist eine so innige, der Stoffumsatz so mannigfaltiger Natur, dass jede derartige Gliederung (sofern nicht lediglich die Vorherrschaft innerhalb grösserer Bereiche gemeint ist) zu stark schematisiert und zu einem gefährlichen Formalismus führt. Es ist sogar wahrscheinlich, dass in einzelnen Fällen lagige oder gebänderte Textur nichts mit einer Aufblätterung durch Injektion zu tun hat, sondern als Differentiation auf mechanischer Grundlage bei momentan jeweiligen nur geringem Lösungsumsatz gedeutet werden kann. Mikroskopisch ist auf Grund der Strukturen die Entscheidung, ob Metatekt, Paläsom oder Metasom vorliegt, nicht immer durchführbar, wenn auch, trotz aller Konvergenzen, als Ganzes genommen die Strukturen metamorpher Ge-

steine von denen der Eruptivgesteine so verschieden sind, dass ein normaler Granit niemals als metamorphes Gestein angesprochen werden darf.

Wie im übrigen sehr deutlich aus der Arbeit von WEGMANN hervorgeht, wird mit dem Begriff Migmatit oder dem Begriff Zone der Migmatite noch eine andere Vorstellung verknüpft, die mit der Menge der in einem bestimmten Zeitmoment vorhandenen Lösungsphase nur in losem Zusammenhang steht. Es handelt sich um die Fließbarkeit oder Plastizität der Massen (z. B. des Unterbaues) als Ganzes, die zu diapirähnlichen „Intrusionen“ und disharmonischem Verhalten gegenüber starrerem Teilen führen kann. Es wird von „Aktivierung des kristallinen Sockels“, von „Ausstülpungen des Unterbaues“ gesprochen oder z. B. geschrieben: „das aktivierte Material dringt zwischen den alten Massen vor und wird ihnen gegenüber zu Magma“. Was darunter verstanden wird, ist nicht immer mit der nötigen Schärfe formuliert. Innerhalb der sogenannten Migmatitfront WEGMANNs liegen ja auch noch die Imbibitions-gesteine, ja sogar die mit Hilfe des überall vorhandenen „Intergranularfilmes“ umkristallisierten Gesteine. Wenn es Seite 334 der Arbeit von C. E. WEGMANN heisst: „An manchen Orten durchbrechen scheinbar Granitstöcke die aufgefalteten Gneise. Bei genauerer Untersuchung erweisen sich aber manche von ihnen als die umkristallisierten Fortsetzungen der stark verfalteten Migmatite, deren Innenaufbau am Verschwinden ist“, so bleibt die Frage offen, ob an echte, durch Verflüssigung entstandene Magmen, an die Aufwärtsbewegung eines Breies oder nur an die spätere Rekristallisation einer Faltenantiklinale gedacht wird.

Schon C. F. NAUMANN hat vermerkt, dass Granit und Gneis des Untersockels sich in einem plastischen Zustand befunden haben. „Ob aber dieser plastische Zustand durch hohe Temperatur allein, oder durch gleichzeitige Einwirkung von Hitze und Wasser, oder lediglich durch letzteres Element bedingt worden ist, dies sind Fragen, deren Beantwortung noch von der Zukunft erwartet werden muss“ (Lehrbuch der Geognosie, II, Seite 155).

Es war ursprünglich eine wesentliche Streitfrage zwischen U. GRUBENMANN und A. HEIM, wie diese bereits in jungen alpinen Gesteinen im Faltenwurf und der Metamorphose bemerkbare plastische Verformung zustande komme. Es genügte U. GRUBENMANN die Bezeichnung „plastisch“ nicht; er wollte sich ein Bild machen, wie es möglich sei, dass Gesteine, die offenbar stets im grossen dem festen Aggregatzustand angehörten, scheinbar bruchlos verfault und umkristallisiert wurden. Kalt- und Warmbearbeitung der Metalle, aber auch Berücksichtigung des Lösungsumsatzes und Stoff-

umtausches halfen die Begriffe präzisieren. Heute existiert eine ausgearbeitete Nomenklatur der Vorgänge, und es kann kein Zweifel bestehen, dass Texturen dieser Art zustande kommen, ohne dass in irgend einem Zeitpunkt grössere Mengen Flüssigkeit zugegen sind. Wir wissen auch, dass im Verlauf einer normalen Metamorphose ein differentielles Bewegungsbild zwischen in diesem Sinn plastischen und spröden Körpern entstehen kann. Einen Granitgneis tieferer penninischer Decken deshalb schon Migmatit nennen zu wollen, weil er „Fliesstextur“ aufweist, mobilisiert erscheint, geht sicherlich nicht an, wenn man berücksichtigt, dass bauschalchemisch unveränderte triasische und permocarbonische Gesteine im Penninikum den gleichen Grad der „plastischen“ Verformung aufweisen. Es führt wiederum zu einer Begriffsverwässerung, wenn dieser in jedem Einzelfall auf seine Ursachen zurückzuführende „Mobilisierungsgrad“, abgeleitet aus dem Strukturbild, nur für Migmatite als kennzeichnend angesehen wird. Die Verformung braucht ja gar nicht mit der Kristallisation synchron zu sein. Es ist im übrigen wohl zuzugeben, dass die Ansicht H. SENGs (loc. cit.) zu Recht besteht, man dürfe schon wegen der Turbulenz der Bewegungen die Methode der stratigraphisch-tektonischen Analyse nicht ohne weiteres auf grössere Tiefen übertragen.

Die allgemeine und systematische Petrographie ist soweit entwickelt, dass sie gestattet, jedes Gestein zu charakterisieren; sie besitzt neben beschreibenden Begriffen genetisch zu interpretierende Bezeichnungen von relativ engem Geltungsbereich. Generalbegriffe, die aus speziellen Verhältnissen entwickelt wurden, schaden nur, weil sie die schärfere Begriffsbestimmung (z. B. Aufschmelzung, Injektion, Pneumatolyse, hydrothermale Metasomatose usw.) zurückdrängen und Unklarheit schaffen. Andererseits muss man sich hüten, allgemeine genetische Bezeichnungen so eng zu fassen, dass in der Mehrzahl der Fälle der Nachweis der Zugehörigkeit einer Erscheinung zu der betreffenden Kategorie kaum zu erbringen ist. Migmatit ist deshalb unserer Meinung nach an sich überhaupt kein notwendiger Begriff. Lässt man ihm jedoch in gewissem Sinne die SEDERHOLM-SCHEUMANNsche Bedeutung, so ist er zur Charakterisierung von Gesteinsassoziationen brauchbar, in denen sich (unserer Meinung nach) gewisse näher zu beschreibende Komplexe von Vorgängen widerspiegeln. Man sollte ihn beschränken auf Gesteine und Gesteinszonen, die grobgemengt magmatische und metamorphe Strukturbilder aufweisen, die aus der Übergangszone Magma-Festbestand

stammen, und die einer Metamorphose unterworfen waren, während welcher sich im Gesamtgesteinsvolumen neben kristallinen Aggregaten grosse Volumenteile im flüssigen oder fluiden Zustand befanden⁹⁾. Die von SEDERHOLM erwähnte häufige Verknüpfung mit Magmen granitischer Zusammensetzung ist eine Erfahrungstatsache, die jedoch nicht in die Definition einzugehen braucht. Über den Wanderungsweg oder die Herkunft der flüssigen bzw. fluiden Phase sei nichts ausgesagt, derart, dass also Ausblutungen (HOLMQUIST) innerhalb der erwähnten Region mitumfasst werden. Es schliesst sich letztere Erweiterung an das an, was SCHEUMANN vorgeschlagen hat; aber es wird ausdrücklich betont, dass dem äusseren Ansehen nach ähnliche Gesteine entstehen können, die nicht Migmatite genannt werden, weil sie nicht einer innern Grenzregion Flüssig-Fest im Gesamtverband der Erde entstammen. Oft sind dann die aus Lösungen niedergeschlagenen Bestandmassen etwas anderer Art.

Wie mehrfach erwähnt, wäre es ausserdem erwünscht, für die Gesamtheit der Gesteine mit grösseren, makroskopisch deutlich erkennbaren Bereichen einer Kristallisation aus Lösungen eine übergeordnete Bezeichnung zu haben, von der echter Migmatit nur ein Teil ist. Vergleichende Studien würden dann die für die Migmatitzone typomorphen Merkmale erkennen lassen; zugleich würde deutlich werden, dass Migmatitbildung nur ein Grenzfall der Gesteinsmetamorphose ist. Bei praktisch jeder Metamorphose treten Festbestand und Lösung in Wechselwirkung, meist jedoch so, dass momentaner Lösungsumsatz und momentan vorhandene Menge der molekulardispersen Phase sehr klein sind.

Nicht zu Migmatiten gehören (nach SEDERHOLM und SCHEUMANN) Gesteine, die bei gleichmässiger Durchtränkung oder Imbibition (selbst bei Stoffzufuhr) mit einer fluiden, wässerigen oder gasförmigen Phase normal metamorphosiert wurden. Das Merkmal des „grobgemengt“ fehlt, sie sind nicht an die Übergangszone zu Magmen gebunden, können jedoch selbstverständlich in Vergesellschaftung mit echten Migmatiten auftreten. Für sie sind Bezeichnungsweisen mit schärferer Begriffsabgrenzung schon lange bekannt.

⁹⁾ Als Grenzfälle lassen sich dann, wie bei SEDERHOLM, Nebulite und verwandte Gesteine einschliessen, weil durch echte, grobgemengte Migmatite über die Gesamtentstehung der Gesteinsassoziation einigermassen Klarheit besteht.

In dieser Hinsicht wird somit der Erweiterung, wie sie C. E. WEGMANN vorschlug, nicht zugestimmt. Die Gründe sind bereits angegeben worden. Selbstverständlich erfährt dadurch auch der Begriff Migmatitfront (Bereich allgemeiner Mobilisierung und Durchtränkung) eine Veränderung, die notwendig ist, damit nicht praktisch alle kristalloblastisch umgeformten Gesteine und Gesteine mit Kluftausfüllungen mithineingezogen werden. Ein Granit mit eindeutiger Erstarrungsstruktur kann bei Beibehaltung dieser Terminologie naturgemäss auch nicht ein Migmatit sein, selbst wenn das granitische Magma durch Wiederverflüssigung entstanden ist; ebensowenig ein durch Pneumatolyse oder Emanation „granitisiertes“ Gestein. Trotzdem könnten sich durch teilweise Assimilation migmatitische Gesteine granitähnlicher Zusammensetzung (bei noch heterogenem Strukturbild) entwickeln. Mit dem strukturell-genetischen Begriff „Granit“ sind hiebei Verwechslungen ausgeschlossen.

Es sei jedoch nochmals ausdrücklich betont, dass dieser Vorschlag mit den Ansichten von C. E. WEGMANN im Widerspruch steht. Seite 342 der zitierten Arbeit heisst es: „Die Granitisierung wurde in Vorrückstadien, ein Optimum, und Rückzugsstadien eingeteilt; aus allen diesen Stadien können Migmatite in äussere Zonen eindringen und dort als Granit erstarren. Ihre Herkunft ist in diesem Falle gemischt.“ Heisst erstarren „kristallisieren“, so würde das bedeuten, die Intrusivkomplexe seien als Schmelzlösungen eingedrungen; dann sind es wirklich granitische Magmen gewesen oder mit granitischen Magmen durchwobene Komplexe. Das erste hätte nach unserer Definition gewöhnliche Granite geliefert, das letztere Migmatite, die sich eben von den Graniten durch den alten, eingelagerten Festbestand, den niemals vollständig gewesenen Schmelzzustand, unterscheiden. Der Begriff *Migma* (REINHARD) könnte für die letztgenannten, breiartigen, noch nicht völlig erstarrten Raumteile angewandt werden.

Zudem ist zu bemerken, und das ist terminologisch für die Streitfrage der „Granitentstehung“ von grösster Bedeutung, dass C. E. WEGMANN gegen das Wort Magma, das mehrfach gut definiert wurde, eine Abneigung besitzt. In der modernen Petrographie ist der Begriff scharf gefasst und wie wenige praktisch allgemein anerkannt. „Gesteinsmagmen nennen wir eine dem Erdinnern angehörende oder von dort stammende glutheisse „molekulare“ Lösung von grösserem räumlichem Zusammenhang und geologischer Selbständigkeit. Magmatische Lösungen, Gase und Dämpfe, die zur Bildung akzessorischer Minerallagerstätten Veranlassung geben, stehen mit diesen

Gesteinsmagmen in Verbindung. Bei der vulkanischen Eruption fließen die Magmen als Laven aus. Daraus ist bereits ersichtlich, dass die magmatischen Schmelzflüsse eine komplexe Zusammensetzung besitzen, dass neben schwerflüchtigen auch leichtflüchtige Bestandteile in ihnen gelöst sind“¹⁰⁾.

Wenn also C. E. WEGMANN (Seite 343) schreibt: „Der Begriff „Magma“ wird immer mehr angewendet und damit immer nebelhafter. Diese Unklarheit hindert manche Ausblicke auf wichtige geologische und petrographische Probleme, da dieser Begriff statt als Erklärung, als Nebel darüber gelagert wird“, übersieht er die in diesem Falle wirklich eindeutige Begriffsentwicklung und hat statt Magma offenbar „Migmatit“ im Auge. Wohl war früher, bevor von Magmen gesprochen wurde, der Begriff plutonische Gesteine lediglich nebelhaft verbunden mit einer Intrusionsfähigkeit, d. h. einem bildsameren Zustand (siehe Seite 14). Magma aber berücksichtigte von Anfang an die Existenz der Laven und setzte Schmelzfluss voraus. Die Petrographie muss den individuellen geologischen Standpunkt ablehnen, den WEGMANN wie folgt formuliert: „Nach dem ursprünglichen Begriffe wären die Migmatite, die in starrem Rahmen geflossen sind, „Magmen“; sie erfüllen nicht

¹⁰⁾ Auch F. K. DRESCHER-KADEN (Chemie der Erde, Bd. 14, 1942, Seite 234) sagt aus: „Das Wort ‚Magma‘ ist ein Zustands-, kein Stoffbegriff“. Allerdings ist die in der ersten Arbeit des gleichen Autors in Chemie der Erde, Bd. 12, 1939/40, Seite 413 sich vorfindende Diskussion gegenüber einer Abhandlung von G. FISCHER nicht geeignet, Klarheit zu schaffen über die Vorstellung, die DRESCHER-KADEN von Magmen hat. Es ist durchaus denkbar, dass er missverstanden wird, weil er sich absichtlich noch auf keine scharfe Begriffsbildung festlegen möchte. Es schreibt der Göttinger Petrograph: „So ist es unzutreffend, dass ich die Umwandlung meiner Ausgangsgesteine wesentlich nur „am Ort“ vor sich gehen lasse, was mir entgegengehalten worden sei. Ich habe im Gegenteil mehrfach darauf hingewiesen, dass die Gesteine nicht in allen Fällen am Ort geblieben, sondern unter Umwandlung in höhere Niveaus verfrachtet werden können, wo sie, mehr oder weniger diskordant und ortsfremd, das Verhalten echter Eruptivgesteine zeigen“. Und einige Zeilen später: „Von einer vollkommenen ‚Aufschmelzung‘ grösserer Gesteinskomplexe im Sinne einer gleichzeitigen Verflüssigung des ganzen Gesteinsbestandes habe ich ausdrücklich nicht gesprochen!... Zahllose Übergänge dieser Relikte über diffuse Auflösungszone in echte granitische Gesteine beweisen mit vollkommener Sicherheit die Teilnahme derartiger Primärgesteine am Aufbau unserer Granite. Dass in vielen Fällen solche örtlich begrenzte ‚Aufschmelz‘vorgänge eine vollkommene, gleichzeitige Verflüssigung aller Komponenten (zu einer homogenen Schmelze!) voraussetzten, ist von mir ebenfalls nie behauptet worden. Im Gegenteil, es wurde von mir mehrfach die partielle Abwanderung einzelner Stoffe als besonders wesentlich betont, die nur möglich ist bei teilweiser Mobilisierung“.

nur die Bedingung höherer Bildsamkeit, sondern sogar die, dass sie von unten kommen.“ Warum sollten dann Keupermergel oder Salzlager, die in Jurakalke eingestülpt sind, nicht auch „Magmen“ sein, welcher Wirrwarr entstünde an Stelle der wirklich sauberen Begriffsabgrenzung? Und wenn weitergefahren wird: „Die strenge Scheidung zwischen magmatischen Gesteinen und nichtmagmatischen hört eben auf, je weiter man in die Tiefe kommt. Es ist eine Unterscheidung, die für den Oberbau und die Übergangszone passt und für sie aufgestellt wurde. In der Tiefe mag man noch zwischen geschmolzenem und nicht geschmolzenem Material unterscheiden, da dies für die Ausscheidungen, für den Transport und die Erklärung der vulkanischen Erscheinungen wichtig ist“, so ist zu wiederholen, dass unklare problematische Erscheinungen im Grundgebirge klare Begriffsbestimmungen in jüngeren Gesteinsserien nicht beeinflussen dürfen und dass es eben die Frage „Schmelzlösung oder Fest“ ist, die den Petrographen interessieren muss und die zum Begriff „Magma“ geführt hat.

