

Der Chemismus der Gesteine¹⁾

Von

CONRAD BURRI (Zürich)

Die Petrographie ist die Lehre von den Gesteinen. Als Gesteine bezeichnet man definitionsgemäss Mineralvergesellschaftungen, welche innerhalb der Erdkruste grössere Räume einnehmen, während solche, welche nur von örtlich beschränkter Ausdehnung sind, unter den Begriff der akzessorischen Mineralagerstätten fallen. Von ihnen handelt die Lagerstättenkunde. Ursprünglich vorwiegend deskriptiv orientiert und ein Kapitel der Geologie im weitern Sinne bildend, erlangte die Petrographie, gleich andern geologischen Wissenszweigen, im Laufe der Entwicklung eine immer grössere Selbständigkeit. Da sie sich in der Folge in immer zunehmendem Masse genetischen Fragen zuwandte, ist ihre heutige Stellung vor allem dadurch gekennzeichnet, dass sie, ohne Schwächung ihrer traditionellen Beziehungen zur Geologie, ebenso enge Verbindungen zu Mineralogie, Chemie, Physik, physikalischer Chemie und Geophysik unterhält. Dies verschafft ihr die allen Grenzgebieten eigene Faszination, wie sie durch das Ineinandergreifen und gegenseitige Sichüberschneiden verschiedener Betrachtungsweisen bedingt ist.

Ein wichtiger Zweig der Petrographie, nämlich derjenige, welcher sich mit den chemischen Problemen der Gesteine und der Gesteinsbildung beschäftigt, ist die chemische Petrographie oder Petrochemie²⁾, welche gerade auch in Zürich eine festverankerte Tradition besitzt. Sie wurde seinerzeit schon durch ULRICH GRUBENMANN, 1893 bis 1920 Direktor des Mineralogisch-Petrographischen Institutes und Ordinarius an den Zürcher Hochschulen, in Lehre und Forschung sorgfältig gepflegt. Sie bildete immer auch ein bevorzugtes Forschungsgebiet seines Schülers und Nachfolgers PAUL NIGGLI, auf welchem dieser einige seiner bedeutendsten wissenschaftlichen Erfolge errang.

Vom genetischen Standpunkt aus teilt man die Gesteinswelt üblicherweise in Eruptivgesteine, Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine ein. Die ersteren entstehen durch Kristallisation glutflüssiger Silikatschmelzen des Erdinnern, welche neben schwerflüchtigen Komponenten auch leichtflüchtige, vor allem Wasser enthalten, wie z. B. an tätigen Vulkanen beobachtet werden kann.

¹⁾ Die vorliegenden Ausführungen entsprechen im wesentlichen der am 6. November 1954 als o. Professor an der Universität Zürich gehaltenen Antrittsvorlesung.

²⁾ In neuerer Zeit macht sich gelegentlich die Tendenz bemerkbar, die Chemie des Petroleum und seiner Derivate als «Petrochemie» zu bezeichnen. Demgegenüber ist jedoch mit Nachdruck festzuhalten, dass Petrochemie im hier gebrauchten Sinne von «Gesteinschemie» die unbedingte Priorität besitzt. Schon Bd. 7 des bekannten «Handwörterbuches der Naturwissenschaften», Jena, Gustav Fischer (1912) enthält z. B. S. 596 bis 618 die Artikel: A. OSANN, Petrochemie der Eruptivgesteine; G. LINCK, Petrochemie der Sedimente, und L. HEZNER, Petrochemie der metamorphen Gesteine. Aus jüngster Zeit stammt z. B. A. N. SAWARIZKI, Einführung in die Petrochemie der Eruptivgesteine, Moskau, Staatsverlag, 1. Auflage 1946, 2. Auflage 1950, russisch-deutsche Ausgabe im Akademie Verlag, Berlin, 1954.

Die Sedimente dagegen sind entweder Verwitterungsrückstände oder Absätze von durch Wasser, Luft oder Eis transportiertem Verwitterungsmaterial, oder Ausfällungen von in Wasser Gelöstem, entweder auf rein anorganischem Wege oder unter Mitwirkung von Organismen. Die metamorphen Gesteine schliesslich verdanken ihre Entstehung dem Umstand, dass alle Kristallarten, also auch die gesteinsbildenden Mineralien, nur innerhalb begrenzter PT-Bereiche existenzfähig sind. Es müssen sich daher bei Überschreitung der betreffenden Grenzen zufolge von Bedingungsänderungen, welche ihrerseits durch geologische Vorgänge ausgelöst werden, neue Phasengemeinschaften, d. h. Gesteine von anderer mineralogischer Zusammensetzung bilden. Dies gilt sowohl für Eruptiv- wie für Sedimentgesteine. Da es sich zeigt, dass für einen Teil dieser Umwandlungen, nämlich für solche in bedeutender Erdtiefe bei Temperaturen gegen etwa 1000°C und bei hohen hydrostatischen Drucken, die Bildungsbedingungen weitgehend denjenigen der Tiefengesteine nahekomen, so ist man heute vielfach nicht mehr geneigt, die Trennung zwischen Eruptiv- und metamorphen Gesteinen so scharf zu ziehen wie früher. Man fasst daher die Eruptiv- und die metamorphen Gesteine, weil innerhalb der Erdkruste entstanden, als *e n d o g e n e* Bildungen zusammen und stellt ihnen die auf der Erdoberfläche gebildeten Sedimente als *e x o g e n e* gegenüber. Diese durch P. NIGGLI vorgeschlagene Einteilung erweist sich auch deshalb als angezeigt, weil nach neueren Ansichten eine Reihe von Gesteinen, welche früher als rein eruptiven Ursprungs angesehen wurden, sich aus bereits vorhandenen durch Metamorphose unter Stoffzufuhr und -austausch, d. h. durch sogenannte Metasomatose, gebildet haben dürften. Es liegt somit hier ein Ineinanderfliessen und Überschneiden der beiden Bildungsarten vor.

