

Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft =
Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della
Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 101 (1920)

Artikel: Die Gesteinsassoziationen und ihre Entstehung

Autor: Niggli, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90315>

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: 19.02.2026

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

Die Gesteinsassoziationen und ihre Entstehung.

P. NIGGLI.

Die in sich homogenen Bausteine der Erdrinde werden *Mineralien* genannt. Um sie zu studieren, müssen wir uns irgend ein Stück der Erdrinde soweit zerteilt denken, bis die Teile Homogenität besitzen oder zum mindesten ein einheitliches Ganzes mit wohldefinierten Eigenschaften bilden. Dadurch *trennen* wir, was seiner Entstehung nach zusammengehört, was einen *natürlich gewordenen Verband* bildet. Denn nicht nur die Einzelmineralien sind Forschungsobjekt, auch die Mineralgesellschaften müssen in ihrem So- und Nichtanderssein verstanden werden. Warum finden wir beispielsweise die Mineralien der seltenen Erden gerne miteinander vergesellschaftet und auf unter sich ähnlichen Lagerstätten? Weshalb kommen in den Drusen unserer alpinen Gesteine ganz bestimmte und gesetzmässig miteinander assoziierte Kristallarten vor? Warum tritt die Granit genannte Kombination Quarz, Orthoklas, natronreicher Plagioklas, Biotit unter Erfüllung grosser Räume so weitverbreitet auf?

Frühzeitig hat man die durch das letzte Beispiel demonstrierte Sonderstellung gewisser Mineralvergesellschaftungen erkannt und sie, die in wenig variabler Ausbildung auf grosse Erstreckungen hin vorkommen, somit in wesentlichem Masse am Aufbau der Erdrinde beteiligt sind, *Gesteine* genannt. Das Vorkommen einer Mineralassoziation als Gestein ist der Ausdruck dafür, dass es sich bei der betreffenden Mineralentstehung um Prozesse handelt, die im grossen Maßstabe in der Natur vor sich gehen können.

Studieren wir nun aber die gesteinsartigen und akzessorischen Mineralassoziationen eines geologisch (d. h. erdgeschichtlich) zusammengehörigen Gebietes (einer *geologischen Einheit*), so erkennen wir, dass sie selber wieder alle mit einander *verwandt* sind, dass nicht irgend ein Gestein neben einem andern auftritt, sondern dass *bestimmte Vergesellschaftungen* vorhanden sind. Dessen brauchen wir uns nicht zu verwundern. Wir sind ja gewohnt, in

den Mineralien etwas *Gewordenes* zu sehen, sie als das Produkt aller während der Bildungsperiode wirksamen Faktoren zu betrachten. Die physikalisch-chemischen Verhältnisse der verschiedenen Punkte einer geologischen Einheit müssen nun, das sagt ja schon der Name, in Abhängigkeit voneinander gestanden haben, und das allen Gemeinsame wird sich auch den Mineralbildungen aufgeprägt haben. Gibt uns das Studium der Verbandsverhältnisse in einer Mineralassoziation Aufschluss über die örtlich wirksamen Bedingungen, so versuchen wir anderseits die Beziehungen geologisch zusammengehöriger Mineralvergesellschaftungen zueinander auf physikalisch-chemische Abhängigkeiten zurückzuführen, die im Grossen wirksam waren, also auf das Ineinandergreifen der geologischen Kräfte und Stoffe. Es ordnet sich dem Begriff der Mineralassoziationen ein höherer Begriff, der der *Assoziationsprovinz*, über. Indem wir versuchen, ihm Inhalt zu verleihen, verlassen wir die engen Laboratoriums-räume, die der Mensch sich schafft, und treten in das grosse Laboratorium der Erde ein. Und sind wir im besonderen bestrebt, den Zusammenhang zwischen den Prozessen zu erkennen, die Gesteine erzeugten, so treiben wir im besten Sinne allgemeine Geologie auf mineralogisch-petrographischer Grundlage.

Die Gesteinsbildungsprozesse können wir in drei grosse Klassen sondern, die *magmatischen*, die *sedimentären* und die *metamorphen*. Liegt eine gegebene geologische Einheit unserer Untersuchung vor, so werden wir in erster Linie fragen, in welcher Beziehung die magmatischen Gesteinsbildungsprozesse unter sich stehen, die sedimentären unter sich und die metamorphen unter sich. Manche geologische Einheiten sind auch durch das Vorwalten eines der drei Prozesse gekennzeichnet. Magmatische, sedimentäre und metamorphe petrographische Provinzen lassen sich deshalb zunächst getrennt studieren.