Man umgeht Schwierigkeiten nicht, indem man über klar definierte Begriffe durch Bezeichnungen wie „Bildsamkeit“ und „von unten kommend“ einen Schleier legt, und der Petrograph kann dem Geologen nicht zugestehen, dass er, um eingehende Studien und Entscheidungen vermeiden zu können, seine Begriffe umdeutet. C. E. WEGMANN hätte (unserer Meinung nach) unter Anerkennung der petrographischen Bezeichnungen schreiben müssen: „Während es im Oberbau und der Übergangszone im allgemeinen leicht ist, magmatische Gesteine von nichtmagmatischen zu unterscheiden, bereitet dies in grösserer Tiefe, in alten, auch oft polymetamorphen Erdrindenteilen grössere Schwierigkeiten. Oft erhält man Einblicke in Regionen, die sich längere Zeit im Grenzgebiet Fest-Flüssig befanden und die bereits bei nicht sehr hohem Anteil einer flüssigen Phase relativ mobil waren.“ Er hätte hinzufügen können: „Je nach dem Standpunkt und den Erfahrungen der Forscher mögen dann Gesteine als normal-magmatisch oder normal-metamorph bezeichnet werden, ohne dass für die eine oder andere Ansicht haltbare Beweise vorgebracht werden. In vielen Fällen sind in einem Gesteinskörper nebeneinander normalmagmatische und normalmetamorphe grössere Strukturbereiche erkennbar, die auf die Koexistenz von festem Altbestande und flüssigen Phasen in ähnlichen Mengen hindeuten. Gesteine dieser Art werden *Migmatite* genannt. Fraglich bleibt dann immer noch die Zuordnung einiger anderer im Strukturbild ausgeglichene Gesteine. Sie stehen zwischen mag-

matischen Gesteinen und Migmatiten oder magmatischen Gesteinen und normal-metamorphen Gesteinen grösserer innerer Mobilität (oft mit Stoffzufuhr). Nur ein eingehendes feldgeologisches, mikroskopisches und analytisch-chemisches Studium kann über die speziellen Bildungsverhältnisse mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Auskunft geben. In einer Übergangsstellung stehen auch magmatische Gesteine mit vielen nur teilweise resorbierten Schollen, und Gesteine, bei denen eine eigentliche Verflüssigung zu Magmen nicht vollständig war, so dass Relikte erkennbar sind. Es ist oft zweckmässig, sie noch den Migmatiten beizuordnen. Erschwerend wirkt für die Deutung der Umstand, dass im Endprodukt nicht mehr alle verschiedenen Stadien der Entstehungsgeschichte entzifferbar sind, das Nacheinander wie ein Nebeneinander erscheint.“

Da die Benutzung der U. GRUBENMANNSchen mineralogisch-chemischen Nomenklatur, verbunden mit der die Erscheinungsbilder beschreibenden Nomenklatur von J. J. SEDERHOLM, eine Kennzeichnung stets ermöglicht, kann man in Zweifelsfällen nach gewalteter Diskussion die genetische Zuordnung offen lassen. Der Geologe aber muss sich klar bewusst sein, dass höhere Bildsamkeit, Fließbarkeit, nicht nur Magmen, sondern auch Gesteinen unter gewissen physikalisch-chemischen Bedingungen zukommt, letzteres besonders bei Imbibition oder erhöhtem Lösungsumsatz. Er darf die geologisch-tektonischen Begriffe des Erstarrens im Sinne von „Starrer-werden“ und der „Fließbarkeit“ im Sinne von Plastizität nicht mit den petrographischen Begriffen Erstarren im Sinne von Kristallisieren aus einem Schmelzfluss oder Fließen im Sinne der Intrusion von Magmen verwechseln. Er muss auch berücksichtigen, dass petrogenetisch ein Brei, bestehend aus Magma und aus diesem Magma bereits auskristallisierten Mineralien, etwas anderes ist als ein Brei, dessen Festbestand reliktscher Natur ist. Geologisch-tektonisch können sich beide genau gleich verhalten, petrologisch ist das erste ein in Kristallisation begriffenes Magma, das zweite kann bei grosser Menge des flüssigen Anteils als Migma bezeichnet werden und geht mit abnehmender Menge in ein durch molekulardisperse Phase mehr oder weniger mobilisiertes gewöhnliches Gestein über. Die Grenze ist da zu ziehen, wo sie zweckmässigerweise auch für die Produkte des ersten, die Migmatite, gezogen wird.

Es muss übrigens betont werden, dass bei Annahme dieser Terminologie die genetische Vieldeutigkeit keine sehr grosse ist. Was SEDERHOLM als Migmatit bezeichnete, bleibt Migmatit, was SCHEUMANN als metatektische Gneise abgebildet hat, bleibt Migmatit. Betrachten wir, um ein anderes Bei-

spiel zu erwähnen, den relativ homogenen „Alkalifeldspatgneis“ der Leventina, so drängen sich etwa folgende Alternativen auf:

1. Junger autometamorpher Granit, d. h. granitisches Magma ist während der alpinen Faltung eingedrungen und unter Stress (Piezokristallisation) erstarrt. Die Frage, ob die Bezeichnung „Gneis“ oder „Granit“ anzuwenden sei, ist identisch mit der Frage, inwieweit sogenannte autometamorphe Prozesse zu den metamorphen zu rechnen sind. Die persönliche Entscheidung würde auf „gneisartigen Granit“ lauten. Die Bezeichnung Migmatit kommt nicht in Frage.

2. Es handelt sich um „granitisierte“ Gesteine verschiedenster Art. Granitisierung erfolgte bei Stoffzufuhr, jedoch im Gefolge einer allgemeinen Durchtränkung eines als Ganzes stets fest bleibenden Gesteinskörpers mit molekulardisperser Phase. Der Alkalifeldspatgneis wäre ein metamorphes Gestein der pneumatolytischen bis hydrothermalen Metasomatose. Die Bezeichnung Migmatit ist nicht am Platze, dagegen die Bezeichnung Mischgneis.

3. Die „Granitisierung“ erfolgte als Umschmelzung älterer Stoffbestände unter Materialzufuhr, ohne zum homogenen Magma zu führen. Grössere Volumenmengen wären zur gleichen Zeit jeweils flüssig gewesen. Die Bezeichnung Migmatit wäre ohne weiteres am Platze, wenn das zeitliche Nebeneinander von Altbestand und Jungbestand im Strukturbild erkennbar ist. Da dies nicht zutrifft, ist, wie oben erwähnt, eine Entscheidung in der Benennungsfrage schwieriger. Beim Nachweis dieser Entstehungsart könnte der Name Migmatit jedoch noch einigermaßen verantwortet werden.

4. Ältere granitische Gesteine sind (palingen) unter Bedingungen wie 1) umgeschmolzen. Bezeichnung: palingener, gneisartiger Granit.

5. Ältere Granite sind, selbstverständlich unter Beteiligung von Lösungsphasen und Lösungsumsatz, metamorphosiert worden. An einzelnen Stellen ist jüngeres Magma gangartig eingedrungen. In derartigen Partien ist auch der innere Lösungsumsatz angestiegen, ohne das übliche Mass der Normalmetamorphose in Kata- und Mesozone wesentlich zu überschreiten. Als Ganzes kommt die Bezeichnung Migmatit nicht in Frage. Der Alkalifeldspatgneis ist ein Orthogneis.

Chemischer Charakter, Art der Nebengesteine und der Verbandsverhältnisse schliessen im gegebenen Falle 1 bis 3 nach Meinung von S. CASASOPRA und auf Grund eigener Studien aus, 4 ist gleichfalls unwahrscheinlich, so dass 5 übrig bleibt. Wird von andern Forschern die Unsicherheit grösser eingeschätzt, so ist es wichtig, genau anzugeben, wie sie sich den Bildungsvorgang denken; die Bezeichnung „Migmatit“ ist zu vage, da ja eine Einigung über die Abgrenzung dieses Begriffes noch nicht erzielt ist und das hier Gesagte nur als Vorschlag und als Warnung gegenüber einer bereits vorgenommenen Begriffsumdeutung angesehen werden darf.

Unzweifelhaft ist, dass ein Abgehen von der SEDERHOLM-SCHUEMANNschen Definition Veranlassung war, unter einem Sammelnamen „Migmatit“ Phänomene zu subsummieren, welche die Petrologie schon lange gegliedert hat. Es ist dies umso mehr zu bedauern, weil den Gegnern dieser Begriffserweiterung oft vorgeworfen wird, sie würden die Bedeutung der

Migmatitbildung im ursprünglichen Sinne nicht anerkennen. Das ist keineswegs der Fall: Gesteine dieser Art gibt es, genau so wie manches granitähnliche Gestein bei näherem Studium als Nichtgranit bestimmt werden muss. Dadurch aber, dass man alles Migmatit nennt, ist nichts gewonnen und insbesondere kein Bild über die Häufigkeit des Auftretens derartiger Konvergenzerscheinungen erhalten. Die Gefahr der Überschätzung, man denke an die Arbeit von VAN BEMMELEN, hat sich als bestehend erwiesen.

2. Vermutlich hat die Überspitzung der Emanationshypothese von A. HOLMES mitgeholfen, die Skepsis in bezug auf den Nachweis des magmatischen Charakters eines Gesteins ungebührlich zu vergrössern. Darauf ist bereits in einer früheren Arbeit (diese Zeitschrift, Bd. XVII, 1938, S. 610 ff.) hingewiesen worden, so dass wir uns kurz fassen können. Es sollen ungeheure Stoffwanderungen die Gesteine vollkommen metasomatisch verändern. C. E. WEGMANN, Seite 345/346, schreibt allerdings ganz richtig: „In den bis jetzt untersuchten Gebirgen ist die Quelle der Zufuhr nicht mit Sicherheit festgestellt worden. Sie dürfte aus noch grösseren Tiefen kommen... Die Räume, aus denen die Stoffe auswandern, müssen reich an diesen Stoffen sein. Durch die Abgabe derselben werden sie selber stofflich stark verändert. Wenn wir annehmen, dass sie aus tiefen Schmelzflüssen stammten, so lassen sich zwei Möglichkeiten denken: 1. die Stoffe wurden durch Kristallisationsdifferentiation aus einem Schmelzfluss angereichert; 2. sie wurden durch irgendeinen Vorgang aus einem tieferen Unterbau aufwärts getrieben.“

Es besteht eine sehr grosse Literatur über die Rolle der leichtflüchtigen Bestandteile im Magma, die Möglichkeiten ihrer Abspaltung und ihrer Wirkungsweise. Diejenigen, die sich bemüht haben, auf diesem Gebiet Klarheit zu schaffen, haben wohl die Berechtigung, davor zu warnen, wichtige Erscheinungskomplexe zum Ausgangspunkt einer „Universaltheorie“ zu wählen, den Pfaden L. von BUCHS (Magnesiummetasomatose) folgend. Wenn ein alkaligabbroides, gabbroides oder gar peridotitisches Magma die ungeheuren Mengen von Alkalien liefern soll, die zur Granitisierung von Kalken, Tonen und Sandsteinen nötig sind, so möge man doch einige Berechnungen machen oder den oben erwähnten dritten Satz von C. E. WEGMANN beherzigen. Da sind alle Rechnungen der Differentiationstheorie zehnmal plausibler. Warum finden wir in jenen Gebieten, in denen ungeheure Mengen basischer magmatischer Gesteine erschlossen sind, nie das Ausmass der pneumatolytischen Erscheinungen, das im Kontakt mit Granitmagmen zu beobachten ist? Wie ist es mög-

lich, im fennoskandinavischen Grundgebirge unter den ältesten Gesteinen der Reliktstruktur nach metamorphe Sedimente zu finden, die gar nicht oder nur teilweise metasomatisch verändert wurden? Pneumatolytische Stoffzufuhr ist häufig, aber sie kann nicht zum *deus ex machina* werden, der aus irgend einem Gestein irgend ein anderes Gestein macht. Sie muss auch ihre Ursache haben und die kennen wir in fast allen Fällen, wo der Nachweis gelungen ist. Dass es die sicherlich durchführbare Aufgabe der Petrogenesis sein muss, metasomatisch veränderte Gesteine granitähnlicher Zusammensetzung von Graniten (als Kristallisationsprodukten von Magmen) zu unterscheiden, ist selbstverständlich, und dass es unzweckmässig wäre, derartige metasomatisch-metamorphe Gesteine Migmatit zu nennen, ist bereits hinlänglich begründet worden.

Zusammenfassend darf man wohl sagen, dass Granite und Granodiorite mit den üblichen chemischen, mineralogischen, strukturellen und texturellen Merkmalen den typischen Charakter magmatischer Gesteine besitzen und dass ihre Deutung als normal-metamorphe Gesteine, z. B. als metasomatische veränderte Sedimente, allen Petrographen, die ein grosses Material von Eruptivgesteinen und metamorphen Gesteinen in Feld und Laboratorium untersuchen konnten, unmöglich erscheint. Die neuen Versuche, Granite als derartig metamorphe Gesteine aufzufassen, stützen sich auf keine gründlichen Studien. Echt migmatitische Gesteine sind in einzelnen geologischen Einheiten randlich mit Graniten verknüpft und im Sinne von SEDERHOLM, GRUBENMANN, NIGGLI, HOLMQUIST, BARTH, SCHEUMANN am natürlichsten zu deuten. Sogenannte „granitisierte“ metamorphe Gesteine sind von den Graniten und Granodioriten zu unterscheiden und in bezug auf die Metamorphosenart näher zu kennzeichnen.

Ein ganz anderes und weit schwieriger zu beantwortendes Problem ist ja das der Herkunftsbezeichnung gewisser Gneise. Nennen wir einen Gneis Orthogneis, so wollen wir damit sagen, er sei vor der Metamorphose ein Eruptivgestein gewesen und ohne allzu grosse gesamthafte Stoffveränderung (Zufuhr oder Wegfuhr) umgewandelt worden. Es ist jedoch unzweifelhaft, dass sich manche Gneise, die früher kurzweg Orthogneise genannt wurden, als Paragneise oder Mischgneise erwiesen haben. Mischgneise würden wir sie nennen, wenn bereits das Ausgangsprodukt eine Mischung von sedimentärem und magmatischem Anteil war oder wenn Hand in Hand mit der Metamorphose eine starke Stoffzufuhr den ursprünglichen chemischen Charakter des Eduktes verändert hat. So sind z. B. viele strei-

fige, feldspatreiche Gneise nicht kurzweg Orthogneise granitischer Herkunft, sondern Injektionsgneise, neu metamorphosierte Migmatite oder durch Pneumatolyse oder hydrothermale Alkalizufuhr veränderte Gesteine verschiedener Herkunft. Doch das ist schon lange bekannt. Und gerade zur Lösung dieser wichtigen Problemstellung haben die genannten Arbeiten kaum neue Gesichtspunkte geliefert. Man darf „Vieldeutigkeiten“ dieser Art, besonders etwa feldspatreiche Gneise betreffend, nicht mit der Frage nach den Entstehungsmöglichkeiten der magmatische Struktur aufweisenden Granodiorite und Granite verwechseln.

III. Idiogenesis und Differentiation

Aus einer Schmelzlösung erstarrter Granit ist ein magmatisches Gestein, gleichgültig, ob die Schmelzlösung (das Magma) seit der Erdentstehung bestanden hat, sich aus anderen Schmelzflüssen durch Differentiation entwickelte oder durch Verflüssigung eines Festbestandes entstand. Die Prozesse können kombiniert sein, ein magmatisches Gestein kann lediglich der Rückstand eines Magmas sein; alle diese Möglichkeiten beeinflussen die Begriffe Magma und Erup-tivgestein nicht. Magma ist ein irgendwie und irgend-wo entstandener grösserer, zusammenhängender Raumteil innerhalb der Lithosphäre, der sich in völlig flüssigem Schmelzzustand befindet oder im Begriff ist, aus dieser Phase in den festen Zustand überzugehen. Die Erstarrungsprodukte der Magmen sind die magmatischen Gesteine. Die Vulkanologie lehrt uns, dass es Magmen verschiedener Zusammensetzung gibt, die Petrographie enthüllt die Mannigfaltigkeit der magmatischen Gesteine.

Die Frage, ob es sich hierbei um ein uns zufällig erscheinendes Nebeneinander oder um einigermaßen gesetzmässige Gesteinsassoziationen handle, ist durch eingehende Untersuchungen zu Gunsten des letzteren Standpunktes entschieden worden. Das führte zur Lehre von den magmatischen Provinzen, in der versucht wird, die Regeln des Zusammenvorkommens magmatischer Gesteine festzustellen und zu deuten. Verschiedene Möglichkeiten sind in Betracht gezogen worden. Es wurde nach Kriterien gesucht, die gestatten zu entscheiden, ob der eine oder andere Deutungsversuch richtig ist oder in welcher Häufigkeitsbeziehung verschiedene Ursachen zueinander stehen.

1. Die primitivste Vorstellung ging von einer lokalisierten, mehr oder weniger autochthonen Magmenbildung aus. Die Mannigfal-

tigkeit musste dann ein Abbild der vorher vorhandenen Gesteinsmannigfaltigkeit sein, eventuell modifiziert durch Ausgleichsvorgänge. Dieser Versuch ist vollkommen gescheitert. Es stehen damit im Widerspruch: der zeitliche Ablauf magmatischer Vorgänge, die weitgehende Unabhängigkeit des provinziellen Verhaltens von der speziellen Lithosphärenzusammensetzung in der Nähe der magmatischen Gesteine und die Verbandsverhältnisse der magmatischen Gesteine unter sich. Indessen deuten gewisse Eigentümlichkeiten, die sich jedoch eher als „pathologische Abweichungen den Normalassoziationen gegenüber“ in das Gesamtbild einfügen lassen, auf eine Beeinflussung einzelner Magmenzusammensetzungen und Assoziationen durch Assimilation.

2. Der erste ernsthafte Versuch, verschiedene Magmen bzw. magmatische Gesteine einer Region und einer bestimmten geologischen Epoche genetisch miteinander in Beziehung zu setzen, stammt von R. BUNSEN. Er erkannte 1851, dass sich die magmatischen Gesteine der isländischen Provinz nach ihrem Kieselsäuregehalt in eine Reihe ordnen lassen, in der durch den SiO_2 -Gehalt einigermaßen auch das Verhältnis der übrigen Bestandteile bestimmt ist. Ausgehend von einem normaltrachytischen — wir würden heute sagen granitischen — Magma von 76,67 Gew. % SiO_2 und einem normalpyroxenitischen — wir würden es heute basaltisch nennen — mit 48,47 Gew. % SiO_2 , gelingt es, die Zusammensetzung der damit vorkommenden Eruptivgesteine angenähert als Glieder der Mischungsreihe beider genannten Magmen zu deuten. Deshalb stellte BUNSEN die Hypothese auf, Island würde einen basischen und einen sauren Magmaherd beherbergen, deren Magmen sich mischen können, wodurch die beobachtbare Mannigfaltigkeit der Eruptivgesteine entstehe. BUNSEN hat also erkannt, dass zwischen den Magmen einer geologischen Einheit enge chemische Beziehungen bestehen, die genetisch interpretiert werden müssen. Sowohl diese erste Konzeption der Gesetzmässigkeiten innerhalb einer magmatischen Gesteinsprovinz als auch die Mischungstheorie sind weiter verfolgt worden.