Stellt man sich prinzipiell auf den sicher richtigen Standpunkt, dass zur Charakterisierung anorganischer Naturobjekte neben morphologischen Kriterien die chemische Zusammensetzung von ausschlaggebender Bedeutung ist, so wird die Frage nach dem Chemismus der Gesteine von grösster Wichtigkeit. Dies gilt in ganz besonderem Masse in Bezug auf die Eruptivgesteine, da diese nicht nur selbständig auftreten und erfahrungsgemäss grosse Räume der uns zugänglichen Teile der Erdkruste einnehmen, sondern da sie ja auch das Ausgangsmaterial zur nachträglichen Bildung der Sedimente und eines Teiles der metamorphen Gesteine abgeben.

Die Frage nach dem Chemismus der Eruptivgesteine kann von zwei Gesichtspunkten aus formuliert werden: man kann einerseits nach dem mittleren Chemismus der Eruptivgesteine überhaupt fragen sowie andererseits nach der chemischen Variationsbreite der einzelnen Eruptivgesteinstypen. Die Frage nach dem mittleren Chemismus ist leicht zu lösen. Man hat hierzu nur das Mittel aller vorhandenen, zuverlässigen chemischen Eruptivgesteinsanalysen — es gibt deren über 5000 — zu bilden, wie dies schon von verschiedenen Autoren, zuletzt und in vollständigster Weise durch F. W. CLARKE und H. S. WASHINGTON, getan wurde. Das Resultat dieser beiden Forscher figurirt in allen Lehrbüchern als mittlere Zusammensetzung der der direkten Beobachtung zugänglichen äusseren Erdhülle, der sogenannten äusseren

Lithosphäre. Man hat gegenüber diesem Vorgehen den Einwand erhoben, dass es schwerlich zu richtigen Resultaten führen könne, da einerseits bei der Mittelbildung der volumemässige Anteil der einzelnen Gesteinstypen nicht genügend berücksichtigt werde und weil andererseits erfahrungsgemäss seltene Gesteinstypen vermehrt untersucht und chemisch analysiert wurden als z. B. die weitverbreiteten und oft monoton erscheinenden Granite. V. M. GOLDSCHMIDT hat jedoch auf sehr originelle Weise zeigen können, dass die Methode der Mittelbildung durchaus zuverlässige Werte zu liefern imstande ist. Er ging von der Annahme aus, dass die gemischten Verwitterungsprodukte von Gesteinen, sofern chemische Prozesse bei ihrer Bildung nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben, deren mittleren Chemismus widerspiegeln müssten. Ist das Einzugsgebiet dazu noch von grosser Ausdehnung und petrographischer Mannigfaltigkeit, so muss ihre Zusammensetzung zugleich auch dem mittleren Chemismus der äusseren Lithosphäre entsprechen. Ein sehr geeignetes Objekt zu derartigen Untersuchungen bilden die diluvialen südnorwegischen Lehme, deren Bildung sicherlich bei tiefen Temperaturen stattfand, was eine Garantie dafür bietet, dass chemische Verwitterungsprozesse dabei nicht wesentlich beteiligt waren. Ausserdem ist ihr Einzugsgebiet sehr ausgedehnt und in petrographischer Hinsicht äusserst mannigfaltig. Tatsächlich kommt denn auch ihre chemische Zusammensetzung, wie aus Tabelle I hervorgeht, den von CLARKE und WASHINGTON berechneten Werten sehr nahe.

Tabelle I

	a)	b)
SiO ₂	59,12	59,19
Al ₂ O ₃	15,34	15,82
Fe ₂ O ₃	3,08	3,41
FeO	3,80	3,58
MnO	0,12	0,11
MgO	3,49	3,30
CaO	5,08	3,07
Na ₂ O	3,84	2,05
K ₂ O	3,13	3,93
TiO ₂	1,05	0,79
P ₂ O ₅	0,30	0,22
S	0,05	0,07
CO ₂	0,10	0,54
H ₂ O	1,15	3,02

a) Mittlere Zusammensetzung der äusseren Lithosphäre nach F. W. CLARKE und H. S. WASHINGTON.

b) Mittlere Zusammensetzung der südnorwegischen Diluviallehme nach V. M. GOLDSCHMIDT.

Ein etwas geringerer Gehalt an Ca und Na ist durch die losere Bindung dieser Ionen in den gesteinsbildenden Silikaten bedingt und daher verständlich.

Das Resultat dieser Berechnungen und direkten Bestimmungen des mittleren Chemismus der Eruptivgesteine beziehungsweise der äusseren Lithosphäre ist nun ein ganz unerwartetes und erstaunliches (vgl. Tabelle II).

Tabelle II

Häufigkeit der zehn wichtigsten Elemente der äusseren Lithosphäre (aus den Angaben von F. W. CLARKE und H. S. WASHINGTON, berechnet von T. F. W. BARTH, 1952).