In bezug auf den ersten Punkt scheint eine der interessantesten älteren, leider ziemlich vergessenen Arbeiten die von B. v. COTTA über die „Erzlagerstätten im Banat und in Serbien“ (Wien 1864) zu sein, auf die mich A. STRECKEISEN aufmerksam machte. Von den mannigfaltigen Eruptivgesteinen des Banat, die nach Chemismus, Struktur und Mineralbestand stark variieren, sagt B. v. COTTA (Seite 13): „Trotzdem gehören alle diese Variationen geologisch so entschieden zusammen, dass aus dieser Rücksicht eine gemeinsame Bezeichnung für dieselben höchst wünschenswerth ist. Ich will deshalb hier

sämmtlich als Banatite bezeichnen, ohne damit einen neuen Namen in die Gesteinslehre einzuführen, d. h. ich verstehe unter Banatit kein Gestein von bestimmter Zusammensetzung oder Textur, sondern den Inbegriff aller Eruptivmassen, welche im Banat und den angrenzenden Ländern jedenfalls erst nach Ablagerung der Juraformation, wahrscheinlich sogar erst nach Ablagerung der Kreidebildungen, aber vor den Basalten, und gegenseitig ungefähr gleichzeitig empor eingedrungen sind.“ Und Seite 41/42: „Die Resultate, welche aus der geologischen, mineralogischen und chemischen Untersuchung aller dieser Eruptivgesteine hervorgehen, die ich unter der gemeinsamen Benennung zusammengefasst habe, verdienen, wie mir scheint, ein allgemeines Interesse, da sie einen Fall darlegen, in welchem die plutonischen Erstarrungsprodukte ein und derselben grossen Eruptionsspalte, und ein und derselben, jedenfalls nachjurassischen Eruptionszeit unter sich sehr ungleich ausgefallen sind, sowohl nach ihrer Textur, als auch nach ihrer mineralischen und chemischen Zusammensetzung. Sie zeigen, wie wir sahen, körnige, porphyrtartige und dichte Textur; sie bestehen aus Feldspath, Hornblende, Glimmer und Quarz, von denen bald diese bald jene Species vorherrscht oder ganz fehlt; und sie schwanken durch ihren sehr ungleichen Kieselsäuregehalt zwischen Basiten und Aciditen, wenn es erlaubt ist, diese kurzen Bezeichnungen für die beiden Hauptgruppen der basischen und sauren Eruptivgesteine anzuwenden.“

Dann geht B. v. COTTA dazu über, die Erklärungsversuche (BUNSEN, PETZOLDT, v. RICHTHOFEN) dieser Verschiedenheit und Verwandtschaft zu diskutieren. Zu BUNSENS Hypothese schreibt er: „Wären aber auch solche voneinander getrennte Eruptionsherde im Erdinnern an sich denkbar, so würde es doch unmöglich sein, dadurch zu erklären, dass in allen geologischen Perioden sowohl saure als basische Gesteine eruptiv geworden sind, zuweilen in derselben Gegend und Zeit nahe neben einander oder weit von einander getrennt, aber dabei sehr oft periodisch den Raum wechselnd... Die getrennten Heerde müssten somit oft ganz nahe beisammen gewesen sein, und doch vielfach ihre Lage geändert haben. Befriedigen konnte diese Hypothese nicht.“

PETZOLDT (1840) und später v. RICHTHOFEN (auch SARTORIUS VON WALTERSHAUSEN und, wie wir sehen werden, andere Forscher) hatten eine ursprüngliche Anordnung der Stoffe und auch der Magmen nach ihrer spezifischen Schwere angenommen, wobei schon RICHTHOFEN die Umkehr der Eruptionsfolge durch Umschmelzung älterer Acidite zu erklären suchte. Vielleicht seien die Stoffe auch nach zwei verschiedenen Gesetzen geordnet oder aufgespalten worden. Dazu sagt B. v. COTTA: „Diese Idee ist in der That beachtenswerth. Man braucht dann in der Hauptsache nur einerlei Zusammensetzung des Erdinnern, die sich mit der Tiefe etwas ändert... Die chemischen Unterschiede der Eruptivgesteine sind dann nur Folgen des ungleich tiefen Ursprunges oder der Umschmelzung und Verbindung beim Aufsteigen.“

Allein er erhebt sofort, besonders gegen die Umschmelzung, Einwendungen wegen der Altersfolgen¹¹⁾ der magmatischen Gesteine und erachtet das Problem als noch nicht gelöst.

¹¹⁾ „Wir dürfen endlich nicht vergessen, dass da, wo Basite und Acidite, die einer und derselben grossen geologischen Periode angehören, in einer

Die Problemstellung als Ganzes hat in dieser Frühzeit der Petrologie wohl am besten J. DUROCHER erkannt. Schon der Titel seiner 1857 in den „Annales des Mines“ (Bd. XI, 5. Serie, Seite 217 ff.) erschienenen Arbeit: „Essai de pétrologie comparée ou recherches sur la composition chimique et minéralogique des roches ignées, sur les phénomènes de leur émission et sur leur classification“ zeigt dies. Einleitend heisst es: „Le présent mémoire est un travail de pétrologie comparée; il doit être envisagé comme l'essai d'une synthèse générale des roches pyrogènes, considérées sous le quadruple point de vue de leur constitution chimique, de leur composition minéralogique, de leur émission et de leur classification.“ Auch nach ihm gilt: „... toutes les roches ignées, les plus modernes comme les plus anciennes, ont été produites simplement par deux magmas, qui coexistent au dessous de la croûte solide du globe, et y occupent chacun une position déterminée.“ Er nennt sie „magma acide“ und „magma basique“, gibt Mittelwerte und Grenzen der Variationsbreite an. Das erstere Magma ist das äussere, spezifisch leichtere, das andere das tiefere, spezifisch schwerere. „La croûte solide du globe repose donc sur une zone fluide, composée de deux couches distinctes: la supérieure, qui est la plus réfractaire, est seulement demiliquide ou pâteuse, par suite de la prédominance de la silice, qui se caractérise par sa viscosité, la seconde couche, qui contient beaucoup moins de silice, et qui offre des rapports atomiques variant d'un bisilicaté à un sesquisilicaté, est beaucoup plus fluide et plus dense; en outre, elle paraît être fort riche en oxyde de fer, surtout dans certaines parties. ... C'est dans la couche supérieure que se sont concentrés de préférence les corps les plus légers ou les plus volatils, comme les métaux alcalins, le fluor, le bore, etc., et c'est en effet dans les roches granitiques provenant de cette couche que se trouvent habituellement les minéraux fluosilicatés ou boro-silicatés, comme le mica, la topaze, la tourmaline, etc.“

Genauer werden die veränderlichen Verhältnisse der Bestandteile in den beiden Magmen, eigentlich besser Magmengruppen, studiert. Durch eine Art „Entmischung oder Saigerung“ (liquidation) im Kleinen sollen innerhalb der sauren und basischen Magmen Differenzen entstehen und am Kontakt beider Magmengruppen Vermischungen „d'une nature intermédiaire“. Gesteine solcher Mischmagmen nennt DUROCHER „roches hybrides“ (z. B. Syenite). Trotz-

Gegend neben einander auftreten, sehr oft, wenn nicht in der Regel die Basite die älteren von beiden sind, während man doch eigentlich erwarten müsste, dass die Umschmelzungsprodukte oder die Mittelgesteine zuerst hervorgetreten wären, und dann erst die reineren Produkte der Tiefe.“

B. v. COTTA, loc. cit., Seite 45.

dem soll im Grossen die Einteilung in die sauren und basischen Magmen das Gesamtbild beherrschen. Nachdem auch der Einfluss des Hinzutrittes von Meereswasser zu Magmen (Na-Reichtum) in Erwägung gezogen ist, geht DUROCHER dazu über zu versuchen, festzustellen, ob eine zeitliche Entwicklung in der Magmenförderung erkennbar ist¹²⁾. Die äussere Magmenzone lieferte beim Erstarren die Urgranite (le granite primitif). Es sei selbstverständlich, dass diese Gesteine in den ältesten Zeiten vorherrschten und basische Magmen selten mehr als 1/100 des Raumes einnehmen. Die basischen Magmen seien in diesen „régions cristallines“ auch erst später emporgestiegen, nachdem die äussere Magmenhülle erstarrt war; „les éruptions postérieures appartiennent, pour ainsi dire, à des phénomènes secondaires et consécutifs. Voyons si ces faits ne s'accordent pas avec les conséquences de mes recherches: c'est au moment où, à la suite de dislocations produites en quelques points de la croûte terrestre, surgissent les matières en fusion, que soulevée par la compression qu'elle éprouve de la part des masses susjacentes, et par la puissance expansive des fluides élastiques, la partie supérieure de la zone fluide s'élève le long des fentes; c'est aussi que se sont produites les grandes éruptions qui amenèrent au jour le magma granitique. Mais cette éjection ne pouvait avoir lieu sans changer les conditions d'équilibre du magma basique situé au dessous: une certaine portion a généralement été entraînée, à la suite du magma silicieux, dans les anfractuosités ou les crevasses de la croûte terrestre... Mais, en se solidifiant, les masses granitiques se sont contractées et fissurées; diverses causes de dislocation y ont fait naître, de même que dans les terrains stratifiés adjacents, des fentes à travers lesquelles vinrent s'injecter les portions encore liquides du magma basique déplacé lors de l'éruption du granite. Telle paraît être l'origine des dykes et masses plus ou moins considérables de diorite que l'on voit silloner les formations granitiques et les terrains environnants. D'ailleurs, des parties internes du magma silicieux, non entièrement figées, donnèrent lieu à des effets analogues, et produisirent ces filons et stockwerks de granite ou de pegmatite...“

In der Sekundär- und Tertiärzeit hätte sich eine wesentliche Veränderung vollzogen, die Magmen der unteren Schicht seien jetzt die noch aktiven gewesen, immerhin sei oft auch noch — soweit vorhanden — die obere Magmaschicht zur Eruption gelangt, ebenso hybride Magmen. Zweierlei Eruptionen lassen sich in der neueren Zeit unterscheiden:

„1^o des éruptions de premier ordre, provenant directement des nappes fluides sur lesquelles s'appuie la croûte terrestre;

2^o des éruptions de second ordre, ou consécutives, ayant pour foyers des amas de matière qui sont restés enclavés à l'intérieur de l'écorce du globe (Magmaammern).“

Isolierte Magmaherde verschiedener Tiefe liefern das Hauptmaterial für die Vulkane, in diese könne Meerwasser eindringen und dadurch Na-Dominanz bedingen.

¹²⁾ Nur hingewiesen sei in diesem Zusammenhang auf die Versuche von W. KLUEPFEL (Zentralblatt für Mineralogie 1941), Plutonismus, Alt- und Neuvulkanismus genetisch auseinanderzuhalten, wie das DUROCHER u. a. vor hundert Jahren taten. Beherzigenswert bleibt die Warnung vor einer Überbetonung des Aktualitätsprinzips.

DUROCHER betrachtet also mit BUNSEN granitische Magmen neben basaltischen als ursprünglich (oder wenigstens als uralte, universell verbreitete Saigerungsprodukte). Beiderlei Magmen werden in sich als gesetzmässig variabel angesehen und dazu befähigt, hybride Produkte zu liefern. Die genetische Folge Granit—Aplit—Pegmatit—Lamprophyr (oder jüngere Basalte) wird bereits ähnlich gedeutet wie heute. Die grosse Verbreitung der Granite in ältesten Zeiten ist nach DUROCHER eine Folge der Übereinanderschichtung der beiden Magmenzonen, von denen die äussere zuerst zur teilweisen Intrusion und Erstarrung gelangte. Im Laufe der geologischen Zeiten, bei zunehmender Abkühlung der Erde, musste sich eine bestimmt gerichtete Entwicklung der intrusionsfähigen Magmen bemerkbar machen. Für die damalige Zeit war die Konzeption von DUROCHER eine bemerkenswerte Synthese bekannter Tatsachen. Erst später wurden Erscheinungen eingehender bekannt, die in gewissem Widerspruch zur Theorie DUROCHERS stehen und die auch heute noch von den Geologen oft übersehen werden:

a) Schon in ältesten Zeiten sind ungeheure Massen basischer Eruptivgesteine aufgetreten, beispielsweise in Südafrika und in Nordamerika. Diese wurden fast durchwegs von wenig jüngeren sauren Magmen durchbrochen. Das ist die Umkehr der zu erwartenden Reihenfolge bei von Anbeginn an vorhandener Magmenschichtung.

b) Die nähere Untersuchung der geologisch-tektonischen Zyklen hat ergeben, dass die magmatische Aktivität in den verschiedensten Zeiten mit dem Emporsteigen basischer Magmen beginnt, die erst im Verlauf der Orogenese durch saure verdrängt werden. Oft folgt nach wechsellöser Folge zum Schluss wieder basisches Magma. Auch das widerspricht der einfachen Konzeption einer unveränderlich bleibenden Magmenschichtung.

c) Die eingehende Untersuchung des zirkumpazifischen jungen Kettengebirges hat gezeigt, dass in den letzten geologischen Epochen kaum geringere Mengen granitischer Magmen intrudiert sind als in älteren orogenetischen Epochen. Eine universelle Magmenveränderung ist somit seit dem Archaikum nicht wahrnehmbar. Andererseits konnte festgestellt werden, dass sich in jedem Erdrindenteil der Chemismus der magmatischen Produkte mit dem Grad der Konsolidierung, dem Übergang vom Orogen zum Kratogen, ändert. Diese Entwicklung hat sich in gleichartiger Tendenz in den verschiedenen Abschnitten der Erdgeschichte wiederholt und weist auf Vorgänge hin, die nicht durch eine vorgegebene einmalige und bleibende Konstellation bedingt sind, son-

dern sich immer von neuem abspielen müssen. Dadurch wird die von vielen Forschern (z. B. MICHEL-LÉVY) weiter ausgebauten Zweimagmentheorie und Theorie der Permanenz einer Magmenschichtung durch die Erfahrung widerlegt.

d) In jungen, durch Erosion noch nicht stark abgetragenen Kettengebirgen zeigt sich, dass intermediäre Magmen (mit Andesiten, Monzoniten usw. als Gesteinen) in durchaus wesentlichen Massen emporgedrungen sind¹³). Ihr Empordringen fällt meist in eine Zeit zwischen Beginn und Abklingen der Orogenese. Die Dominanz von basischen und sauren Magmen gegenüber intermediären ist somit wohl anders als durch zwei vorgegebene Hauptmagmen zu deuten. Es scheint sich vielmehr um Anfangs- und Endstadien *einer* Entwicklung zu handeln, deren Mittelglieder nur unter günstigen Umständen (Intrusion bzw. Extrusion im richtigen Zeitmoment) erhalten blieben. Sind die Produkte der Erstarrung nach aussen gewandelter Zwischenstadien bereits erodiert, so bleiben Gesteine der Stammagmen und der Endstadien der einzelnen Entwicklungszyklen als herrschende übrig. Das ist nach den Beobachtungen in den nordamerikanischen Cordilleren, den Anden und den ostasiatischen Inselgruppen die sich unmittelbar aufdrängende Erklärung dieser immer und immer wieder zum Ausgangspunkt von Hypothesen gemachten Dominanzregel.

Die Gegenüberstellung von basisch und sauer als Gegenpolen hat auch noch andere Gründe. Sie ist rein klassifikatorisch zweckmässig und wird, soweit Tiefengesteine in Frage kommen, durch das Farbenbild verstärkt. Schwarze, grünschwarze und schwarz-weiss gesprenkelte Gesteine stehen hellen, rötlichen (red rocks) oder weissen Felsmassen gegenüber. Dabei wird meist übersehen, dass die chemischen Unterschiede zwischen Peridotit und Diorit weit grösser sind als die von Diorit zum Granodiorit, Granit oder Felsit. So entsteht die völlig falsche Vorstellung von einem Hiatus zwischen basischen und sauren Magmen bzw. Eruptivgesteinen, lediglich auf Grund des äusseren Aussehens bzw. des Umstandes, dass bei gegebener Korngrösse von einer gewissen Konzentration an die melanokraten Gemengteile die Gesamtgesteinsfarbe beherrschen. Im Unterbewusstsein kommt noch die früher geheimnisvoll scheinende

¹³) In dem früher schon erwähnten Werk von R. A. DALY (Igneous rocks and the depths of the Earth, New York and London 1933) wird festgestellt, dass von den 9584 Quadratmeilen Ergussgesteinen 3990,6 Andesiten, 255 Augitporphyriten, 12 Trachyten und Phonolithen zugeordnet werden müssen.

Kristallisation des Quarzes aus Magmen hinzu. Es steckt somit in der Überbetonung der Magmenzweiheit (basisch und sauer) ein grosser Teil „wissenschaftlichen Aberglaubens“, Reminiszenzen an eine durch den Fortschritt der Feldpetrographie, Mikroskopie und physikalischen Chemie längst überwundene Zeit.

Bedenken gegen die einfache Mischungstheorie sind übrigens sehr frühzeitig erhoben worden. KJERULF ist von vier, VON HOCHSTETTER von sechzehn Magmen ausgegangen, TH. SCHEERER hat bei einer Verquickung von Chemismus mit Lagerung und Alter (Einteilung in Plutonite, Plutovulcanite, Vulcanite) den Chemismus vieler Magmentypen als „verunreinigt“ angesehen, das Fehlen einer strengen Additivität des Verhaltens der Komponenten innerhalb einer Magmenserie konnte nicht unbeachtet bleiben, usw. Doch in einer etwas anderen Form hat sich bis auf den heutigen Tag der Versuch, granitischen Magmen im weiteren Sinne eine Sonderrolle (Idiogenesis) zuzuweisen, erhalten.

Die sauren Magmen mindestens der jüngeren geologischen Epochen wurden dem „juvenilen“ basischen Magma gegenüber als sekundär bezeichnet, entstanden durch Umschmelzen fester Erdrindenteile. Darauf ist bereits im Kapitel Metamorphismus - Magmatismus aufmerksam gemacht worden. Wer nicht soweit gehen wollte, mehr oder weniger willkürlich Stoffzufuhren anzunehmen, die gestatteten, jedes beliebige Sediment in eine granodioritische oder granitische Schmelze umzuwandeln, setzte in der Tiefe ältere Granite voraus, die durch Wärmezufuhr wieder verflüssigt wurden. Während es in einzelnen Fällen durchaus möglich ist, dass auf diese Weise palingene Granite entstehen, braucht es nur geringe Kenntnisse, um festzustellen, dass solchergestalt das Gesamtproblem der postarchaischen Granitbildung nicht gelöst werden kann. Die jungen Granitintrusionen stehen in keinem ersichtlichen Zusammenhang mit einer älteren Gesteinsverteilung. Andererseits sind nach Chemismus und Mineralbestand so enge Beziehungen zu den jeweiligen altersähnlichen basischen und intermediären Gesteinen einer Provinz vorhanden, dass sich objektiv keinesfalls ein verschiedenartiger Ursprung der basischen und sauren Magmentypen einer geologischen Einheit aufdrängt. Und schliesslich, wenn alte Granite primär sein konnten, ist nicht einzusehen, warum jüngere dies nicht auch sein dürfen, hat sich doch in archaischen und postarchaischen Zeiten in Gebieten ähnlicher geologisch-tektonischer Stellung eine durchaus

analoge Magmenfolge eingestellt. Doch da diese Hypothese vom lithogenen Ursprung der sauren Magmen heute viele Anhänger zählt, muss sie in einzelnen Teilen etwas näher betrachtet werden. Das kann jedoch nur durch Gegenüberstellung mit einer anderen verbreiteten Anschauung geschehen, der Lehre von der magmatischen Differentiation.

Es kann hier nicht der Ort sein, auf die Entwicklung dieser mit dem Studium der magmatischen Provinzen auf das engste zusammenhängenden Theorie näher einzugehen. Wenn auch die Idee der Spaltung und Saigerung gleichfalls sehr alt ist, beruhen die derzeitigen Anschauungen auf Forschungen der letzten Jahrzehnte, die ohne weiteres als bekannt vorausgesetzt werden können. Es handelt sich um die einzige Theorie der Granitbildung, 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 weitergearbeitet wird, umgestaltet hat.

Prinzipiell wird zunächst von den Anhängern der magmatischen Differentiation¹⁴⁾ nur folgendes behauptet: Die Mannigfaltig-

¹⁴⁾ Eine Diskussion über die Differentiationstheorie mit H. G. BACKLUND („Die ältesten Baueinheiten von Fennoskandia. Ein Beitrag zur Deutung des ‚Urgebirges‘, Mitt. der Naturf. Gesellschaft Schaffhausen, Bd. XVII, 1941, Seite 31 ff.) ist leider wenig erfolgversprechend, da dieser Autor eine „extreme, einseitige Anwendung der vielseitig entwickelten Differentiationshypothese“, „eine stark erweiterte Differentiationshypothese“, „eine allzuweit ausgebaute Differentiationshypothese“, „eine konsequente Differentiationshypothese“, „eine allzu konsequente Verwendung einer extrem verallgemeinernden Differentiationshypothese“, das heisst eine nur in der Phantasie des Autors bestehende Lehre angreift, für die uns jegliches Verständnis fehlt. Eine strenge Auslegung dieser uns unbekannten Vorstellungen musste für organogene Sedimentgesteine, graphitführende metamorphe Gesteine, Kalksteine, Quarzite, Phosphatanhäufungen, Konglomerate, Phyllite, „einen magmatischen (Differentiations-)Ursprung fordern“. Und diese Differentiationshypothese müsste nach BACKLUND „unwiderruflich“ zu folgenden Konsequenzen führen:

1. Wegen textureller, struktureller, mineralogischer, chemischer Übergänge zwischen den präalgonkischen Gesteinen sei gleiches primäres Alter der Gesteine notwendig.
2. Weil die Metamorphose Übergänge zwischen der Ausbildung ursprünglicher Tiefen- und Oberflächengesteine geschaffen habe, könne das Aktualitätsprinzip nicht wirksam gewesen sein.

Wer alle diese Erscheinungen in einem jungen Gebirge, dessen geschichtete Gesteine zeitlich bestimmbar sind, beobachten konnte, weiss nicht, was er mit diesem Beweis von „Inkongruenzen“, der zugleich ein Beweis gegen die magmatogene Bildung von Granit sein soll, anzufangen hat. Die Arbeit

keit der magmatischen Gesteine entsteht in jeder Periode der magmatischen Aktivität stets aufs Neue aus einer bereits vorliegenden, weit geringeren Mannigfaltigkeit oder jeweilen gar aus einem mehr oder weniger homogenen Stammagma. Üblicherweise fällt jedoch das Entstehen einer zur Hauptsache oder vollständig durch Umschmelzung bedingten Mannigfaltigkeit, unabhängig von der Zusammensetzung der Frühmagmen einer Periode, heute nicht unter den Begriff der gewöhnlichen magmatischen Differentiation. Da aber gerade in neuerer Zeit die Ansicht eine gewisse Verbreitung erlangt hat, saure Magmen seien nur Umschmelzungsprodukte, während von anderer Seite behauptet wird, zwischen der Bildung der intermediären und sauren Magmen aus basischen bestehe kein prinzipieller Unterschied, umfasst nach dem heutigen Sprachgebrauch der engere Begriff „magmatische Differentiation“ etwa folgendes:

Die Mannigfaltigkeit der Eruptivgesteine einer geologischen Einheit wird in erster Linie durch Vorgänge bedingt, die eine natürliche Folge des Nachaussendringens eines Magmas sind und die von Zustandsänderungen im Magma selbst ausgehen. Die Richtung der Differenzierung und damit auch die Art der entstehenden Produkte kann durch Assimilationen von Gesteinen sekundär beeinflusst werden, primär aber sind innere Faktoren entscheidend

enthält übrigens manche Widersprüche. So steht z. B. auf Seite 49: „Die Schlussfolgerung 2. (zeitliche Änderung im Mengenverhältnis saurer zu basischer magmatischer Tätigkeit) lässt ganz ausser acht, dass alle basischen Gesteine innerhalb des Urgebirges, welche auf Kartenblättern und in den dazu gehörigen Beschreibungen „Amphibolite“, „Dioritschiefer“, „Schiefergabbro“, „Syenite“, „Serpentingesteine“, teilweise auch „Gabbro“ und „Diorite“ benannt werden, trotz der geringeren, chemischen Differenzen mit den „Basalten“ der modernen Zeiten, sowohl geologisch, gemäss ihrer Position und Ausbreitung, als auch in ihrem Chemismus verglichen werden müssen.“ Seite 55 steht: „bereits die ‚Amphibolitisation‘ repräsentiert einen komplexen Typus der Metasomatose“, und ebenda wird von einer „deutlichen chemischen Differenz zwischen Basalt einerseits und dem tiefenäquivalenten Gabbro andererseits“ gesprochen, während auf Seite 59 wieder steht: „Als ‚magmatisch‘ können bislang im eigentlichen Sinne nur die Basalte bezeichnet werden. Durch ihre, im Grossen gesehen, einheitliche Zusammensetzung, ihr chemisches Gegensatzverhältnis zu allen bekannten Sedimenten und ihren bedeutenden Wärmeüberschuss bei der Platznahme, auch an der Erdoberfläche, bilden sie eine Gruppe für sich.“ Dabei weiss jeder Petrograph, dass die den Basalten entsprechende Amphibolitzusammensetzung gerade das Musterbeispiel einer Gesteinszusammensetzung ist, die sowohl einem Ortho- wie Paragestein zukommen kann.

für die Gesamtbreite der beobachtbaren Variabilität. Lediglich spezielle Formen der „magmatischen Differentiation“ sind die einfache und die komplexe gravitative Kristallisationsdifferentiation; dass man zur Zeit hauptsächlich an sie denkt, wenn von der Differentiation kurzweg gesprochen wird, liegt daran, dass diese Theorien am besten ausgebaut wurden und durch Erfahrungstatsachen und Beobachtungen gestützt werden. Da in dieser Zeitschrift (Bd. XVIII, 1938, S. 610 ff.) die Theorie der komplexen gravitativen Kristallisationsdifferentiation ihrem Wesen nach skizziert wurde, können wir sie als bekannt voraussetzen, auch interessiert uns hier nur die Frage der Granitbildung.

Sowohl die Anschauung, granitisches Magma sei im wesentlichen ein Differentiationsprodukt basischer, in Kristallisation begriffener Magmen, als die Anschauung, granitisches Magma könne durch Umschmelzung entstehen, gehen von gewissen Beobachtungstatsachen, Erfahrungen und physikalisch-chemischen Überlegungen aus. In beiden Fällen sind Einwendungen erhoben worden, weil vereinfachte Experimente, die weit davon entfernt waren, ein Abbild natürlicher Vorgänge zu sein, den Verlauf nicht ganz richtig wiedergaben. Das ist so unerheblich, dass es sich kaum lohnt, von derartigen „Gegenbeweisen“ auszugehen. Schon KEILHAU schrieb ja 1837: „Der Fall lässt sich sehr wohl denken, dass irgend eine Tatsache, welche die Chemie bis jetzt noch als problematisch betrachten muss, durch geognostische Verhältnisse aufgeklärt und entschieden werden kann, indessen der Geologe seine Aufmerksamkeit auf die Vorgänge im grossen Laboratorium der Natur richtet, und dadurch zur Erklärung von Erscheinungen gelangt, welche zwar in das Gebiet der Chemie gehören, aber in den künstlichen Laboratorien nicht beobachtet werden können.“

Da das Gewicht der Beobachtungen und Tatsachen, die für die Wirksamkeit einer magmatischen Differentiation im Verlauf der Magmenintrusion und der Abkühlung sprechen, gross ist, wird ernsthaft diese Erscheinung als ein Mannigfaltigkeit erzeugender Vorgang nicht bestritten. Es wird jedoch von verschiedenen Seiten behauptet, Vorgänge dieser Art könnten niemals die beobachtbaren Mengen granitischer Magmen erzeugt haben; zur Differentiationstheorie müsse eine Theorie der Idiogenese granitischer Magmen hinzukommen. Mit einigen Einwendungen dieser Art müssen wir uns somit beschäftigen.

a) Allgemeine Erwägungen. Der grösste Teil derartiger Einwände fällt unter das in dieser Arbeit nur gestreifte Thema

„Magmentektonik - Krustentektonik“. Immerhin soll auf einige Punkte aufmerksam gemacht werden. In einer für unsere Problemstellung wichtigen Arbeit: „Über Assimilationsvorgänge, Migmatitbildungen und ihre Bedeutung bei der Entstehung der Magmen, nebst einigen grundsätzlichen Erwägungen“ (Chemie der Erde X (1936) 271 ff.) hat F. K. DRESCHER-KADEN mit Recht darauf aufmerksam gemacht, dass die Frage der „Vorgeschichte“ der Magmen zu wenig beobachtet werde.

„Wie ist hier weiterzukommen? Wir werden niemals in der Lage sein, die Bildung einer magmatischen Schmelze durch Beobachtung kennenzulernen. Wir können aber durch eine neue Beobachtungskritik an den Erscheinungen erstarrter Schmelzen (Grenz- und Übergangsbildungen) und durch die Diskussion der in der Erdkruste vermuteten Zustände Fortschritte erzielen.“

In der Tat begnügt sich der Petrograph, der die Gesteinsbildung betrachten will, meist, wenn der Nachweis der Entstehung aus einem Magma (das er noch nicht Gestein nennt) erbracht ist. Wie mehrfach betont wurde, spielt es für die systematische Einordnung des magmatischen Gesteins keine Rolle, ob das Magma von Urbeginn an da war, durch Assimilationen sich verändert hatte, vorher sich in einem glasartigen oder kristallinen Zustand befand oder aus einem in Aufschmelzung begriffenen Gestein abgequetscht wurde. Jeder andere Standpunkt würde bei der notwendig hypothetisch bleibenden Beantwortung derartiger Fragen von unabsehbaren Folgen für die Systematik sein. Naturgemäss darf dies nicht bedeuten, man solle sich mit diesen Problemen nicht beschäftigen. Sicher scheint zu sein, dass in Abhängigkeit von den geologisch-tektonischen Bedingungen früher inaktive Erdrindenteile zu mobilisierten, aktiven Magmen werden. Welches der Zustand dieser Raumteile vorher war, wissen wir nicht. Es ist durchaus denkbar, dass sie unter gewissen Bedingungen „feste“ Konsistenz hatten. Ja, wenn sie aus einem kristallisierten Zustand langsam in den Schmelzlösungszustand übergeführt wurden, wobei erstgebildete Teilschmelzen als Magmen abgequetscht wurden oder infolge geringer spezifischen Gewichtes emporstiegen, wäre dieser Vorgang nicht anders zu bewerten als das Abquetschen der Restschmelze eines in Kristallisation begriffenen Magmas. Er würde somit in einer Art Umkehr einen Teil der komplexen gravitativen Kristallisationsdifferentiation darstellen und keinesfalls zu ihr im Gegensatz stehen. Erst wenn behauptet wird, gewisse Magmen, wie die granitischen, seien durch eine totale oder teilweise Wiederverflüssigung aus ganz andern Gesteinen entstanden als basische und intermediäre, die Mannigfaltigkeit sei also weitgehend oder

völlig vorbedingt gewesen, wird die normale Differentiationstheorie tangiert.

Es waren sehr verschiedenartige Überlegungen, die dazu führten, periodischen Aufschmelzungsvorgängen insbesondere ursprünglich sedimentärer Gesteine eine grössere Rolle zuzuschreiben als der Metamorphiker, dem Einzelprozesse dieser Art wohl bekannt sind, gemeiniglich annimmt. Bevor etwas Genaueres über den „Wärmehaushalt“ der Erde bekannt ist, bleiben sie alle völlig hypothetischer Natur.

Selbst die Ausführungen von F. K. DRESCHER-KADEN (loc. cit. Seite 289) überzeugen nicht ohne weiteres, da tektonisch vieles für den Satz von P. ESKOLA spricht: „The sial crust has thus grown gradually thicker during the geological ages and is still growing“. DRESCHER-KADEN schreibt: „Will man dieses letztere (dass auch sedimentäres Material am Aufbau eines echten Eruptivgesteines Verwendung finde) aber nicht annehmen, sondern alle Tiefengesteinsmassen einschliesslich der Injektionsgneise und das zugeführte Injektionsmaterial als juveniles Material ansehen, so müsste die obere Erdkruste durch die dauernden Intrusionen seit dem Archaikum einen Schwellungsprozess durchgemacht haben, der eine einfach unvorstellbare Verdickung der oberen Krustenteile bewirkt hätte“. Und weiter: „Es kann nicht der obere Teil der Kruste verdickt werden, ohne dass die nach oben geförderten Massen durch Absinken anderer aus höherem Niveau und Wiedereinschmelzung kompensiert werden“. Oder Seite 302: „Allgemein aber ist die Existenz solch riesenhafter intrakrustaler Magmenherde, auf welche z. B. die Grundgebirgsbildung unserer Kontinentalsockel zurückgeführt werden könnte... nicht recht glaubhaft.“

Zu beachten ist, dass nach unseren geophysikalischen Kenntnissen eine derartige Mobilisierung oder gar Aufschmelzung (auch wenn sie durch Überdeckung erzeugt wird) normalerweise von unten nach oben stattfinden muss. Selbst wenn in höheren Niveaus Gneise und Granite anstehen, in der Tiefe basische Gesteine, sind die Verflüssigungstemperaturen der Granite relativ hoch, denn sie sind nicht identisch mit den Kristallisationstemperaturen des wasserreichen granitischen Magmas. Durchdringen aber von unten her reichlich Dämpfe die Masse (die Verflüssigungstemperatur herabsetzend), so ist das wieder ein Anzeichen, dass dort, in der Tiefe, die Aktivität einsetzte.

Gegen eine weitgehende vollständige Wiederaufschmelzung der kristallisierten Sialkruste hat sich übrigens auch P. ESKOLA in der wichtigen Arbeit: „On the origin of granitic magmas“ (Min. Petr. Mitt. 42, 1932, 455 ff.) gewandt. Mit N. L. BOWEN betont er die sehr grosse dazu nötige Wärmezufuhr, erachtet aber mit uns die Teilbildung von Lösungen (das „Ausbluten“) als möglich.

Es sprechen nun sehr viele Erscheinungen dafür, dass in jenen Erdtiefen, die zuerst aktives Magma abgeben, basisches basaltisches

Magma vorhanden ist. Es ist an die Plateaubasaltmassen und an das Emporsteigen derartiger Magmen zu Beginn jeder mit magmatischer Aktivität verbundenen Orogenese zu erinnern. Deshalb ergibt sich ganz von selbst die Frage, ob aus diesem oft (fälschlich) Sima genannten Stammagma die anderen Magmen nicht durch Differentiation entstehen können. Dass alle durch Übergänge miteinander verbunden sind, ist durch geologisch-petrographische Beobachtungen und chemische sowie mineralogische Untersuchungen erwiesen. Aufschmelzungsprozesse der darüberliegenden Sialkruste, die nach der Mobilisierung des „Sima“ einsetzen, hätten dann nur mehr zwei Effekte:

α) Sie können durch die Veränderung des ursprünglichen Magmas der Differentiation desselben eine bestimmte Richtung geben.

β) Sie führen zu den ultrametamorphen Gesteinen im eigentlichen Magmenkontakt und in der Region vermehrten autochthonen Lösungsumsatzes.

Nirgends aber sprechen die chemischen Verhältnisse dafür, dass kurzweg die basischen Magmen einer magmatischen Aktivitätsperiode simischen, die sauren sialischen Ursprungs seien.

b) Die Granit-Gneisbeziehung¹⁵⁾. Zur Stütze des lithogen-sialischen Ursprungs der Granitmagmen wird oft auf die im Feld

¹⁵⁾ Hingewiesen sei auf die primitive Darstellung des Granit-Gneisproblems in H. G. BACKLUND (Die ältesten Baueinheiten von Fennoskandia. Ein Beitrag zur Deutung des „Urgebirges“, Mitt. der Naturf. Gesellschaft Schaffhausen, Bd. XVII, 1941, Seite 31 ff.) für ein Gebiet, das nach dem Autor selbst verschiedene Orogenperioden verbunden mit Metamorphose durchgemacht hat. Eine neue Begriffserweiterung macht sich übrigens hier bemerkbar (Seite 52/53): „Unter den texturellen Eigenheiten, welche Gesteine von metasomatischem Gepräge zu kennzeichnen pflegen, erweckte vor allem die Parallelanordnung von Mineralkomponenten innerhalb von scheibenförmigen oder flachlinsenförmigen, miteinander abwechselnden Einheiten Interesse“. Es wird nicht lange gehen und man wird lesen können, jede Abbildungstextur (tektonischer oder sedimentärer Herkunft), jede Bänderung sei ein Beweis für Metasomatose. Das würde nichts anderes bedeuten, als dass man den inneren Stoffaus- und -umtausch gleichfalls Gesteinsmetasomatose nennt, während bislang eine Materialzufuhr zum Gesteinssystem für den Begriff als massgeblich angesehen wurde. Die „innere Metasomatose“, die mit jeder chemischen Reaktion verbunden ist, galt nicht als typisch, wenn von Metamorphose mit („äusserer“) Metasomatose gesprochen wurde; und dabei soll es bleiben, sonst wird selbstverständlich nicht nur jedes kristalloblastisch-metamorphe Gestein, sondern auch jedes echt magmatische Gestein zu einem „metasomatischen“, denn in beiden Fällen hat in kleinen Teilräumen eine Änderung des Stoffbestandes stattgefunden. Unbenommen bleibt natürlich, dass

beobachtbare, bereits in einem früheren Abschnitt besprochene enge Beziehung zwischen Graniten, Injektionen und Gneisen hingewiesen. Neben K. F. DRESCHER-KADEN (loc. cit.) sei etwa auf die Arbeit von O. H. ERDMANNDOERFFER (Studien im Gneisgebirge des Schwarzwaldes. XI. Die Rolle der Anatexis. Sitz. Ber. Heidelberger Akad. Wiss. 1939. Abh. math.-nat. Kl.) hingewiesen. Es ist selbstverständlich, dass sich diese Übergänge zweifach deuten lassen: Die Nähe des granitischen Magmas schuf die für eine Ultrametamorphose günstigen Bedingungen oder das granitische Magma ist nur das Endresultat der Ultrametamorphose. Keine der von DRESCHER-KADEN oder ERDMANNDOERFFER angeführten Argumente (strukturelle Übergänge, Konvergenzerscheinungen, usw.¹⁶⁾ sprechen gegen die erste Annahme, die ja „Ausblutungen“ (P. J. HOLMQUIST, TH. BARTH) infolge Temperaturerhöhung und Imbibition mitberücksichtigt, ohne vielleicht soweit zu gehen, kurzweg zu sagen, die „Gesteine seien im eigenen Saft geschmort“ worden. Dagegen aber spricht sehr vieles:

Zunächst macht schon P. ESKOLA loc. cit. Seite 460 auf folgendes aufmerksam. „In the Archaean granite masses the traces of movements, i. e. the parallel and linear textures, are mostly directed upwards, proving that the magma has moved in that direction“. In welchem Ausmasse solche differentielle Aufwärtsbewegungen erfolgten, ist natürlich schwer feststellbar; auf alle Fälle ist das Vorhandensein kein Beweis für autochthone Magmenbildung. In jüngeren, weniger metamorphen Gebirgen ist diese Intrusion deutlich, die Injektion, Teilassimilation und Pneumatolyse oft immer noch gut erkennbar, jede Entstehung des Granitmagmas aus seinen jetzigen begleitenden Gesteinen durch einfache Umschmelzung jedoch völlig ausgeschlossen. So schreibt DRESCHER-KADEN (loc. cit. Seite 300) „Jeder jüngere Granit liegt ja als o r t s f r e m d e Schmelze gar nicht mehr neben seinem primären Nebengestein. Daher sind chemische Beziehungen zum eigentlichen Ausgangsmaterial nur in den in Gneisgebieten wurzelnden Graniten festzustellen.“ Sieht man aber in herzynischen und jüngeren Kettengebirgen, dass granitische Magmen

dieser innere Stoffumtausch, verbunden mit Verdrängungen und Kristallblastese, unter die metasomatischen Prozesse im weiteren Sinn eingereiht wird. Aber wenn ein Gestein als metasomatisch-metamorph bezeichnet wird, sollen von aussen kommende Lösungen den Gesteinschemismus verändert haben.