	Gewichts%	Atom%	Volum%	Ionenradien in Å
O	46,71	60,5	94,24	1,40
Si	27,69	20,5	0,51	0,36
Al	8,07	6,2	0,44	0,50
Fe	5,05	1,9	0,37	0,70
Mg	2,08	1,8	0,28	0,65
Ca	3,65	1,9	1,04	0,99
Na	2,75	2,5	1,21	0,95
K	2,58	1,4	1,88	1,33
Ti	0,62	0,3	0,03	0,56
H	0,14	3,0	?	?
	99,34			
Übrige Elemente	0,66			
	100,00			

Von den über 90 bekannten chemischen Elementen sind nur deren 8, nämlich: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K und Mg gewichtsprozentisch in Mengen von über 1% vertreten, und ihr Anteil am Gesamtgewicht der äusseren Lithosphäre beträgt 98,6%, so dass der Anteil aller anderen Elemente insgesamt nur 1,4% ausmacht. Es handelt sich bei diesen acht Elementen ausschliesslich um solche niedriger Ordnungszahl beziehungsweise niedrigen Atomgewichtes. Unter ihnen dominiert der Sauerstoff bei weitem, indem sein Anteil mit 46,7% fast die Hälfte ausmacht. Gefolgt wird er von Si, dessen Anteil mit 27,7% etwas mehr als ein Viertel beträgt, während die Zahlen für die übrigen 6 Elemente unter 10% liegen. Es fällt sofort auf, dass eine ganze Reihe von technisch äusserst wichtigen Elementen, wie etwa die Buntmetalle oder P, nur in Mengen von unter 1% am Aufbau der äusseren Lithosphäre Anteil haben. Es wäre daher ganz ausgeschlossen, sie auf rationelle Weise in technischem Ausmasse zu gewinnen, wenn sie nicht durch lokal wirksam gewesene Konzentrationsprozesse angereichert worden wären und sogenannte Lagerstätten bildeten.

Betrachtet man statt der Gewichtsprozente die Atomprozente, d. h. die Anzahl der Atome eines Elementes in Bezug auf 100 Atome aller Elemente, so wird die dominierende Rolle des Sauerstoffes noch ausgeprägter. Sein Anteil beträgt atomprozentisch $\frac{3}{5}$, während derjenige des Siliziums auf $\frac{1}{5}$ zurückgeht. Ausserdem ist nun auch noch der Wasserstoff zu mehr als 1% vorhanden.

Besonders interessant ist die Betrachtung des volumenmässigen Anteils der einzelnen Elemente am Aufbau der äusseren Lithosphäre. Setzt man das Volumen der in den gesteinsbildenden Silikaten vorwiegend in Ionenform vorhandenen Elemente in Rechnung, so steigt der Anteil des Sauerstoffes gar auf $\frac{9}{10}$, während derjenige des Siliziums in Folge seines kleineren Raumbeanspruchungsvermögens auf 0,83% zurückgeht und nur noch für die relativ grossen Ca-, Na- und K-Ionen der Anteil über 1% beträgt. Es zeigt sich somit, dass die äussere Lithosphäre in erster Linie eine Packung aus relativ grossen

O-Ionen darstellt, in deren Hohlräumen die anderen Ionenarten eingelagert sind. Man kann daher die Lithosphäre mit gutem Recht auch als Oxysphäre bezeichnen. Vergleichsweise sei erwähnt, dass z. B. für die Ozeane der volumemässige Anteil des Sauerstoffes 96,87 % beträgt, während er für die Atmosphäre nur 20,95 % ausmacht. Für das wichtigste gesteinsbildende Mineral, Quarz von der Zusammensetzung SiO_2 , beträgt er 98,73 %.

Die Ursache für diese, in Anbetracht der grossen Anzahl von chemischen Elementen ganz unerwartet spezielle und einseitige Zusammensetzung der äusseren Lithosphäre liegt in den ersten Sonderungsprozessen, welche schon in prägeologischer Zeit einsetzten, wohl schon bei der Kondensation der Gaswolke, welche in der Folge zur Bildung unseres Erdballes führte. Unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der Astronomie, der Geophysik und der Meteoritenkunde ist es möglich, sich heute darüber plausible Vorstellungen zu machen.

Die zweite Fragestellung in Bezug auf den Gesteinschemismus, nämlich diejenige nach der chemischen Variationsbreite, lässt sich ebenfalls auf Grund des vorhandenen Analysenmaterials studieren. Hierbei ist eine Beschränkung auf die Eruptivgesteine gegeben und eine Ausdehnung der Betrachtung auf die gesamte äussere Lithosphäre durch Einbeziehung der sedimentären Bildungen weniger sinnvoll. Dies ergibt sich kurz aus folgenden Überlegungen. Die Sedimente entstehen aus präexistierenden Gesteinen als Folge der Verwitterungsvorgänge. Da hierbei im wesentlichen eine Trennung des Löslichen vom Unlöslichen stattfindet, und weil beim darauffolgenden Transport, z. B. durch fliessendes Wasser, eine weitere Sonderung mit Anreicherung des chemisch beständigen und mechanisch widerstandsfähigen Materials statthat, ist der Chemismus der Sedimente oft mehr zufälliger Natur. Man findet daher nicht selten bei nicht vollkommener Sonderung chemische Zusammensetzungen verwirklicht, welche dem ursprünglichen Chemismus noch sehr nahe stehen, während bei vollkommener Trennung auch extreme chemische Zusammensetzungen verwirklicht sein können. Diese sind oft gekennzeichnet durch das Vorherrschen oder Überwiegen eines einzigen Oxydes, wie z. B. SiO_2 in Sandsteinen, Al_2O_3 in Tonen oder Bauxiten, CaO in Kalksteinen, Na_2O in Salzlagern usw. Die Beantwortung der Frage nach der Variationsbreite des Chemismus der Sedimente liegt daher schon in deren Natur selbst und braucht, abgesehen von Spezialfällen, nicht näher untersucht zu werden. Dasselbe gilt natürlich auch für die aus derartigen Sedimenten ohne Stoffänderung hervorgehenden metamorphen Derivate.