¹⁶⁾ Es wird oft viel zu wenig berücksichtigt, dass nachträglich Metamorphose ursprünglich schärfere Unterschiede zwischen magmatischen und metamorphen Strukturen verwischt. Das ist jedem Alpengeologen wohlbekannt.

gewandert sind, von unten emporstiegen, sicherlich nicht an Ort und Stelle entstanden, so ist nicht einzusehen, warum bis zu einem gewissen Grade das nicht auch bei früheren Gebirgsbildungen der Fall gewesen sein soll. Die Probleme der Raumbeschaffung müssen ja sowieso für die jüngeren Granitschmelzen gelöst werden, und die Analogie im Mineralbestand polymetamorpher Gneis-Schiefergesteine mit Granit nötigt keinesfalls nach einer ganz andern Genese Umschau zu halten.

Dabei sei durchaus zugegeben, dass im Gebiet der Archaiden tiefere Einblicke in die Erdrinde möglich sind, doch reichen diese nie bis in die zu postulierende Simaregion. Es ist also unterhalb der Aufschlüsse noch genug Raum vorhanden für die Granitmagmenbildung auf dem Wege einer Differentiation des auch in diesen Gebieten jeweiligen erstaktiviert gewesenen basischen Magmas. Bestehen bleibt ausserdem, dass palingene Granite vorgebildete Granite voraussetzen, also eine vollständige Lösung des Problems auf diesem Wege nicht erfolgen kann, es sei denn, man nehme die Granitisationstheorie durch Stoffzufuhr an. Die chemischen Verhältnisse gestatten naturgemäss Serien von pneumatolytisch beeinflussten Gneisen über Injektionsgneise zu Graniten aufzustellen; aber derartige Diagramme unterscheiden sich meist wesentlich von Differentiationsdiagrammen, die von basischen zu sauren Magmen einen einheitlichen Charakter besitzen. Gneise dieser Zone sind eben doch im Gegensatz zu Granit parakristallin metamorphe Gesteine von einem ganz bestimmten Phänotypus, und es ist H. SENG zuzustimmen, dass Strukturbilder fraglicher Entstehung relativ seltene Ausnahmen sind. Stoffwanderungen können zu Konvergenzen mit magmatischen Strukturen führen, auch wenn im wesentlichen die Metamorphose im festen Zustand erfolgte. Das spricht in vielen Fällen gegen die Notwendigkeit der Annahme einer weitgehenden Umschmelzung und damit auch einer häufig verbreiteten lithogenen Magmenbildung. Und es dürfen derartige Beobachtungen niemals dazu führen, Magmen überhaupt zu leugnen und von Gesteinen mit deutlichem magmatisch-assoziativem Verhalten zu behaupten, sie seien kurzweg metamorph.

Es lässt sich somit feststellen, dass die Granit-Gneisparagenese, die Migmatitbildung und beobachtbare Anatexis an sich keine Entscheidung über die Herkunft der granitischen Magmen als Ganzes gestatten. Keinenfalls folgt aus diesen unbestrittenen Phänomenen, dass der Grossteil oder auch nur ein wesentlicher Teil echter granitischer Gesteine im Gegensatz zu andern Eruptivgesteinen umgeschmolzenes Sial sei.

c) Die fundamentale Zweiteilung der Magmen in basische und saure. Darüber ist bereits Seite 51 berichtet worden. Von Anhängern der Anschauung: jüngere Granite seien genetisch etwas prinzipiell anderes als ältere Granite, ist auch betont worden, dass zwischen beiderlei Gesteinen chemische Unterschiede bestehen. Zu einem grossen Teil scheint dies auf einem Irrtum zu

beruhen. Unter „granitisch“ wird nach dem allgemeinen Sprachgebrauch eine grosse Serie von Magmen und Gesteinen zusammengefasst, deren innere Variation recht erheblich ist. Da ähnliches für basische und intermediäre Gesteine gilt und Übergangsglieder bestehen, ist die Zweiteilung bereits als mehr oder weniger willkürlich erkannt. Nun macht sich bei der Untersuchung der jungen amerikanischen Kettengebirge das Bedürfnis nach besserer Unterscheidung der verschiedenen granitischen Tiefengesteine besonders geltend; es wurden Quarzmonzonite, Granodiorite, gewöhnliche Granite usw. unterschieden. Das schien gegenüber den vorwiegend aus älteren Gebirgen bekannten sauren Tiefengesteinen Europas, die kurzweg Granite genannt worden waren, einen Gegensatz zu bedeuten. In Wirklichkeit ergibt die chemische Untersuchung, dass alle in den Cordilleren gefundenen Typen bereits unter den alten und ältesten „Graniten“ vertreten sind, ja in Teilen von Südafrika treten extrem grano- bis quarzdioritische Gesteine als sehr alte magmatische Gesteine auf.

Die Geneigtheit, saure Magmen als etwas besonderes zu betrachten, hat, wie früher erwähnt, ihren Grund auch in der Beurteilung der Mengenverhältnisse der verschiedenen Eruptivgesteine. Es ist Beobachtungstatsache, dass in älteren Erdrindenteilen Granite im weiteren Sinne häufig sind. So stimmen manche Forscher darin überein, dass sich viele Erscheinungen in basischen Gesteinen gar nicht anders interpretieren lassen, als dass beim Erstarren basischer Magmen granitähnliche Restschmelzen übrig bleiben. Die Möglichkeit der Entstehung granitischer Schmelze durch Differentiation wird gar nicht bestritten, sondern betont, die auf diesem Wege erhältlichen Mengen seien so gering, dass ein ähnlicher Prozess für die grossen Massen granitischer Magmen gar nicht in Frage komme¹⁷⁾. Das war auch einer der Einwände von A. HOLMES, der zur Aufstellung der Granitbildungstheorie durch Umschmelzung des Sial führte.

Ich glaube, es genügt, als Gegenargument P. ESKOLA (loc. cit., S. 469) zu zitieren: "It is quite true that basalts — and the sima, if it has the same composition as the basalts — contains only small quantities of the granitic elements, yet they contain enough to form a certain amount of low-melting magma which can be squeezed out if the rock is powerfully rolled out. Small as the amount of this portion is, we must assume that the amount of sima under the sial is so much greater, and the sima masses mobilized in every geosyncline during an orogenic cycle should be large enough to produce granites on a big scale".

¹⁷⁾ Selbst T. F. W. BARTH legt grosses Gewicht auf die Mengenverhältnisse.

Im übrigen findet man in einer Arbeit des Verfassers (Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. XV, 1935, S. 153 ff.) diesbezügliche Berechnungen.

Es wird bei derartigen Einwendungen immer auf die sichtbaren Mengen der Gesteine abgestellt, während die magmatische Differentiationstheorie den Hauptvorgang der Differentiation von basisch zu sauer in die Tiefe verlegen muss, da sie ja nicht übersehen kann, dass einmal entstandenes granitisches Magma infolge des Schwerefeldes und als Folge seiner eigenen, durch leichtflüchtige Bestandteile bedingten Aktivität bei Krustenverschiebungen emporsteigen muss. Es ist das nicht eine Flucht in die unerforschbaren Teufen, sondern logische Überlegung. Granitisches Magma wird in einem Orogen wandern müssen, Bildungsort und Erstarrungsort werden selten übereinstimmen.

Die Ansicht des Ausquetschens granitischer Restlösungen ist besonders von P. ESKOLA vertreten worden. Er schreibt in seiner bereits zitierten Arbeit: "I have become more and more impressed with the idea that granitic magmas must have been formed mainly in connection with orogenic movements by the pressing out or squeezing of the lowest melting materials, partly from more basic rocks not yet entirely solidified and partly from rocks partially re-fused in the deep regions of the geosynclines" (Seite 456). ... "The conclusion of what has been stated above the last residue in the plateau basalts and the last-formed minerals as well as the pegmatitic segregations would be that certain amounts of material which lead to the formation of granites may generally be squeezed out from the plateau basaltic material." (Seite 463.)

P. ESKOLA (und T. F. W. BARTH in dem schönen Werk: „Die Entstehung der Gesteine“, herausgegeben von C. W. CORRENS, Berlin 1939) denkt daran, dass die obere Hälfte des basischen Sima nur zum Teil flüssig sei und dass die Porenschmelze als palingene Residualmasse granitischen Charakter besitze. Sie und eventuell analog gebildete „Porenschmelzen“ („Schweiss“) sedimentärer Gesteine werden in orogenetisch bewegten Partien ausgepresst und zu einer mächtigen Magmamasse vereinigt, die emporsteigt. Stammt diese nur (oder weit vorzugsweise) aus dem gleichen „Sima“, das vollständig verflüssigt die basaltischen Magmen liefert, so ist dies in keiner Weise im Gegensatz zur komplexen gravitativen Kristallisationsdifferentiation. Es ist gewissermassen nur die Umkehr derselben; und die Differentiationstheorie berücksichtigt sowohl das Absinken von Kriställchen, das Zurückbleiben einer Restlösung, das Abquetschen dieser Residualschmelze, wie das Aufsteigen letzter

oder paligen erster Schmelzpartien. Es scheint auch, dass hiefür der Ausdruck lithogene Magmenbildung im Gegensatz zu juveniler noch nicht am Platz ist, denn was aus der zunächst noch undifferenzierten Region stammt, die wir als Magmenlieferant ansehen, sollte juvenil genannt werden, da es uns unmöglich ist, festzustellen, welches in bestimmten geologischen Zeiten ihr Aggregatzustand ist. Lithogen sollte für Magmenbildungen vorbehalten bleiben, die eine Wiederverflüssigung von Gesteinen voraussetzen, die bereits Produkte eines sedimentären oder magmatischen Entwicklungszyklus waren. So notwendig es ist, die Vorstellungen ESKOLAS in Betracht zu ziehen¹⁸⁾, so muss doch folgendes beachtet werden. Vor der Periode der granitischen Intrusionen steigt das basische Magma empor. Vollständig flüssige Massen sind somit in einer tektonisch relativ ruhigen Periode bereits intrusionsfähig. Das lässt nicht darauf schliessen, dass über ihnen eine mächtige, erst später teilweise flüssig werdende Schicht bereits erstarrter basischer Eruptivgesteine liegt. Eher ist vorstellbar, dass die schon früh mobilisierte Simamasse zu erstarren beginnt und aus dem Magmabrei die Restschmelzen abgequetscht oder Kristallisationsprodukte abgesaigert werden.

Gegen die Wirksamkeit des letzteren Prinzipes wird oft ins Feld geführt, dass am Erstarrungsort der Magmen Kristallsaigerung nur in Sonderfällen bemerkbar sei. So schreibt auch P. ESKOLA (Seite 459 loc. cit.): "Most striking is the lack of evidences of crystal settling in the Archaean formations which may generally be referred to as roots of ancient mountain chains." Diese Wurzeln liegen aber noch nicht so tief, dass Magmenemporstieg vor der Erstarrung nicht feststellbar wäre. Wenn nun ein granitisches Magma durch komplexe Kristallisationsdifferentiation entstanden ist, wird es sich im Sättigungszustand befinden. Steigt es im Verlauf grosstektonischer Prozesse noch weiter empor, so wird durch Temperatursturz und Gasabgabe beschleunigte Erstarrung erfolgen, derart, dass zu einer weiteren Kristallisationsdifferentiation nur in den innersten Partien Zeit bleibt. Hier erfolgt sie auch und führt zu aplitischen und lamprophyrischen Nachschüben. Ganz unsinnig ist es natürlich, zu verlangen, den Produkten des granitischen Magmas müsse der Kristalli-

¹⁸⁾ In bezug auf die Frage der Mengenverhältnisse wird naturgemäss nichts geändert. Die Menge granitischen „Schweisses“ aus basaltischen Gesteinsmassen kann nicht grösser sein als die Menge granitischer Restschmelzen aus basaltischen Magmen; höchstens könnte durch lokale Vermischung mit Ausblutungen aus Gesteinen der Sialkruste eine Vermehrung entstehen, die derjenigen der Assimilationsvorgänge analog wäre.

sationsprozess anzusehen sein, der zum granitischen Magma geführt hat.

Es bleibt also durchaus möglich, dass granitische Magmen infolge gravitativer Kristallisationsdifferentiation in grossen Mengen in der Tiefe vorgebildet waren, bevor sie als *Ganzen* in einer Phase intensiver Krustenbewegungen an den Dislokationsvorgängen teilnahmen, d. h. intrudierten. Notwendig für ein derartiges Verhalten ist eine lange Zeit relativer Ruhe, die zu einer mächtigen granitischen Oberschicht führt. Das aber ist gerade der Normalverlauf der Ereignisse im Orogen. Die Intrusion granitischer Magmen erfolgt syn- bis spätorogen, nachdem sich an eine frühorogene Phase basischer Intrusionen und Extrusionen eine längere Periode relativer Ruhe angeschlossen hatte. In der Zwischenzeit vermochte das vorher etwas emporgedrungene basische Magma infolge der zunehmenden Bedeckung in den Geosynklinalen sich nur sehr langsam abzukühlen. Es hatte Zeit, durch komplexe gravitative Kristallisationsdifferentiation in eine geschichtete Magmamasse mit granitischem Schaum überzugehen.

Es ist merkwürdig, dass selbst diese mit der Differentiationslehre in vollster Harmonie stehende Regel Veranlassung gab, Einwände gegen eben diese Theorie zu erheben. Am deutlichsten finden wir derartiges in H. STILLES Werk: „Einführung in den Bau Amerikas“, Berlin 1940, Gebrüder Borntraeger. Er schreibt z. B. Seite 263: „Die Vorstellung, dass die sialischen Magmen unserer jungen Gebirge von lithogener Art seien, findet gerade in den nord-amerikanischen Kordillern in dem an den Zeitpunkt einer Orogenese gebundenen „plötzlichen“ Erscheinen ungeheurer Massen granitischen Materials in Räumen, in denen vorher ein initialer Vulkanismus von überwiegend simischer Art geherrscht hat, eine besondere Stütze.“ Ferner:

„Die lithogene Magmenentstehung setzt recht erhebliche Versenkungen der Faltenwülste im Gefolge entsprechend erheblicher Faltungen voraus. Mindestens hat das für den ersten grossen plutonischen Akt einer Ära zu gelten, während bei den Nachfolge-Akten ein gewisses tieferes Eintauchen des Sials vielleicht noch gegeben war und damit nur geringerer Neuversenkung zur Erneuerung der Magmenbildung bedurfte.“

Es ist unverständlich, wie diese Hypothese von der lithogenen Entstehung (Umschmelzung der vorhandenen Gesteine) die Plötzlichkeit des Erscheinens granitischer Magmen plausibler machen soll¹⁹⁾. Gerade ein derartiger Vor-

¹⁹⁾ Für die Granodioritmagmenbildung durch Differentiation steht die ganze Zeit zwischen initialem Magmatismus und hochorogener Phase zur Verfügung, für die Einschmelzung infolge Faltentiefgangs nur die Zeit der eigentlichen Hauptfaltung. Es kann aber gerade ein Paroxysmus im Faltungsverlauf durch Faltentiefgang bereits entstandenes granitisches Magma „plötzlich“ emporpressen, während sukzessive Abschmelzung bei der Faltung intrudierende Umschmelzprodukte verschiedener Zusammensetzung zwischen Sediment, Gneis und normalen Magmen erwarten liesse, sofern über-

gang der Aufschmelzung müsste ja sehr langsam erfolgen, und da die in Frage kommenden Gesteine in den erwähnten Gebieten gar nicht granitische Zusammensetzung besaßen, müssten Zwischenprodukte zu finden sein, die keine normalmagmatische Zusammensetzung besitzen. STILLE sieht selbst ein, dass vieles in den nordamerikanischen Cordilleren gegen diese autochthone Magmenbildung der Mittel- und Spätzeit der Orogenese spricht und kommt zu merkwürdigen Aushilfsmitteln. Es sollen intermittierend simische (hypogene) Magmen und lithogene Magmen emporgedrungen sein.

„Es liegt — soweit die basischen Gesteine nicht etwa Differentiate lithogener Magmen sind — der Gedanke nicht fern, dass in solchen Wechselperioden das Sial mit seinen tiefsten Teilen etwa in der Grenzzone seiner Schmelzbarkeit gelegen war, so dass schon relativ geringe Hebungen und Senkungen der Kruste oder Veränderungen in der Lage der Geoisothermen genügen konnten, um es zur Erstarrung zu bringen bzw. erneut zu mobilisieren. War es aber erstarrt, so vermochten sich die hypogenen basischen Magmen allein zur Geltung zu bringen, während es bei Wiederaufschmelzung als der obere Teil des gesamten Magmenvorrates in erster Linie zum Austritt kam.“ (Seite 267.)

Diese angenommene Schichtung wäre, besonders dann, wenn man die ungeheure Fülle andesitischer, intermediärer Laven betrachtet, doch viel leichter als Differentiationsschichtung deutbar. Mit der einen „Ausweg“ liefernden Hypothese der lithogenen Bildung der Granitmagmen hat sie gar nichts zu tun. Nach STILLE sollte die weniger intensive felsengebirgische Faltung, verglichen mit der nevadischen, von synorogenem Plutonismus praktisch frei sein, da der Tiefgang der Faltung des Sials nicht in die Aufschmelzungszone reichte. Nun geht in den Vereinigten Staaten der Plutonismus ostwärts weit über die alpinotyp gefalteten felsengebirgischen Räume hinaus in diejenigen germanotyper Untergrundstruktur.

„Dabei handelt es sich z. T. um Magmen, die gleichartig oder mindestens blutsverwandt mit jenen der westlichen Gebiete sind“ (STILLE, Seite 264).

Statt daraus zu schliessen, dass sich die Annahme der lithogenen Granitbildung durch Einschmelzung der Tieffalten des Sials nicht bewahrheitet habe, fährt STILLE wie folgt fort:

„Es ergibt sich vom Standpunkt der lithogenen Deutung der sialischen Eruptiva die Vorstellung, dass die granitischen Massen des Felsengebirges wie auch die ihnen gefolgt sialischen Vulkanite nicht bodenständig, sondern vom Westen zugewandert sind. Auch schon der Boulder-Pluton kann im Hinblick auf die mehr germanotype Struktur seines Untergrundes kaum von autochthoner Entstehung sein, während der unferne und als in der Hauptsache älter aufgefasste Idaho-Pluton immerhin noch als autochthon, und zwar nevadisch-autochthon, gelten könnte.“ (Seite 264.)

Granitisches Magma soll sich somit autochthon an gewissen Stellen durch Aufschmelzung des Sials gebildet haben. Da es aber an vielen Stellen auftritt und zwar z. T. in gleicher Ausbildung, wo geologisch-tektonisch eine derartige Entstehung gar nicht in Frage kommen kann, ist es dort, wo „es nicht passt“ allochthon, über weite Strecken gewandert.

hauptsächlich jede derartige mehr oder weniger ruhig verlaufende Abschmelzung zum Magmenaufstieg führt.

„Die östlichsten Vorkommen der allochthonen Intrusionen liegen in den Black Hills von Dakota. Die magmatischen Unterströmungen müssen also über Hunderte von Kilometern erfolgt sein“ (Seite 264). „Bei dieser Ostwanderung differenzierten sich, wie LINDGREN ausführt, die Magmen von den dioritischen und granodioritischen Gesteinen — denen auch schon basischere Differentiate vorausgegangen waren — zu Monzoniten und Quarzmonzoniten und endlich nahe dem Ostrande ihres Verbreitungsgebietes zu Gesteinen mit deutlicher Alkalivormacht.“

Gegen Magmenwanderungen, Unterströmungen ist an sich nichts einzuwenden, aber dann werden sie auch im alpinotyp gefalteten Gebiet bemerkbar sein. Die Differentiationstheorie wird übrigens, dem letzten zitierten Satze STILLES folgend, wieder eingeführt; warum sie aber für die Entstehung der teilweise von basisch zu sauer variierenden Küstenbatholithe nicht gelten soll, ist unerfindlich. Das „plötzliche“ Auftreten saurer Magmen steht ja mit der Differentiationstheorie in guter Übereinstimmung, ja auch der Umstand, dass das „plötzlich“ gar nicht so streng gilt, sondern dass basische bis intermediäre Vorläufer vorhanden sind.

Nicht einer der von STILLE angeführten Umstände spricht gegen die Differentiationstheorie und für die lithogene Magmenbildung; diese ist vorausgesetzt, aber nicht als wahrscheinlich hingestellt. Aus den Profilkonstruktionen ist übrigens die Notwendigkeit einer so riesigen Aufschmelzung infolge Faltentiefenganges gar nicht ersichtlich, ganz abgesehen davon, dass Profile immer über verschiedene Zeiten integrierte Phasen verbildlichen und die gleichzeitig einsetzende Erosion meist unberücksichtigt lassen.

In sehr verdankenswerter Weise hat übrigens STILLE in diesem geologisch-tektonisch wichtigen Werk Definitionen zusammengestellt. Wir lassen einige folgen, da sie am besten seine Auffassungen wiedergeben:

Migmatisierung: „Veränderung der verschiedenartigsten Gesteine durch heisse aufsteigende Lösungen und Schmelzen. Die „Migmatite“ haben zum grössten Teil granitische Zusammensetzung, und damit decken sich die Begriffe „Migmatisierung“ und „Granitisation“ weitgehend.“

Mittelbare palingene Wirkungen der Orogenese: Aufschmelzen solcher Teile der Faltenwülste, die noch nicht im Zeitpunkt der Orogenese oder im unmittelbaren Anschluss an diese, sondern erst später in den Schmelzungsbereich kommen. Diesem waren sie aber durch die Orogenese schon stark genähert.

Palingenese: Neuerzeugung von Magma durch Wiederaufschmelzung von Gesteinen.

Unmittelbare palingene Wirkungen der Orogenesen: Wiederaufschmelzen von Gesteinsmassen (der Solenregion der in die Tiefe gehenden Faltenwülste) mit oder unmittelbar nach der Orogenese.

Hypogene Magmen: Tiefenmagmen von basaltischer oder auch peridotitischer Art und deren z. T. sialische Differentiationsprodukte. Gegensatz: palingene („lithogene“) Magmen.

Es ist daraus ersichtlich, dass H. STILLE davon ausgeht, dass Magmenbildung eine Folge der Orogenese sei. Dass es dies sein muss, wird nicht bewiesen, und dass eine derartige Annahme die beobachtbaren Verhältnisse besser erkläre als eine Hypothese, die derartige Erscheinungen als sekundär bewertet, kann aus seinen Ausführungen keinesfalls abgeleitet werden. Davor

aber ist zu warnen, dass auf Grund von Anschauungen, die einem andern Ideenkreis entstammen, scheinbare Bestätigungen für eine bestimmte petrologische Arbeitsrichtung konstruiert werden, die bei genauerer Betrachtung das gar nicht sind oder der Natur der Sache nach nicht sein können. Die Ideen von STILLE müssten an ganz anderer Stelle diskutiert werden, bei der Frage: wie stehen Krusten- und Magmentektonik zueinander und wie gestaltet sich der Wärmehaushalt der Erde?

An sich ist durchaus denkbar, dass sorgfältig fundierte geophysikalische und geologisch-tektonische Überlegungen in gewissen Orogengebieten dazu führen, einen erheblichen Faltentiefgang oder sogenannte Verschluckungszonen wahrscheinlich zu machen. Ob derartige Vorgänge zu mächtigen Magmenneubildungen führen, ist gesondert zu prüfen. In einigen Gebirgen scheint es ja, als ob fast gleichzeitig mit dieser „Wurzelzonenbildung“ bereits vorhandenes Magma emporgedrungen ist, so dass Platztausch stattfand. Dieses intrudierende, oft granitische bis granodioritische Magma besass eine meist nur geringe, oft aber noch deutlich erkennbare Assimilationskraft (z. B. im Bergell) und wurde hiebei vorwiegend basifiziert (contaminated rocks). Der Geologe, der glaubt beweisen zu können, dass der Faltentiefgang zur Magmenbildung im grossen Masstabe führen müsse, hat alle dafür sprechenden Argumente zusammenzustellen und darf nicht voraussetzen, saures Magma sei ja selbstverständlich lithogen und sialischen Ursprungs.

Übrigens wird immer deutlicher, dass man eher die Tendenz hatte, die durch Faltenwurf entstandenen Gesamtgesteinsmächtigkeiten zu überschätzen, weil in einem Sammelprofil die Geschichte der Gebirgsbildung nicht dargestellt werden kann. Zudem ist nicht zu vergessen, dass ursprünglich das Wiederaufleben der Theorie vom besonderen lithogenen Ursprung der granitischen Magmen (A. HOLMES) als Musterbeispiel die Zentralkomplexe nannte, also nicht typisches Orogen. Es sind eben ganz verschiedene Beweggründe, welche die Hypothese der Magmenzweiheit wieder hervortreten liessen, und es ist oft so, dass sich die einzelnen Argumente gegenseitig gar nicht stützen, sondern teilweise widersprechen. Petrochemie und Lehre von den magmatischen Provinzen konnten bis heute den Anhängern vom lithogenen Ursprung des granitischen Magmas keine zwingenden Argumente liefern; die ganze Verantwortung liegt also auf den Schultern des Geologen und Tektonikers. Er muss seinerseits die vielen Gesetzmässigkeiten, welche magmatische Gesteinsserien charakterisieren, mindestens so zwanglos und gut erklären können wie die Differentiationstheorie. Dann erst wird

seine Hypothese in der Petrologie als brauchbare Arbeitshypothese Eingang finden.

Es ist zwar durchaus zuzugeben, dass gerade in der Geologie oft mit Hypothesen gearbeitet werden muss, die zunächst physikalisch und physikalisch-chemisch unverständlich erscheinen, die aber aufgestellt werden müssen, weil alle anderen Ansichten mit den Beobachtungstatsachen im Widerspruch stehen. Es mag sein, dass viele Anhänger der lithogenen Granitmagmenbildung annehmen, es treffe dies auch für die in Frage stehende Angelegenheit zu. Aber die bis heute vorgebrachten Einwände gegen die Differentiationstheorie sind nicht stichhaltig; es muss somit eine erneute und sorgfältigere Prüfung stattfinden. Die Differentiationstheorie ihrerseits wird weiter auszuarbeiten sein; sie wird nicht verfehlen, Assimilationsvorgänge mitzubetrachten und versuchen klar festzustellen, in welchen Fällen sie versagt. Denn mit einer allgemeinen Redewendung, Granit könne sicherlich durch Differentiation aus basischem Magma entstehen, aber in den meisten Fällen hätte sich das Magma auf andere Weise gebildet, darf man sich nicht zufrieden geben. Es wäre sicherlich sehr merkwürdig, wenn juvenile und lithogene Granitmagmenbildung innerhalb einer geologischen Einheit nicht auseinandergehalten werden könnten. Die Beantwortung dieser Frage sollte man von beiden Seiten energischer in Angriff nehmen, unter Benützung aller Hilfsmittel der modernen Petrographie und der physikalischen Chemie.

d) Die chemischen und mineralogischen Serienmerkmale. Die komplexe gravitative Kristallisationsdifferentiation wird von den Petrologen als ein wesentlich mitbestimmender Faktor angesehen, weil sie von allen Hypothesen die einzige ist, die eine Fülle von Regeln zwanglos abzuleiten gestattet, die aus den Assoziationsverhältnissen magmatischer Gesteine ersichtlich sind. Es sind das z. B.: die Normalreihenfolge der Intrusionen im Orogen basisch \rightarrow sauer und zum Schluss oft wieder basisch, ferner die Bildungen sekundärer Differentiationsreihen innerhalb der Hauptreihe, weil die Differentiationsfähigkeit jedem Teilmagma innewohnt und bei grösseren Teilintrusionen und sehr langsamer Abkühlung zur Geltung kommen muss, weiterhin die Aplit-Lamprophyrentwicklung, also das sogenannte Gangfolge eines Tiefengesteins. Sie lässt verstehen, dass während eines längeren Zeitraumes nebeneinander Magmen verschiedener Zusammensetzung existieren können, die direkt oder durch Sekundärdifferentiation aus einem basischen Stammagma haben hervorgehen können. Andererseits erklärt sie die

Zielstrebigkeit der Magmenfolge und das Zurücktreten intermediärer Glieder, sofern diese nicht in Teilintrusionen oder Extrusionen erhalten blieben. Wo sehr grosse Magmamassen ins Spiel kamen, werden sie meist Anfangs- oder Endstadien angehören müssen; die Differentiation hat entweder noch nicht begonnen oder konnte sich voll auswirken²⁰⁾. Sie ist die einzige Arbeitshypothese, die weitverbreitete, schon lange für die Systematik benutzte Regeln der Mineralparagenesen eruptiver Gesteine verständlich macht, z. B. das Überwiegen kalkarmer, alkalireicher Feldspäte bei Anwesenheit grösserer Mengen von Quarz, die Reihenfolge zunehmender Bedeutung von Biotit gegenüber Hornblende und Augit gegen die Acidite hin, die Ansammlung seltener Elemente in den Restlaugen syenitischer und granitischer Magmen, die Erzlagerstättenentwicklung, usw.²¹⁾.

²⁰⁾ Es kann nicht genug betont werden, dass ein gegen die Differentiationstheorie granitischer Magmenbildung ins Feld geführtes Argument in Wirklichkeit gerade für diese Theorie spricht.

Unter den Ergussgesteinen scheinen diejenigen gabbroid-basaltischer Zusammensetzung weit vorzuherrschen, unter den Tiefengesteinen die von granodioritisch-granitischen Chemismus. Ist der Differentiationsprozess zu granitischem Magma ein natürlicher, grosse, langsam sich abkühlende Magmamassen umfassender Prozess, so muss letzteres der Fall sein und das basische Magma konnte nur bei sehr rascher Abkühlung (Extrusion, kleinere Intrusionen, erdoberflächennahe Intrusion) als solches erhalten bleiben. Die Lehre von der magmatischen Kristallisationsdifferentiation verlangt somit geradezu die beobachtbaren Verteilungsregelmässigkeiten von basischen und sauren Magmen auf vulkanische und plutonische Gesteine. Sie braucht hierfür keine Zusatzhypothese.

Dass man in den alten Gebirgsketten, in durch Erosion blossgelegten tieferen Partien Granite findet, steht keinesfalls im Widerspruch mit der geophysikalisch begründeten Ansicht, dass basische Gesteine in der Tiefe anstehen. Was man, wie auch in den Alpen, überschätzt hat, ist der Betrag der Erosion in diesen Erdrindenteilen. Man hat einen Summierungsprozess vorgenommen, der nicht gestattet war, und glaubte bereits Einblicke in Regionen zu erhalten, die zu einer bestimmten Zeit 50 und mehr km unter der Oberfläche waren. Nirgends aber ist es uns gelungen, einen so tiefen Einblick oder gar einen Einblick in die „Simaregion“ zu gewinnen. Der Geologe kann gezwungenermassen aus unmittelbarer Anschauung nur Krustengeologie, Epidermalgeologie treiben.

²¹⁾ Weniger in bezug auf lithogene Magmenbildung als in bezug auf die Frage, ob Granite metasomatisch-metamorphe Gesteine sind, findet man eine Diskussion über „Granit und Erzlagerstätten“ in *Econ. Geology*, vol. 36, 1941 (A. LOCKE, Seite 448 und H. E. MCKINSTRY, Seite 829). MCKINSTRY schreibt: „In brief, submit that granitization requires the introduction, probably of heat, probably of a solvent, and certainly of chemical constituents, notably soda; that the most plausible source of these constituents is a magma;

Entsprechend der Beobachtungstatsache der Heteromorphie der Eruptivgesteine, die eine Abhängigkeit der Kristallbildungen von den äusseren physikalischen Bedingungen und dem Gehalt an leichtflüchtigen Stoffen verdeutlicht, muss sie verlangen, dass es verschiedene Differentiationsverläufe gibt, die im Grossen aus den Gesetzen der Kristallbildung aus Schmelzen ableitbar sind. Das ist in der Tat der Fall. Es ist eine Variation im Kleinen und eine ebensolche im Grossen erkennbar. Wie in der Arbeit: „Die komplexe gravitative Kristallisationsdifferentiation“ dargetan wurde, ist gerade die letztere (pazifisch-atlantisch-mediterrane) eine Folge von Verschiebungsmöglichkeiten der Kristallisationsbahnen, usw.

Nun ist jedoch oft der Versuch gemacht worden, kleinere Widersprüche aufzudecken. Häufig bezogen sich derartige Aussagen auf die einfache gravitative Kristallisationsdifferentiation, als deren

and that if no magma is visible it becomes virtually imperative to postulate one — an underlying magma of regional proportions if you like.

I willingly admit that to postulate such a magma is a very different thing from proving its existence yet its presence rather than its absence is implied by a theory that attributes metamorphic origin to granite. The search for a local source of metals should receive all encouragement but one should not lose sight of the availability of an “abysmal source” of ore solutions even though the predominant constituents of the granite may be of local origin.”

McKINSTRY möchte somit die mit der Granitbildung häufig verbundene Erzlagerstättenbildung auf ein in der Tiefe anstehendes Magma zurückführen, das zugleich die Granitisation bewerkstelligte. Dann stellt sich aber wirklich die Frage, ob nicht (entsprechend seiner Struktur) der Granit selbst ein normalmagmatisches Gestein ist. Wird an einem magmatischen, nur durch Differentiationsvorgänge möglichen Ursprung der Erzlösungen nicht gezweifelt, so darf man derartige Zweifel noch weniger für die pegmatitischen Bildungen aufkommen lassen, die ihrerseits in normalen Granit übergehen. So bedingt eines das andere. Die Annahme, Granit sei aus lithogener Schmelze entstanden oder sei ein metasomatisch-metamorphes Gestein, kompliziert die Verhältnisse; sie sollte somit nur erfolgen, wenn zwingende Beweise vorliegen, wie sie bis heute noch in keinem Fall erbracht worden sind. Die bis jetzt bekannten „granitischen Gesteine“ metamorphen Ursprungs sind ja deutlich von „echten“ Graniten unterscheidbar. Der Versuch von H. G. BACKLUND (Mitt. d. Naturf. Gesellschaft Schaffhausen, Bd. XVII, 1941, Seite 61), Erzlagerstätten mit Granitisationsprozessen in Verbindung zu bringen, sei nur erwähnt. Was die dort angeführten telemagmatischen, metasomatischen Erzlager der Ostalpen betrifft, sei auf die Spezialliteratur verwiesen. Dieser Lagerstättentypus und verwandte Bildungen zeigen übrigens, wie wenig granitisierend oft aus der Tiefe aufsteigende, zur Metasomatose führende Lösungen wirken. Spezialeffekte dieser Art stützen gewiss nicht die Theorie, Granitisierung sei das Endresultat aller metasomatischen Einwirkungen, wie in der erwähnten Abhandlung Seite 57 zu lesen ist.

hervorragenden Vertreter N. L. BOWEN zitiert wird. Es werden nur Kristallatzusammensetzungen von Magmenzusammensetzungen subtrahiert und es wird weder an Ausgleichswanderungen noch an die Verflüssigung des Kristallates noch an Beeinflussung des Differentiationsverlaufes durch untergeordnet wirksame Assimilationen gedacht. Wir wollen nicht untersuchen, ob N. L. BOWEN selbst in allen Teilen diesen dogmatischen Standpunkt eingenommen hat oder ob er ihm nur zugeschrieben wird, weil seine fundamentalen Arbeiten lediglich Richtlinien aufzustellen hatten. Tatsache ist, dass eine derartige mechanische Auffassung der Kristallisationsdifferentiation nicht genügt, die natürlich gegebene Mannigfaltigkeit zu verstehen. Sie steht aber hier auch nicht zur Diskussion, ja die erweiterte Lehre möchte noch keinesfalls mit Sicherheit Entmischungsvorgänge im Spätverlauf der Differentiation (bei sehr erhöhter Konzentration an leichtflüchtigen Bestandteilen) ausschliessen.

Unbegründet sind die Einwendungen, die infolge fälschlicher, kritikloser Übertragung experimenteller Befunde an sehr vereinfachten trockenen Schmelzflüssen erhoben wurden. Die physikalisch-chemischen Experimente können uns nur mit Richtlinien vertraut machen; ein Studium der mineralogisch-chemischen Verhältnisse der Naturprodukte muss ergänzend hinzutreten, um vor einseitiger Stellungnahme zu schützen. Wenn in der Natur die Entstehung komplexer Augite, Hornblenden und Biotite beobachtbar ist, darf in Einzelheiten die Kristallisationsbahn nicht die gleiche sein wie in einer nur Olivin und Diopsid liefernden künstlichen Schmelze.

C. N. FENNER hatte in zwei Arbeiten ("The crystallization of basalts", Am. J. Sc., Bd. XVIII, 1929, S. 225 ff. und "The residual liquids of crystallizing magma", Min. Mag. 1931, Seite 539 ff.) auf Grund derartiger Erwägungen den Gegnern der Kristallisationsdifferentiation Material in die Hand geliefert. Sein Haupteinwand war: "crystal separation alone, acting upon a basaltic magma is observed to lead to a residual liquid rich in iron." Nun verschiebt sich im Mittel durchaus das Verhältnis Fe:Mg von basisch zu sauer im Sinne einer Fe-Zunahme; allein wesentlicher ist die Alkalien- und SiO_2 -Zunahme und die Gesamtabnahme der zweiwertigen Elemente. Bereits P. ESKOLA hat sich gegen die Betonung dieser scheinbaren Diskrepanz gewandt, die keine ist, sofern mit der reellen chemischen Variabilität der melanokraten Gemengteile gerechnet wird und notwendige Ausgleichswanderungen in Betracht gezogen werden.