Ganz anders liegen die Dinge für die aus magmatischen Schmelzflüssen hervorgegangenen Eruptivgesteine. Im Gegensatz zu der Bildung der Sedimentgesteine wird diejenige der Eruptiva durch thermodynamische Gesetze beherrscht, und die Lehre von den heterogenen Gleichgewichten ist auf sie anwendbar, so gut wie z. B. auf die Kristallisation der schon lange bekannten und vielfach untersuchten Metallschmelzen. Von diesem Standpunkt aus sind die Magmen komplizierte polynäre Systeme von überwiegend schwerflüchtigen silikatischen und oxydischen Komponenten mit untergeordneten leichtflüch-

tigen, besonders Wasser. Wie es die Phasenregel verlangt, ist die Zahl der miteinander auftretenden gesteinsbildenden Mineralien nur eine beschränkte im Vergleich zu der grossen Anzahl überhaupt bekannter Spezies. Da die Erstarrung im allgemeinen unter Bedingungen erfolgt, welche mit den Artkonstanten der betreffenden Systeme in keinerlei Beziehung stehen, so sind die auftretenden Gleichgewichte divariant und die Anzahl der koexistierenden Phasen, Gleichgewicht vorausgesetzt, entspricht daher im allgemeinen maximal derjenigen der Komponenten. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass infolge der sich über verschiedene Temperaturintervalle erstreckenden Mischkristallbildung Schwierigkeiten für die Wahl der Komponenten auftreten können. Dieser Spezialfall der Phasenregel für divariante Gleichgewichte ist etwa auch als «mineralogische Phasenregel» bezeichnet worden.

Angesichts der Kompliziertheit der magmatischen Systeme muss es wohl für immer als aussichtslos erscheinen, die magmatische Kristallisation in ihrer ganzen Komplexheit experimentell nachzuahmen. Die Schwierigkeit liegt jedoch nicht nur in der chemischen Kompliziertheit des Systems begründet, sondern auch darin, dass in der Natur wegen der grossen Ausdehnung der in Betracht kommenden Räume die äusseren Felder, vor allem Druck und Temperatur, inhomogen sind, und dass aus dem gleichen Grund auch der Einfluss der Gravitation eine massgebende Rolle spielt.

Es ist jedoch gelungen, die Schmelzgleichgewichte einer grossen Anzahl von wichtigen Teilsystemen mit 2 und 3 Komponenten experimentell zu bewältigen und quarternäre Systeme sind ebenfalls schon in Angriff genommen. Bis jetzt haben sich diese Untersuchungen fast ausschliesslich auf trockene Schmelzflüsse erstreckt, und zwar notgedrungen wegen der experimentellen Schwierigkeiten; aber gerade im gegenwärtigen Zeitpunkt liegen vielversprechende Anfänge in der Behandlung von H_2O -haltigen Systemen vor. Durch eine grosse Reihe derartiger Untersuchungen, welche man fast ausschliesslich dem Geophysikalischen Laboratorium der Carnegie Institution of Washington verdankt, wurden zahlreiche Probleme der magmatischen Mineralbildung weitgehend aufgeklärt und das Verständnis der magmatischen Prozesse entscheidend gefördert.

Hatte man zuerst angenommen, dass die magmatische Kristallisation enge Analogien zur metallischen zeigen würde, so ging aus den Untersuchungen des Geophysikalischen Laboratoriums in Washington bald hervor, dass diese Vermutung nicht zutraf, und zwar auch wenn man davon absieht, dass die Metalle, im Gegensatz zu den natürlichen Magmen, trockene Schmelzflüsse darstellen. Der wesentliche Unterschied liegt vielmehr darin, dass bei den Metallen die eutektische Kristallisation dominiert, wodurch dem Kristallisationsverlauf starre Bahnen vorgezeichnet sind. Im Gegensatz hierzu spielen für die Silikatsysteme peritektische Reaktionen, bei welchen frühausegeschiedene Phasen im Verlaufe der späteren Kristallisation unter Bildung neuer Kristallarten resorbiert werden, eine bedeutende Rolle. Die Verhältnisse liegen sogar derart, dass die überwiegende Anzahl der Minerale, welche die Eruptivgesteine aufbauen, Glieder von sogenannten Reaktionsserien sind, so

dass sich ihre Existenzbereiche im Laufe der Kristallisation gegenseitig auflösen. Dabei können die Reaktionsserien entweder sogenannte diskontinuierliche sein, indem die einzelnen Glieder verschiedene Kristallstrukturen aufweisen, wobei in der Reaktionsfolge einfache Orthosilikate sukzessive von immer komplizierteren Bautypen in Form von Ketten-, Band- und Gerüstsilikaten abgelöst werden, oder es kann bei den sogenannten kontinuierlichen Serien unter Erhaltung des Strukturtypus Mischkristallbildung auftreten. Diese ist überhaupt so weit verbreitet, dass, streng genommen, ein einziges gesteinsbildendes Mineral existiert, welches keine Anzeichen von Mischkristallbildung zeigt: der Quarz. Diese Umstände bringen es nun mit sich, dass der magmatischen Kristallisation, weit mehr als der metallischen, eine ausserordentliche Flexibilität, je nach den herrschenden näheren Umständen, eigen ist. Während bei der Grosszahl der metallischen Systeme die Kristallisation einfach in vorgezeichneter Weise auf das Eutektikum hintendiert, sind bei den silikatischen Systemen für ein und dieselbe Ausgangslage eine ganze Reihe von verschiedenen Kristallisationsverläufen möglich. Je nachdem ob bei den peritektischen Reaktionen die Phase, welche wieder resorbiert werden sollte, tatsächlich der Resorption anheimfällt, oder ob sie z. B. durch Überkrustung mit dem Reaktionsprodukt vor weiterer Einwirkung geschützt wird, oder ob sie für eine Reaktion überhaupt nicht mehr zur Verfügung steht, weil sie als spezifisch schwere Frühausscheidung in grössere Tiefen abgesunken ist, ist das Endresultat ein verschiedenes. Dabei können die abgesunkenen Kristalle in der Tiefe eine gravitativ bedingte Kristallansammlung bilden, welche in der Folge zu einem mehr oder weniger monomineralischen Gestein führt, oder sie können wegen der höheren Temperaturen wieder aufgeschmolzen werden. Je nach den näheren Umständen kann somit durch Kristallfraktionierung die Zusammensetzung der Restschmelze eine ganz unterschiedliche sein und ihre Kristallisation einen ganz verschiedenen Verlauf nehmen. So kann sich z. B. eine an und für sich an SiO_2 ungesättigte, d. h. nicht zur Quarzbildung befähigte Schmelze durch Frühausscheidung des SiO_2 -armen Mg-Orthosilikates Olivin, welches absinkt und so aus der Reaktion verschwindet, derart verändern, dass sich SiO_2 anreichert und zum Schluss als Quarz auskristallisiert. Ähnliches gilt auch für Systeme mit Mischkristallbildung, bei welchen die instabil gewordenen Mischungsglieder nicht resorbiert werden, wie dies dem Gleichgewicht entsprechen würde, sondern in Form von zonaren Bildungen durch die stabilen Mischkristallphasen überkrustet werden.

Durch derartige Prozesse, welche man zusammenfassend als gravitative Kristallisationsdifferentiation bezeichnet, können somit aus ursprünglich homogenen Schmelzen Teilschmelzen von stark abweichender Zusammensetzung abgespalten werden, und es besteht wohl kein Zweifel, dass ein grosser Teil der angetroffenen Variationen in der chemischen Zusammensetzung miteinander vergesellschafteter Eruptivgesteine auf diese Weise zu deuten ist.

Von grosser Bedeutung sind auch die Fragen, welche die Zusammenhänge zwischen bauschalem Gesteinschemismus und Art der auftretenden Mineralien betreffen. Es zeigt sich nämlich, dass wohl der Gesteinschemismus durch

den vorliegenden Mineralbestand eindeutig bestimmt ist, nicht jedoch umgekehrt auch der Mineralbestand durch den Gesteinschemismus. Je nach den näheren Umständen bei der Gesteinsbildung, ob z. B. die Kristallisation in grösserer oder geringerer Tiefe erfolgte und die leichtflüchtigen Bestandteile in der Schmelze zurückbehalten wurden oder absieden konnten, können sich bei gegebenem Chemismus verschiedene Mineralbestände herausbilden. So findet man z. B. in an der Oberfläche erstarrten vulkanischen Laven etwa die wasserfreie Mineralkombination Leucit + Olivin verwirklicht, während chemisch gleich zusammengesetzte Tiefengesteine an deren Stelle den H₂O-haltigen Biotit + Kalifeldspat führen. Auch die Kieselsäure kann z. B. in ganz verschiedener Weise auf die Alumosilikate und die Mg-Fe-Silikate verteilt sein, so dass Gesteine von gleichem Chemismus entweder Feldspäte + Olivin oder Feldspatoide + Pyroxene oder Hornblende zeigen können. Stark Al-haltige Hornblendens und Augit können auch beträchtliche Prozentgehalte an potentiellen Feldspäten enthalten, so dass feldspatführende und feldspatfreie Gesteine gleichen Bauschalchemismus aufweisen können. Diese als Heteromorphie bezeichnete Erscheinung ist natürlich von grösster Wichtigkeit für alle Klassifikationsversuche der Eruptivgesteine, indem sie bewirkt, dass mineralogische und chemische Gesichtspunkte in gleicher Weise berücksichtigt werden müssen. Von ungleich grösserer Bedeutung ist sie selbstverständlich für die metamorphen Gesteine. Für diese stellt die Tatsache, dass Gesteine von gleichem Chemismus, je nach den herrschenden Bildungsbedingungen, einen ganz verschiedenen Mineralbestand aufweisen können, überhaupt das grundlegende Phänomen dar. Zum Studium der Beziehungen zwischen Bauschalchemismus und Mineralbestand stellt die von NIGGLI ersonnene Methode der sogenannten Äquivalentnorm ein ausgezeichnetes Werkzeug und einen entscheidenden Fortschritt dar, um so mehr, als sie sowohl auf eruptive wie metamorphe Gesteine gleichermaßen anwendbar ist.

Es wird auch verständlich, dass die Variationsbreite des Chemismus der Eruptivgesteine, im Gegensatz zu derjenigen der Sedimente, keine zufällig-willkürliche sein kann, und dass extreme Zusammensetzungen, wie sie dort zu konstatieren sind, kaum auftreten werden. Die genaue zahlenmässige Feststellung der für die Eruptivgesteine tatsächlich vorhandenen Variation ist ein wichtiges Problem der chemischen Petrographie. Es gilt die Grenzen dieser Variation innerhalb der rein rechnerisch überhaupt möglichen, d. h. das sogenannte Eruptivfeld, genau festzulegen und zu prüfen, inwiefern die vorhandene Variation durch Prozesse, wie sie geschildert wurden, erklärt werden kann. Diese Aufgabe ist heute weitgehend gelöst, und es zeigt sich, dass die Variationsbreite der Eruptivgesteine tatsächlich eine streng begrenzte ist und dass das Eruptivfeld nur einen wohlabgegrenzten Teilraum des gesamten Konzentrationsraumes einnimmt.