Neuerdings ist von L. R. WAGER und W. A. DEER eine interessante Arbeit über "The Petrology of the Skaergaard Intrusion, Kangerdlugssuaq, East

Greenland" (Meddelelser om Grønland, Bd. 105, Nr. 4, 1939) erschienen, die eine Kristallisationsdifferentiation basaltischer Magmen mit eisenreichen Restlösungen beschreibt. Wie in einer späteren vergleichenden Arbeit näher dargelegt werden soll, ist dieser Verlauf eine Folge ausgedehnter Olivinkristallisation und spezieller Verhältnisse. Der Standpunkt der beiden Forscher, hier liege der Normalfall vor, und eine Entwicklung zu granitischem Magma sei mit Kristallisationsdifferentiation allein nicht verträglich, beruht auf der ungerechtfertigten Verallgemeinerung eines wirklich sehr schön und eingehend untersuchten Beispiels. Die Schlussfolgerungen von L. R. WAGER und W. A. DEER (loc. cit., Seite 335) lauten:

"The normal calc-alkaline series of igneous rocks is frequently considered to represent the result of crystal fractionation of basalt magma. From the evidence of the Skaergaard intrusion it appears that crystal fractionation of basalt magma leads to the ferrogabbros and not to intermediate rocks of the calc-alkaline series. This is considered strong evidence in support of the view that the calc-alkaline series of igneous rocks is, in the main, the result of the mixing of basic and acid material. The concept of convection currents in a mass of basic magma which is in contact with sialic crustal rocks, provides a possible mechanical method whereby hybridization between basic magma and granitic rocks might be effectively brought about. Mixing between basic magma and granitic rocks with the production of the calc-alkaline series is regarded as at least as important as hybridization of acid magma and basic rocks. The Non-porphyrific Central type of basalt is considered to have been produced by hybridization between sialic crustal rocks and iron-rich differentiates of normal olivine-gabbro. The amount of ferrogabbro material present in the known part of the Earth's crust is small; this provides a further indication that the bulk of post-Cambrian granites have not been formed by fractional crystallization of basalt magma". Immerhin steht daneben auch noch der Satz (Seite 334): "The basic to acid granophyres produced during the late stage of the differentiation, may be partly the result of the strong fractionation of the original olivine-gabbro magma in the way suggested by Bowen, but they must also be partly the result of contamination with acid gneiss."

Man wird hier mit einer durchaus verständlichen und häufigen Erscheinung geschichtlicher Entwicklung der Wissenschaften bekannt, nämlich: Übertreibung der Reichweite und der Bedeutung eines Einzelfalles und Ausserachtlassen der gegebenen Mannigfaltigkeit. Die beobachtbaren Variationen innerhalb der basischen Magmengruppe sind so gross und kontinuierlich verlaufend, dass es ungerechtfertigt ist, überall gleichartige Zusammensetzung der Stammmagmen anzunehmen. Auch die Ansicht von W. Q. KENNEDY, es genüge, von zwei Magmentypen auszugehen, von denen jeder notwendigerweise mit einem andersartigen Differentiationsverlauf verknüpft sei, ist die unzulässige Vereinfachung und Verallgemeinerung einer an sich richtigen Beobachtung. Im Einzelnen beherrschen wir die

in Magmen sich abspielenden Kristallisationsvorgänge noch gar nicht; wir kennen die Einflüsse nur ungenügend, die zur Heteromorphie führen oder die zur Folge haben, dass mit einer magmatischen Schmelzlösung ein ganz bestimmtes Glied aus dem Variationsfeld einer Kristallart im Gleichgewicht ist. Es ist ein von uns noch nicht gesetzmässig erfassbarer Spielraum vorhanden, von dem wir zunächst nur die Wirkungen sehen. In diesem Stadium ist es unzulässig, Einzelfälle zu verallgemeinern und für Abweichungen sofort die Notwendigkeit der Einführung zusätzlicher Hypothesen zu postulieren. Da unter Berücksichtigung dieser gegebenen Variationsfähigkeit in den Grundzügen Übereinstimmung mit der Theorie zu konstatieren ist, gilt es zunächst konsequent durch Experimente, Naturbeobachtungen und genaue analytisch-chemische Erforschung der Gesteine und ihrer Mineralien die Kenntnisse zu erweitern. Manches Widerspruchsvolle kann sich hierbei als Gesetzmässigkeit entpuppen, anderes mag bestehen bleiben und wirklich Zusatzhypothesen erfordern.

Natürlich ist es zur Beobachtungskritik durchaus erwünscht, heute schon an derartige Erweiterungsmöglichkeiten der Differentiationstheorien zu denken und sie in Erwägung zu ziehen. Dagegen ist nichts einzuwenden, denn es ist ja auch denkbar, dass wir das Gewicht der für eine Differentiation sprechenden Argumente überschätzen. Schädlich sind nur voreilige, bei näherem Zusehen unbegründete Schlussfolgerungen aus einem engen Gesichtskreis heraus.

Dass tatsächlich dies oft geschieht, möge noch der Hinweis auf eine andere Arbeit R. W. VAN BEMMELENS von 1938: "On the Origin of the Pacific Magma Types in the Volcanic Inner-arc of the Soenda Mountain System (De Ingenieur in Nederl. Indië)", IV, Nr. 1 von "De Mijningenieur") dartun. WEGMANN, BACKLUND, HOLMES, FENNER, RITTMANN, DORIS REYNOLDS, COLLINS werden zitiert, um zu begründen, dass andere als die üblichen Vorstellungen vom Ursprung magmatischer Gesteine notwendig geworden seien. Dann wird für den Ursprung der Magmen auf drei Möglichkeiten hingewiesen.

1. As primary or juvenile differentiates of a differentiating parental (gabbroidal) magmatic melt.

2. Secondary or palingenetic from pre-existing rocks by magmatization under the influence of ascending emanations derived from unknown sources in the depth.

3. Syntectonic by hybridisation or contamination of juvenile or palingenetic magmas by assimilated and pre-existing rocks.

Dass 1) auch wirksam sein kann oder muss bei Bildung nach 2) oder 3), wird zunächst nicht berücksichtigt. Im späteren Verlauf wird überhaupt der „Magmatismus“ abgelehnt. Nun wird nach VAN BEMMELEN der Bengkoenat Batholith (260 km² aufgeschlossene Oberfläche) von einem grobkörnigen Biotit-

granit gebildet, der randlich in einen mittel- bis feinkörnigen oder porphyrischen Biotit-Hornblendegranodiorit übergeht. Einzelne noch basischere Randfacies sind gleichfalls bekannt. Das ist ein durchaus normales Bild, ebenso dass Apophysen aus dem inneren, länger flüssig gebliebenen Teil in die Randpartien reichen. Gegenüber einer Differentiation der Masse in situ wird nur der Einwand erhoben: "This explanation does not give any solution to the question of how the space, in which the plutonic mass consolidated, was formed". Das ist selbstverständlich ein geotektonisches Problem, das für sich behandelt werden muss, was nicht geschieht.

Die Magmamasse ist in ältere, hydrothermal veränderte Andesite eingedrungen. In der Kontaktregion ist selbstverständlich endogen und exogen eine Angleichung zu erwarten. Aus einer in einem Museum aufbewahrten Kollektion erwähnt nun, ohne Angabe der Entfernungen vom Kontakt und der genauen Position, VAN BEMMELEN etwa 10 Dünnschliffe von Handstücken, die beweisen sollen, es sei ein kontinuierlicher Übergang zwischen dioritischer Randfacies und Andesit vorhanden. Er fährt dann fort: "This situation does not argue for an entirely juvenile origin of the plutonic rocks." Dann betrachtet R. W. VAN BEMMELEN die „Bantam Intrusionen“, die z. T. auch in alte Andesite eingedrungen waren. Die Andesite wurden hierbei zum Teil in amphibolitische Gesteine umgewandelt, zum Teil etwas metasomatisch verändert. Nach MUSPER befinden sich in den Andesiten auch fast ungestört gelagerte Sedimenteinschlüsse, was R. W. VAN BEMMELEN zur Aussage veranlasst: "The andesitic intrusion has expanded cauliflower-like in the sedimental series, without pushing them aside by mechanical action."

Am Kontakt der jüngeren Plutone mit der Andesit-Sedimentformation sind auch andere deutliche Kontakterscheinungen wahrnehmbar mit der üblichen metasomatischen Beeinflussung. Alles scheint somit leicht deutbar zu sein, aber R. W. VAN BEMMELEN schliesst aus dem Umstand, dass Andesite amphibolisiert wurden, es seien die Quarzdiorite des (Kontakterscheinungen hervorruhenden) Plutons auch nichts anderes als metamorphosierte Andesite. Die Andesite ihrerseits aber seien durch blumenkohlartig verlaufende Metamosatose aus Sedimenten hervorgegangen. "The observations strongly point to the possibility that at least part of the various types of the pacific igneous rocks are not the product of gravitational crystallisation differentiation of a gabbroidic parent magma (BOWEN) but that they are the result of magmatization of the sialic crustal rocks by ascending emanations."

Man möge die „Beweise“ nachlesen und man wird sich verwundern, dass derartige Schlussfolgerungen aus den wenigen, leicht anders deutbaren Beobachtungen gezogen werden.

Schliesslich behandelt VAN BEMMELEN auch den Merawan Batholith in der Nähe des Radeng-Vulkanes. Nach beigegebenem Profil handelt es sich um einen Hornblendegranit mit prachtvollem Kontakthof gegen die Andesit-Sedimentformation und mit schönen Gangbildungen. Hornfelse wurden beschrieben, ebenso randliche Assimilationen. Natürlich besitzen Hornblendandesite und Hornblendegranite ähnliche Mineralien und manchmal auch ähnliche Strukturen. Das genügt vollauf, um den Schluss zu ziehen, der Hornblendegranit sei nur ein höher metamorphes Granitisationsprodukt als der Andesit. Nun ist in dem Vulkane in der Nähe wirklich Lava ausgeflossen, also musste doch Magma vorhanden gewesen sein. Aber das sei eben eine lokale

Aufschmelzungskammer (!), im übrigen: "According to the observations described in the preceding pages, the author thinks it probable that this development (gemeint ist Hauptentwicklungsrichtung basisch-sauer pazifischer Gesteine) is not the result of crystal fractionation (BOWEN) but of progressive gaseous supply of si, al, and alkalies by ascending emanations."

Während einleitend noch von Magmen gesprochen wird, sind diese jetzt nicht einmal mehr notwendig.

Derartige geologisch-petrologische Spekulationen unter Missachtung der elementaren Regeln gründlicher petrographischer Beobachtung und Untersuchung zeigen, wie gefährlich die Ausdehnung des Begriffes Migmatisation und Granitisierung in den Händen der „Magmatektoniker“ geworden ist.

In sorgfältiger Weise hat im Gegensatz dazu F. K. DRESCHER-KADEN (Beiträge zur Kenntnis der Migmatit- und Assimilationsbildungen, sowie der synantetischen Reaktionsformen. I. Über Schollen-assimilation und Kristallisationsverlauf im Bergeller Granit. Chemie der Erde, Bd. 12, 1939/40, Seite 304—417) einen Schollen- und Assimilationskontakt, wie er dem Petrographen aus vielen Granitgebieten bekannt ist, im Umkreis von ca. 900 m² untersucht. Bereits in dem Werk: „Chemismus schweizerischer Gesteine“ (Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, XIV. Lieferung, Bern 1930) sind zahlreiche für Herrn Prof. R. STAUB ausgeführte Analysen der Eruptivgesteine, der Schollen und der basischen, durch Assimilation entstandenen Schlieren, mitgeteilt worden. Der Hauptgranit ist durch folgende Molekularwerte charakterisiert:

si	al	fm	c	alk	k	mg	
249	42	12,5	12,5	33	0,51	0,53	Val Bondasca J. JAKOB
241	36,5	24	15	24,5	0,45	0,51	Fornogebiet, wohl bereits etwas basifiziert (nach F. K. DRESCHER-KADEN)

Diopsidgranite und basische Randfacies (entsprechend den Analysen 9, 11, 13, 14, 15, 17 bis 21 in „Chemismus schweizerischer Gesteine“) sind bereits 1930 als Schlieren endogener und exogener Kontaktprodukte bezeichnet worden. F. K. DRESCHER-KADEN bestätigt das Vorkommen derartiger Bildungen und beschreibt die üblichen Stoffaustauscherscheinungen im Schollenkontakt. Die dadurch entstehende Basifizierung ist auf fm und c (oder eines von beiden) bezogen deutlich erkennbar. Er schreibt Seite 408 seiner Abhandlung:

„Der Granit kann gegenüber den aufgenommenen Randgesteinen als selbständiger unabhängiger Stoffkomplex betrachtet werden, welcher in einem tieferen Niveau seine stoffliche Prägung erhielt; als eine solche fertig vorgegebene Masse stieg er sodann in höhere Bereiche und übernahm dabei die Fremdgesteine seiner Umgebung, „schmolz“ sie ein, verdaute sie und änderte dadurch seinen eigenen

Chemismus, sowie denjenigen der aufgenommenen Gesteine. Diese Anschauung ist aber nur eine, und zwar ziemlich einseitige Vorstellung der Granitbildung. Denn man kann auch folgendermassen argumentieren. Der Zustand des randlich in Granit eingelagerten Fremdmaterials, welches in relativ breiter Zone den grössten Teil des Grenzverlaufes des Bergeller Massivs, hauptsächlich im Osten, Norden und Südwesten (vgl. RUDOLF STAUBS Geologische Karte des Val Bregaglia) begleitet, kann mit mindestens der gleichen Sicherheit als Übergangszustand angegeben werden, welcher in ähnlicher Weise das gesamte Granitgebiet im ersten Abschnitt seiner Entwicklung bereits durchlaufen hat. Der heutige Zustand der eigentlichen, zentralen Granitmasse wäre dann nur die Weiterbildung bis zu einer völligen Aufarbeitung des eingeschlossenen Materials. Eine solche Deutung wird unterstützt durch die zahlreich auch in den mittleren Teilen des Massivgranits erhaltenen Schlierenzüge und dunklen Putzen, die als letzte Zeugen des ehemals aufgenommenen Nebengesteins sich als besonders resistent erwiesen haben und so der völligen Aufzehrung entgingen.“

Obgleich aus diesen Bemerkungen ohne weiteres ersichtlich ist, auf welcher Seite die Sympathie ihres Verfassers steht, wird doch zugegeben, dass der Schollenkontakt keine Entscheidung der Frage der Granitbildung gestattet. Uns scheint gerade das Bergellermassiv eines der schönsten Beispiele dafür zu sein, dass Assimilationen zu meist zu anomalen Zusammensetzungen (ungewöhnliche Magmentypen) führen (siehe die oben zitierten Analysen), und dass durch solche Eingliederungen von Gneisen, Mergeln, Dolomiten und Kalksteinen in der Hauptsache granitisches Magma basifiziert wird und nicht erhalten bleibt oder gar entsteht. Dass aber ein echtes saures Magma, das sich beträchtliche Mengen Fremdmaterial einverleibte, emporgestiegen ist, wird durch die tektonische Stellung, die ausgesprochene Diskordanz, die echten Gänge, die Beziehung zur pegmatitischen Injektionszone von Bellinzona und schliesslich auch durch die vulkanischen Vorläufer der heute im Taveyannazsandstein enthaltenen Tuffe zur vielseitigsten, den Gesamtbefunden am besten entsprechenden Vorstellung.

e) Granit als Charakteristikum der pazifischen Differentiation. Die gewöhnlich-granitischen Magmen sind für pazifische Gesteinsprovinzen charakteristisch und diese hinwiederum für magmatische Aktivität im Orogen. Auch diese Regel mit vielen Ausnahmen gab Veranlassung, granitische Magmen als etwas Besonderes zu betrachten. A. RITTMANN z. B. glaubt, der normale Dif-

ferentiationsverlauf sei basaltisch-trachytisch oder atlantisch, die pazifische Differentiation sei an Aufschmelzungen des Sial gebunden. Derartige Erwägungen liegen durchaus im Rahmen der allgemeinen Differentiationstheorien, wie es ja unzweifelhaft ist, dass Assimilationen gewissen Differentiationen eine besondere Richtung gaben. So können Karbonateinschmelzungen im Einzelfalle wirken (R. A. DALY, P. NIGGLI, A. RITTMANN).

Hier ist notwendig auf eine weitere Begriffsverwirrung aufmerksam zu machen. Man findet in neueren Arbeiten auch die Tendenz, Magmen, die durch Assimilationsvorgänge ihre Zusammensetzung verändert haben, *Migma* zu nennen. Daraus ergibt sich von selbst, dass echte Eruptivgesteine, die aus Schmelzen kristallisierten, migmatische Gesteine oder Migmatite genannt werden. Auch T. F. W. BARTH²²⁾ scheint sich dem nicht zu widersetzen, wenn er schreibt (Seite 115): „Die Grenzen des Reiches der migmatischen Gesteine sind noch unscharf.“ Folgende Ausführung stammt aus einer Arbeit von REINHARD: „Das Migma zum Magma geworden, kann am Schlusse orogener Phasen und auch ausserhalb des Orogens in höhere Erdrindenteile gelangen und hier unter hydrostatischem Druck erstarren. Differentiationsvorgänge werden nun eine wesentliche Rolle spielen und zur Bildung der verschiedenen Magmentypen Anlass geben. Aus den Restlösungen entstehen Pegmatite, die oft seltene Mineralien führen, und der Differentiationsprozess kann die Bildung von Erzlagerstätten im Gefolge haben. Die Assimilation von Nebengestein wird den Verlauf der Differentiation oft mächtig beeinflussen. Welche Rolle in einer magmatischen Provinz beim Werdegang der verschiedenen Gesteine Differentiation und Assimilation gespielt haben, ist heute noch stark umstritten.“

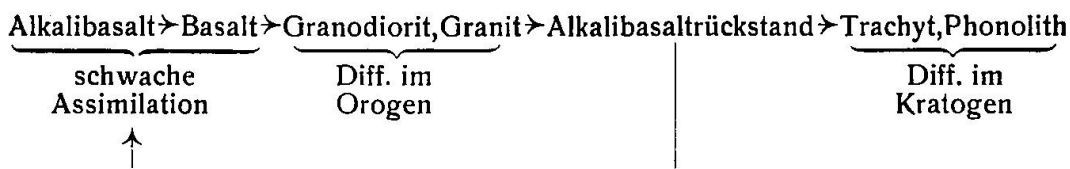
Wir möchten in diesem Zitat von REINHARD das Hauptgewicht auf den Satz legen „das Migma ist zum Magma geworden“, also sind die daraus sich bildenden Gesteine rein magmatisch. Migma muss auf den Brei, bestehend aus unverdauten Relikten und viel Schmelzlösung, beschränkt werden, die fertige Schmelzlösung oder das gesammelte abgequetschte Schmelzmaterial muss definitionsgemäss als Magma bezeichnet werden. Häufiger beobachtbare Assimilationen in kleinerem Umfang führen überhaupt nicht zu einem eigentlichen Migma, sondern ergeben ein sukzessive in seiner Zu-

²²⁾ Die Entstehung der Gesteine. Ein Lehrbuch der Petrogenese. Bearbeitet von T. F. W. BARTH, C. W. CORRENS, P. ESKOLA. Herausgegeben von C. W. CORRENS, Berlin 1939.

sammensetzung und damit auch seiner Differentiationstendenz sich veränderndes Magma.