Diese Betrachtungen führen nun auf ein weiteres Gebiet, welches ebenfalls zur chemischen Petrographie gehört, nämlich zum vergleichenden Studium der natürlich vorkommenden Gesteinsvergesellschaftungen vom chemischen Standpunkte aus.

Da die Petrographie in vielfacher Hinsicht eine Mittelstellung zwischen beschreibenden und exakten Naturwissenschaften einnimmt, zeigt sie in ihrer Entwicklung auch zahlreiche Züge, wie sie aus Botanik und Zoologie bekannt sind. Wie diese Wissenschaften kannte die Petrographie zuerst eine Periode, während welcher die Aufmerksamkeit vorwiegend dem Einzelindividuum galt, und welche durch Versuche zur Schaffung von klassifikatorischen Systemen gekennzeichnet war. Als gewissermassen das Inventar der wichtigen Typen aufgenommen war und man über ihre charakteristischen Eigenschaften Bescheid wusste, war es die Vergesellschaftung und Assoziation dieser Typen, welche, wie in der Biocoenologie, das Interesse erweckten. Dabei fand man bald heraus, dass diese in ihrer Zusammensetzung bestimmten Gesetzen gehorchten, was ihnen ganz bestimmte, wohldefinierte Züge verleiht.

Bei näherem Studium erkannte man auch, dass die verschiedenen Typen von Gesteinsassoziationen mit gewissen Besonderheiten im Bau des betreffenden Erdrindenstückes verknüpft erscheinen oder, anders ausgedrückt, dass offenbar die geologisch-tektonischen Vorgänge zur Zeit der Bildung der betrachteten Eruptivgesteine für die besondere Ausbildung der ganzen Vergesellschaftung verantwortlich waren. Es zeigte sich also, dass, wiederum in Analogie zur Biocoenologie, sich auch hier gewisse Standortsfaktoren bemerkbar machten. In diesem Sinne definiert man Vergesellschaftungen von Gesteinen, welche bei ihrer Entstehung durch solche Standortsfaktoren ein charakteristisches Gepräge erhalten haben, welche bei ihrer Entstehung einer wohldefinierten geologisch-tektonischen Einheit angehörten, als «Petrographische Provinz». So erkannte man z. B., dass die unmittelbar mit den jungen Faltungsvorgängen in den nord- und südamerikanischen Kordillern verknüpften Eruptivgesteine eine solche wohldefinierte petrographische Provinz bilden. Diese unterscheidet sich z. B. deutlich von der gleichaltrigen des böhmischen Mittelgebirges, welche im Vorland, d. h. ausserhalb der gleichaltrigen Alpenfaltung, gelegen ist. In der Folge erkannte man auch, dass diese zwei Provinzialtypen als solche weit verbreitet sind, indem der erstere überhaupt für Provinzen in gleichaltrigen Faltengebirgen, der zweite für solche in Vorländern oder allgemein in von gleichaltrigen Faltungen nicht erfassten Räumen typisch ist. Auf Grund seiner Verbreitung in den jungen Faltengebirgen rund um den Pazifischen Ozean nannte man den ersten Provinzialtypus den «pazifischen» und stellte ihm den zweiten als «atlantischen» gegenüber, weil sich ausgezeichnete Beispiele dafür auf den Vulkaninseln des Atlantik finden. Die Vergesellschaftungen des pazifischen Typus sind als Ganzes reicher an SiO_2 im Verhältnis zum Alkaligehalt oder, wie man sich ausdrückt, höher silifiziert als die atlantischen. Dies äussert sich darin, dass sie vielfach freien Quarz neben höchstsilifizierten Komponenten, wie z. B. Feldspäten und Augiten, führen. Die atlantischen Vergesellschaftungen sind dagegen niedriger silifiziert und führen deshalb kaum freien Quarz, dafür jedoch neben den Feldspäten, oder an deren Stelle, die SiO_2 -ärmeren Feldspatoide sowie vielfach Olivin.

Der atlantische Provinzialtypus scheint den Normalfall darzustellen, wie

er in von Faltungsvorgängen unbeeinflussten Erdrindenstücken verwirklicht ist. Seine Gesteinsassoziationen lassen sich durch Prozesse der gravitativen Kristallisationsdifferentiation unter Annahme eines basaltischen Stammagmas befriedigend erklären. Die Annahme eines basaltischen Stammagmas erscheint durch verschiedene Beobachtungstatsachen als gerechtfertigt. Einmal sind Basalte überhaupt die verbreitetsten vulkanischen Gesteine, und es gibt an verschiedenen Stellen der Erde grosse Gebiete, welche von sogenannten Plateaubasalten geradezu überflutet sind. Es zeigt sich auch, dass dort, wo in atlantischen Provinzen mit den Basalten andere Gesteinsarten vergesellschaftet sind, diese mengenmässig gegenüber den Basalten stark zurücktreten. Schliesslich führt das seismische Verhalten der Erde zur Annahme einer zusammenhängenden Schicht von basaltischer Zusammensetzung in der Tiefe, welche als Quelle der basaltischen Magmen aufzufassen ist. Für gewisse extrem niedrig silifizierte Vorkommen hat sich noch ein weiteres Prinzip als zusätzlich wirksam erwiesen, nämlich die Assimilation von Karbonatgesteinen. Diese wirkte durch die Bildung von Kalksilikaten in zusätzlicher Masse desilifizierend.

Im Gegensatz hierzu bestehen für viele Provinzen des pazifischen Typus gewisse Schwierigkeiten in der Deutung der grossen Massen SiO_2 -reicher granitischer Gesteine, wie sie oft vorhanden sind. Die genetische Herleitung granitischer Magmen durch gravitative Differentiationsprozesse aus SiO_2 -ärmeren Stammagmen ist prinzipiell durchaus möglich, und derartige Bildungen haben in kleinerem Maßstabe sicherlich vielerorts auch stattgefunden. Es hält jedoch sehr schwer, die Entstehung der gewaltigen Massen granitischer Gesteine, wie sie aus vielen Faltengebirgen bekannt sind, auf diese Weise zu deuten. Aus kieselsäurearmen, z. B. basaltischen Stammagmen, können sich durch Differentiationsprozesse der geschilderten Art nur sehr beschränkte Mengen kieselsäurereicher, granitischer Magmen bilden. Es müssten daher sehr grosse Massen von derartigen Stammagmen zur Verfügung stehen und es müssten neben den granitischen Magmen so grosse Mengen an kieselsäurearmen Schmelzen mitgebildet werden, welche sich unserer Beobachtung entziehen, dass dies nur sehr schwer vorstellbar ist. Man nimmt daher in neuerer Zeit vielfach an, dass die Granite der Faltengebirge auf andere Weise entstanden sein müssen. Durch die gebirgsbildenden Vorgänge werden grosse Massen ursprünglich hochgelegener Krustenteile in grössere Erdtiefen und damit in Regionen erhöhter Temperatur eingefaltet. Es besteht daher die Möglichkeit einer differentiellen Aufschmelzung oder Anatexis. Von dieser darf angenommen werden, dass sie Schmelzen granitischer Zusammensetzung zu liefern imstande ist. Die von den Geophysikern immer wieder konstatierten Schweredefizite in Faltengebirgen sind eine gute Stütze für das Vorhandensein derartiger Einfaltungen höherer, respektiv spezifisch leichter Krustenteile. Neben dieser etwa auch als lithogen bezeichneten Entstehung granitischer Magmen wird jedoch auch angenommen, dass die granitischen Gesteine gar nicht aus Schmelzen entstanden seien, sondern durch metasomatische Umwandlung präexistierender Gesteine von ganz anderem Charakter. Dabei sollen aufsteigende Lösungen und Gase oder ionendisperse Emanationen die

wirksamen Agenzien gewesen sein und die zur Umwandlung notwendige Stoffzufuhr und -wegfuhr bewirkt haben. Extreme Ansichten nehmen sogar Diffusion in festem Zustande an, was jedoch angesichts dessen, was man über den Verlauf derartiger Prozesse weiss, sehr unwahrscheinlich erscheint. Erfolgt diese Granitisation schrittweise in situ, so müssen sich allmähliche Übergänge zwischen ursprünglich vorliegendem und granitisiertem Gestein ergeben. Führt die Granitisation jedoch zur völligen Mobilisation unter Verflüssigung, so können derartige Massen durch Abquetschung oder Aufstieg wie normale Magmen intrudieren, und ihre Kontakte mit dem Nebengestein müssen sich wie eigentliche Intrusivkontakte verhalten.

In Bezug auf diese Granitisationstheorien bestehen jedoch eine grosse Anzahl von Schwierigkeiten, und zwar nicht nur hinsichtlich des eigentlichen Mechanismus der Granitisation und der Konstitution der granitisierenden Agenzien, sondern auch hinsichtlich derer Herkunft. Ob diese von tieferliegenden Magmen primärer Art herzuleiten sind, oder ob es sich um während der Gebirgsbildung anatektisch, d. h. durch Wiederaufschmelzung eingefalteter Krustenteile mobilisiertes Material handelt, oder ob es sich um eine ganz allgemein vorhandene Aufwärtswanderung leichter Ionenarten handelt, welche in gewissem Sinne ein Fortdauern der grossen geochemischen Sonderungsvorgänge darstellt, welche bei der Entstehung unserer Erde ihren Anfang nahmen, oder ob noch andere Möglichkeiten in Betracht kommen, dies steht alles noch zur Diskussion. Auffällig in diesem Zusammenhang ist sicherlich, dass Granitisationsprozesse in älteren Perioden der Erdgeschichte einen bedeutend grösseren Umfang erreichten als die jüngeren. Auf alle Fälle lässt sich sagen, dass die Granitisationstheorien zwar für eine ganze Reihe schwieriger Fragen bestechend erscheinende Antworten zu bieten vermögen, dass durch sie jedoch andererseits eine Fülle von neuen Problemen aufgeworfen wird, für welche plausible Lösungen heute noch sehr ferne liegen.

In den typisch atlantischen Provinzen dominiert unter den Alkalimetallen das Na. Es sind jedoch auch, wenn auch weitaus in geringerer Zahl, alkalireiche Provinzen mit Kalivormacht bekannt. Sie wurden früher einfach zum atlantischen Provinzialtypus gerechnet. Es ist das Verdienst von P. NIGGLI, darauf hingewiesen zu haben, dass sie mit Vorteil vom atlantischen Typus abgetrennt werden, da Na und K sich kristallchemisch bedeutend weniger nahestehen, als dies auf Grund der Wertigkeit und der allgemein bekannten chemischen Eigenschaften vermutet werden könnte. Es sei in diesem Zusammenhange nur kurz daran erinnert, dass eine zum Kaliglimmer Biotit analoge Na-Verbindung nicht bekannt ist und dass sich K und Na in den Feldspäten z. B. nur bei hohen Temperaturen gegenseitig voll zu ersetzen vermögen. Der Grund zu diesem verschiedenen Verhalten liegt bekanntlich im unterschiedlichen Raumbeanspruchungsvermögen der beiden Elemente in Ionenform. Für solche kalireichen Provinzen, welche vielfach durch den Kalifeldspatvertreter Leucit charakterisiert sind, wurde durch NIGGLI die Bezeichnung «mediterran» vorgeschlagen, weil sich typische Beispiele dafür im Mittelmeergebiet, u. a. am Vesuv finden. Auch hier kann die schon erwähnte Karbonatassimilation ihren