Noch nicht abgeklärt ist jedoch, ob gleiche Effekte in bezug auf die Differentiation nicht auch durch andere physikalisch-chemische Bedingungen zustande kommen können, und ob im gegebenen Fall die Verunreinigung des Stammagmas durch Sial wirklich notwendig ist. Dagegen spricht mancherlei, beispielsweise der ungeheure pazifische Magmatismus in den amerikanischen Küstengebirgen, also gegen ein Tiefkraton hin, sowie die älteste Magmengeschichte. Andererseits gibt es auch Erscheinungen, die für eine Beeinflussung im genannten Sinne sprechen, wobei indessen wohl nur die frühzeitige und untergeordnete Assimilation saurer Gesteine durch das neu aktivierte basische Magma als wesentlich in Frage kommt.

Rein physikalisch-chemisch betrachtet, scheint es nicht notwendig zu sein, Einschmelzungen anzunehmen; unter gewissen Umständen müssen an SiO_2 übersättigte Lösungen bei Kristallisationsdifferentiation zurückbleiben. Nun führt jedoch, wie früher vom Verfasser dargetan wurde, komplexe Kristallisationsdifferentiation eines basischen Magmas nach granitischen Endmagmen zu mehr oder weniger alkalibasaltischen Rückstandsmagen. Das erklärt, warum beim Übergang vom Orogen zum Kratogen der Wechsel pazifisch-atlantisch eintritt. Bei orogener Neubelebung ist indessen wieder pazifisch orientierter Magmatismus bemerkbar. Es wäre denkbar, dass dieser infolge der Veränderung der rückgebliebenen alkalibasaltischen Magmen zu basaltischen durch Assimilation von etwas Sial zustande kommt. Das liesse den noch schwach atlantischen Charakter im initialen Ophilithstadium der Geosynklinalregion verstehen; das alkalibasaltische Magma ist im Begriff, basaltisch zu werden. Schematisiert wäre die Reihenfolge:



Dabei ist es ebenso müßig zu fragen, was nun wirklich ursprünglich war, wie die Frage, ob Ei oder Henne zuerst existierte. Andererseits hat die komplexe gravitative Kristallisationsdifferentiation auch reine Diffusionsvorgänge in Betracht zu ziehen. Vor allem ist hiebei an eine Anreicherung der Alkalien in oberen Teilen einer basischen Magmamasse zu denken, die sich in relativer

Ruhe befindet (CH. SMYTH, P. NIGGLI, S. T. TOMKEIEFF). Alkalibasaltische Magmen könnten bei langdauernder Alkalianreicherung durch derartige Vorgänge aus normalbasaltischen entstehen und (beispielsweise im Kratogen) den Differentiationsverlauf bestimmen. Im unruhigen Orogen folgt rasch normales basisches Magma nach und beherrscht den nachfolgenden ruhigeren Differentiationsprozess. Derartige Erwägungen lassen erkennen, dass analoge Effekte auf verschiedene Ursachen rückführbar sind. Eine Entscheidung, was wirksam gewesen ist, wird oft unmöglich sein; in andern Fällen mag es gelingen, den einen oder andern Weg als wahrscheinlicher hinzustellen.

Doch sind das alles Probleme, die erst in der Zukunft weiter abgeklärt werden können. Diese hat auch auf Grund eingehender Beobachtungen zu entscheiden, welche Bedeutung Assimilationen in den einzelnen Stadien auf den Differentiationsverlauf haben. Einwirkungen dieser Art werden ja nicht geleugnet, es muss nur einwandfrei beobachtet werden, bevor weitreichende Schlussfolgerungen gezogen werden. Dann wird es auch eher möglich sein, über die Fundamentalfrage des Verhaltens von Magmatik und Krustentektonik etwas auszusagen.

IV. Krusten- und Magmentektonik

Von der Vorstellung der Beziehungen zwischen tektonischem Verhalten von Erdkruste und Magma hängt für die Frage der Granitentstehung vieles ab. Sind erste Veränderungen im Magma Veranlassung oder Folgen von Krustenbewegungen? Wie verhalten sich im weiteren Verlauf tektonischer Vorgänge Magma und Lithosphäre zueinander? Wächst die Dicke der Kontinentalsockel? Kühlt sich die Erde ab? Treten neue Kräfte durch Umwandlungen im Innern periodisch ins Spiel? Welches ist die Rolle der Unterströmungen, des Auftriebes der Magmen? usw.

1834 führte L. v. BUCH mit E. DE BEAUMONT und DUFRESNOY eine Reise nach Italien und Sizilien aus, deren Resultate in einer Arbeit „Über Erhebungskratere und Vulkane“ veröffentlicht wurden. Es ist dies nicht die Geburtsstunde der Ansichten über Erhebungskratere und Erhebungsketten (nach der die aus dem Erdinnern empordringenden, nach oben drängenden Magmamassen als Ursachen der Gebirgsbildung angesehen werden), aber die Arbeit hat mitgeholfen, den Begriff Erhebungskratere zu verbreiten. In der 1844 erschienenen Arbeit L. v. BUCHS „Über Granit und Gneis“ werden die zentralen Granite eines Gebirges als ungeheure Blasen angesehen, deren Ma-

terial sich bereits in einer gewissen Starrheit, jedoch aktiv erhoben habe unter Steilrichtung der Dachgesteine. Zur gleichen Zeit, 1830 bis 1834, erschien die epochemachende Arbeit von J. THURMANN, „Essai sur les soulèvements jurassiques“, in der zögernd, jedoch unmissverständlich für den Jura die Erhebungstheorie zu Gunsten eines tangentialen Zusammenschubes aufgegeben wurde. 1846 hat dann nach manchen Vorläufern J. D. DANA diese Tangentialkräfte durch die Hypothese der Erdkontraktion und Schrumpfung verständlich zu machen gesucht. Als ALB. HEIM und F. SUESS die Passivität der alpinen Zentralgranite bei der Alpengebirgsbildung nachgewiesen hatten, schien lange Zeit die Faltengebirgstektonik reine Erdrindendislokation im Festen zu sein, bis durch O. AMPFERER und A. WEGENER neue Gesichtspunkte in den Vordergrund traten.

Heute ist die Frage nach dem Verhältnis der Epidermalektekonik zu einer die Magmamasse mitumfassenden Tiefen-tektonik die wichtigste und umstrittenste der Geologie²³). Die Vorstellung einer schrumpfenden und faltbaren Haut auf einem mehr oder weniger unbeteiligten Substrat ist in voller Revision begriffen. Die Frage, ob Magmatektonik oder Rindentektonik das Primat habe, wurde gestellt, verschieden beantwortet oder als sinnlos abgelehnt. Das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalbewegungen, Oszillationen, Undationen einerseits, Zusammenschub, Triften, Abfließen andererseits wird nicht minder verschieden beantwortet wie früher.

Manche guten neuen Begriffe sind von H. STILLE eingeführt worden. Schon nach L. KOBER wird in Geosynklinalgebieten zuerst die Simazone flüssig, dann die „granitoide“ Zone. „Die Oscillationen der Erdrinde sind das Abbild von grösseren Vorgängen der Tiefe, in erster Linie der Magmenzone. Auch diese atmet, hebt sich, senkt sich, erhärtet sich, kühlt sich ab, wird wieder flüssig“ (L. KOBER: Die Orogentheorie). Solche Sätze wirken sehr suggestiv, erinnern indessen in ihrer bilderreichen Unbestimmtheit zu sehr an die vor 400 Jahren grandios erscheinenden Visionen eines G. BRUNO und LEONARDO DA VINCI. Dazwischen hat bereits die exakte Wissenschaft mancherlei zutage gefördert, was präzisieren und einschränken helfen

²³) Für H. G. BACKLUND ist noch 1941 (loc. cit.) Magmentektonik unverständlich. Er empfindet jede Beteiligung von Magmen an Dislokationsvorgängen als „störenden Anteil“ oder behauptet, dass deformierte Gesteine von andern Forschern in „magmatischen“ Untersuchungsgebieten als „störende Flächen“ empfunden wurden. Sollte er Recht haben, was sehr unwahrscheinlich ist, so würde das nur ein Beweis sein, wie notwendig es ist, unbefangen an die Probleme „Magmen- und Krustentektonik“ heranzutreten.

sollte. Das Problem der Granitbildung und des Evolutionsprozesses vom Orogen zum Kratogen wird hierbei seine zentrale Bedeutung beibehalten. Erste Grundlage wäre es zu wissen, welchen Tiefenbau die Geosynklinalgebiete vor der Faltengebirgsbildung besitzen. Dass sie labilere Erdkrustenabschnitte sind als die Kratogene, folgt aus ihrem späteren Verhalten. Aber diese Labilität wird ganz verschieden gedeutet. Und wiederum haben gewisse unscharfe Begriffe Verwirrung gestiftet. Sial (Sal) und Sima (oder Salsima) waren z. B. ursprünglich chemisch definiert. In der geologischen Literatur wurden sie aber bald auch im Sinne eines Gegensatzes von fester Erdkruste als Sial und \pm flüssigem oder fliessbarem Substrat als Sima benutzt. Ganz abgesehen davon, dass die Fliesszone ein komplexes Gebilde sein muss, rechtfertigt von vornherein gar nichts diese willkürliche Übertragung. Es ist durchaus möglich, dass an einzelnen Orten die Fliesszone zu bestimmten Zeiten weit ins Sial reicht, während andernorts Sima (oder Salsima)-massen grosser Ausdehnung bereits zur mehr oder weniger starren Kruste gehören.

Bedeutet nun grössere Labilität im Orogen geringere Krustentiefe als im Kratogen? Ist die Evolution vom Orogen zum Kratogen ein normalerweise einsinniger Prozess, verbunden mit Abkühlung und Wachsen der Kontinente? Manches spricht zu Gunsten dieser Vorstellung; wenn wir aber ehrlich sein wollen, müssen wir sagen, dass wir über die Beschaffenheit der Erde auch nur bis in Tiefen von 80 km noch sehr wenig wissen. Das geht vielleicht am besten daraus hervor, dass R. W. VAN BEMMELEN vor wenigen Jahren noch der Meinung war, das Orogen sei im wesentlichen der Ort, wo sich basisches Magma zu Granitmagma differenziert; heute aber scheint ihm Granit zu einem grossen Teil nicht einmal mehr ein Eruptivgestein zu sein. Unsicherheit besteht somit in weitem Umfange.

Ein weiteres Beispiel: H. SENG (Die Migmatitfrage und der Mechanismus parakristalliner Prägung, loc. cit., Seite 479) legt bei der Frage der Gesteinsbildungen im Erdinnern so grosses Gewicht auf Stoffumsätze im Festen, dass er die Frage stellt: „Nehmen die Schmelzflüsse wirklich so nennenswert mit der Tiefe zu? Spielen sie die ausschlaggebende und fast allein entscheidende Rolle im Stoffwechsel unserer Erdrinde, die man ihnen gemeinhin zuschreibt? Gibt es überhaupt andere als palingene granitische Schmelzmassen? Diese Fragen stellen, ist angesichts des erörterten Sachverhaltes kein müssiges Spiel. Zu beantworten hat sie freilich die Forschungsarbeit einer ganzen Generation, und es wird des Aneinanderpassens der Ergebnisse verschiedenster Regionen und Tiefenstufen bedürfen, ehe wir das Recht haben, hier eine halbwegs vertretbare Meinung zu lehren.“

Im gegenwärtigen Stadium unserer Erkenntnis dürfen deshalb derartige rein hypothetisch zu beantwortende Fragen den Petro-

graphen nicht allzu stark beeinflussen. Noch ist vieles möglichst vorurteillos zu beobachten und durch Experimente abzuklären. Da wirkt das Festhalten an unbeweisbaren Anschauungen oft hemmend, weil es gewisse Beobachtungsrichtungen als unwesentlich beiseite schiebt.

Deshalb ist es ja auch zu begrüßen, dass die Frage der Granitbildung durch Rückkehr zu alten und ältesten Anschauungen neu als Problem hingestellt wurde. Es sollte im Vorhergehenden nur der Versuch gemacht werden, zu prüfen, ob die neuen Argumente beweiskräftig sind. Das ist nun unzweifelhaft noch nicht der Fall; man hat sich die Sache zu leicht gemacht. Wichtiger als gewisse vage Vorstellungen überall anwenden zu wollen, ist die konsequente Ausarbeitung einer Arbeitshypothese, ihre begrifflich einwandfreie Entwicklung und ihre Untermauerung durch feldgeologische, mikroskopische, chemische und chemisch-physikalische ausgedehnte (nicht nur beiläufige) Untersuchungen. Das gilt natürlich nicht nur für die Anschauungen, die nach der Meinung des Verfassers zur Zeit eine mit den Gegebenheiten nicht im Einklang stehende hypertrophische Entwicklung durchmachen, sondern auch für die Theorie der komplexen gravitativen Kristallisationsdifferentiation von Magmen.

Es scheint notwendig zu sein, mehr als es bisher üblich war, die verbindenden Elemente zwischen den Gesteinsklassen zu betonen. Eine Gesteinsklassifikation, die von der Temperatur der Bildungsweise ausgeht, kann unter „Katagesteinen“ z. B. ohne weiteres Eruptivgesteine und katametamorphe Gesteine zusammenfassen, und erst in zweiter Linie den Zustand des Ausgangsmateriales ins Auge fassen. Schon durch eine derartige Betrachtungsweise werden Analogien verständlich und neue Gesichtspunkte gewonnen, ohne dass deshalb der durch Erfahrungen gesicherte Bestand über Bord geworfen werden muss. Es sind somit durchaus Modifikationen der bisherigen, herrschenden Theorien möglich. Bis heute jedoch haben die im Vorangehenden skizzierten Bestrebungen die Gesamtheit der beobachtbaren Erscheinungen zu wenig berücksichtigt. An sich sehr heterogene Elemente sind künstlich vereinigt, sich widersprechende Ideen sind schlagwortartig in einer Opposition zusammengefasst worden. Der Grundgedanke, eine Revision gewisser Schulmeinungen sei notwendig, ist wohl durchaus berechtigt, übersehen aber wurde, was M. PLANCK in einem Vortrag über „Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaften“ sagte: „Die Frage aber, an welchem Punkte und in welcher Weise diese Veränderung vor-

zunehmen ist, bietet oft grosse Schwierigkeiten. Denn je bewährter eine bestehende Theorie ist, umso empfindlicher und widersetzlicher zeigt sie sich gegenüber allen Abänderungsversuchen. Sie gleicht darin einem kunstvollen, weitverzweigten Organismus, dessen einzelne Glieder sich gegenseitig bedingen und derartig zusammenhängen, dass ein Eingriff, den man an einer Stelle vollzieht, sich zugleich auch an ganz anderen, scheinbar weit entfernten Stellen bemerkbar macht.“

Nachtrag. Nachdem dieses Manuskript, das anfangs Februar 1942 einem Vortrag in der Geologischen Gesellschaft Zürich zur Grundlage diente, bereits dem Druck übergeben worden war, erhielt der Verfasser Ende Februar die Arbeit: "Formation of igneous-looking rocks by metasomatism: A critical review and suggested research" (Bull. Geol. Soc. of America, vol. 52, pp. 1525—1576, 1941) von FRANK F. GROUT zugesandt. Diese ausgezeichnete Arbeit, mit einem "schedule of criteria of metasomatic replacement", ergänzt besonders für das englische Sprachgebiet unsere Ausführungen. Sie enthält ausserdem eine wertvolle Bibliographie und muss von Allen, die sich für das Granitproblem interessieren, zu Rate gezogen werden. Dass, zum Teil bis in Einzelheiten, die Gedankengänge der vorliegenden und der GROUTSchen Arbeit sich decken, sei durch zwei Zitate belegt.

GROUT schreibt (Seite 1528): "Recent writers have now suggested that igneous-looking rocks resulted from metasomatism in so many places that they assume the process is established, wholly fail to see the complexity of the problem, and quote each other as authorities but not one area has been described convincingly. It seems that the enthusiastic advocates carry their idea too far, applying it to masses several miles across; the conservatives admit a few feet; the truth may lie between, but the conservatives have the weight of evidence on their side, and the burden of proof is on the advocates of extensive granitization."

Und Seite 1568: "The present suggestion, then, is that anyone who thinks he has a large mass of igneous-looking rock formed by replacement should not simply give it a superficial glance and make the suggestion, but should give it preliminary study and, if it seems favorable, call for research funds and send for a group of experts in several lines — structure, chemistry, petrology, metamorphism, geomorphology, and so on — to make sure that none of their special abilities serves to throw the idea out of the bounds of possibility."

GROUT setzt sich mit den Begriffen: "magmatic, "lit-par-lit injection", assimilation, metasomatism, replacement, granitization, ultrametamorphism, migmatite" auseinander und geißelt die Begriffsverwilderung. Sehr zu beachten ist die Zusammenstellung von Kriterien, die für metasomatische Verdrängung sprechen, denn "in presenting an idea that is not widely accepted one should expect to meet objections. The evidence for it should be such as to bear critical scrutiny of other workers" (Seite 1541).

Auch in bezug auf die „lithogene Magmenbildung“ herrscht zwischen GROUT und dem Verfasser vorstehender Arbeit weitgehende Übereinstimmung: "Finally there may be rocks that become igneous-looking by palingenesis (refusion, anatexis) or possibly by partial refusion to a plastic state often called rheomorphic. So far as the processes produce magma or partial magma the rocks should be considered truly igneous, and the replacement that occurs in the solid remaining unfused is a minor factor in igneous appearance. The importance of such palingenesis in the crust is uncertain, but some rocks may have been softened at such depths as to approach the zones of magma generation. These would be exposed only where erosion is especially great and can be expected only locally and only in the great Shield areas" (Seite 1563).

Die gleiche Erfahrung, die GROUT gemacht hat, bewog den Verfasser zu vorstehender Studie. Sie lautet: "A final criticism of the method of presentation of papers on replacement is based on the writer's experience in following up references given by the authors of papers on granitization and metasomatic processes. Several who write as if some other man had evidence or data to support an opinion or conclusion mislead the reader, because the author cited gives no such evidence or data" (Seite 1567). Als Beispiel: "F e n n e r writes (personal communication): it sometimes comes as a surprise to me to find what meaning (or lack of meaning) geologists have attached to views I have published." Das war sowohl für GROUT wie den Verfasser massgebend, in den zwei kritischen Studien die verschiedenen Autoren durch Zitate selbst zum Worte kommen zu lassen.

Eingegangen: 10. Februar 1942.