desilifizierenden Einfluss zusätzlich bemerkbar machen. Gerade die mittel- und süditalienischen Vulkane vom Bolsener See bis zum Vesuv bieten ausgezeichnete Beispiele für derartige Prozesse, und dem Vesuv kommt für deren nähere Erkenntnis die eigentliche Schlüsselstellung zu. Da die triadischen Karbonatgesteine die Dachregion des Magmaherdes bilden, geraten sie mit diesem in intensiven Kontakt. Durch die vulkanischen Eruptionen werden die mehr oder weniger umgewandelten Blöcke ausgeworfen, so dass die Reaktionen zwischen silikatischer Schmelze und Karbonatgesteinen in all ihren Stadien und Produkten studiert werden können.

Auch in tektonischer Beziehung ist die Abtrennung der mediterranen von den atlantischen Provinzen durchaus gerechtfertigt. Sie nehmen deutlich eine Zwischenstellung zwischen denjenigen vom pazifischen und atlantischen Typus ein, indem sie sich hauptsächlich in den Grenzregionen zwischen den Orogenen und den durch die Faltungsvorgänge nicht beeinflussten Rindenstücken finden.

Die Lehre von den petrographischen Provinzen ist, wie schon erwähnt, vom Vergleich der Eruptivgesteine der amerikanischen Kordilleren und derjenigen des böhmischen Mittelgebirges ausgegangen. Diese beiden Vergesellschaftungen stehen genetisch mit der jüngsten der grossen gebirgsbildenden Epochen der Erdgeschichte in Beziehung, mit der sogenannten alpidischen von spätmesozoisch-tertiärem Alter. Sie schuf die grossen Kettengebirge der zirkumpazifischen Zone sowie diejenigen der mediterranen, welche vom Mittelmeergebiet, von den betischen und nordafrikanischen Kettengebirgen über Alpen-Karpathen und Apenninen-Dinariden nach Kleinasien und Iran und über den Himalaya bis nach Indonesien reicht. Es lag daher nahe, die vergleichenden Studien auf alle mit diesen gebirgsbildenden Vorgängen ursächlich verknüpften petrographischen Provinzen auszudehnen. Zu diesen gehören auch die heute noch tätigen Vulkangebiete, denn der heutige aktive Vulkanismus stellt ja nur das allmähliche Ausklingen des einst viel ausgedehnteren tertiären dar, welcher seinerseits wiederum mit den tertiären gebirgsbildenden Vorgängen ursächlich verknüpft ist. Diese Untersuchungen werden dadurch sehr erleichtert, dass einerseits die chemisch-petrographische Erforschung dieser Provinzen relativ weit fortgeschritten ist und andererseits das durch die alpidische Gebirgsbildung geschaffene tektonische Bild nicht durch noch jüngere tektonische Revolutionen überlagert und verwischt wurde, wodurch Korrelationsversuche erschwert würden. Wegen des Nichtvorhandenseins jüngerer Gebirgsbildungen liegen auch die mit der alpidischen Orogenese verknüpften Eruptiva in nicht-metamorphem Zustande vor, was für ihre Beurteilung einen grossen Vorteil bedeutet.

Diese Untersuchungen haben die oben erwähnten Gesetzmässigkeiten in Bezug auf die Bedingtheit des Provinzialtypus durch die tektonische Lage, also bezüglich des Einflusses der «Standortsfaktoren» auf die Ausbildung der Gesteinsvergesellschaftungen, weitgehendst bestätigt. Sie haben sogar in einigen Fällen auch erlaubt, wertvolle Rückschlüsse auf die tektonischen Verhältnisse in ungenügend erforschten Gebieten zu ziehen, und so zur Aufklärung der allgemeinen geologischen Situation beizutragen. Für die älteren gebirgs-

bildenden Epochen, für welche die soeben erwähnten günstigen Umstände der klar erkennbaren tektonischen Bedingungen und des frischen, nicht metamorphen Charakters der Eruptivgesteine in weit geringerem Masse gelten, ist das Bild in vielen Fällen bedeutend weniger klar. Für die variskischen und die kaledonischen Faltungen sind zwar vielfach noch durchaus analoge Gesetzmässigkeiten zu erkennen, für diejenigen vorpaläozoischen Alters ist dies jedoch kaum mehr möglich. Die Gründe sind die schon erwähnten, wozu noch kommt, dass die Entzifferung der geologischen Geschichte und die Datierung von stattgehabten Ereignissen mit zunehmendem Alter überhaupt immer komplizierter wird und dass viele hierfür massgebende Formationen entweder abgetragen oder nicht aufgeschlossen sind. Es scheint auch, als ob in den frühesten Zeiten der Erdgeschichte der Charakter des geologischen Geschehens von demjenigen späterer Perioden insofern verschieden gewesen wäre, als Granitisationen eine bedeutend grössere Rolle spielten als dies später der Fall war. Eine Entscheidung hierüber ist allerdings nicht leicht, da in alten Gebirgen andere und zwar tiefere Stockwerke der Erdkruste aufgeschlossen sind als in jüngeren, was einen Vergleich erschwert.