Ich will versuchen, einige der allgemeinen Ergebnisse, zu denen das Studium der petrographischen Provinzen führt, zu formulieren und beginne mit den

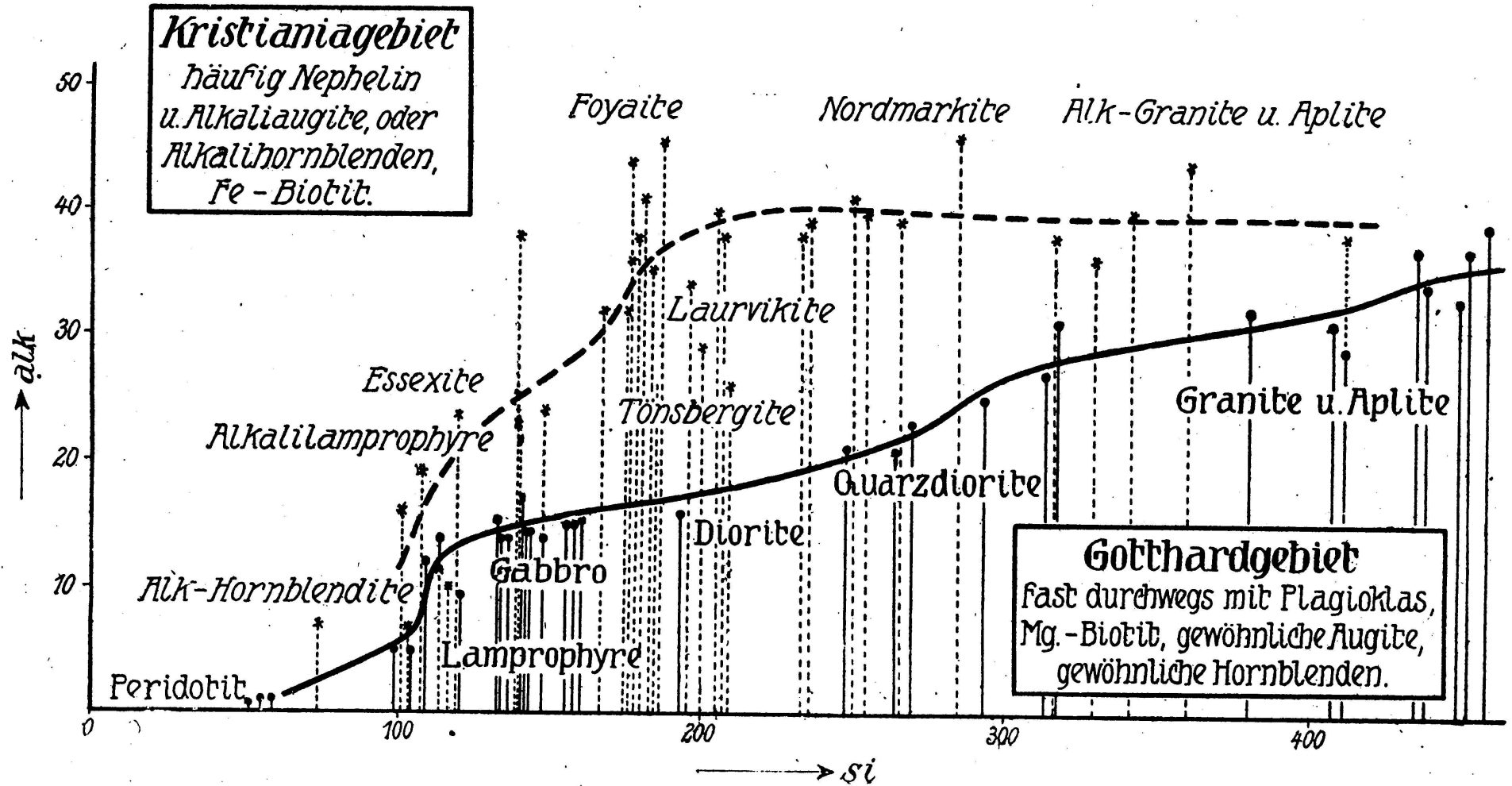
Magmatischen petrographischen Provinzen.

Magmen sind die aus dem Erdinnern stammenden, glutheissen Lösungen. Bei ihrer Erstarrung liefern sie die *magmatischen Gesteine* oder *Eruptivgesteine*. Betrachten wir nun die Eruptivgesteine eines im geologischen, erdgeschichtlichen Sinne zusammen-

gehörigen Gebietes, beispielsweise die prätriasischen Eruptivgesteine des heutigen Alpengebirges, so finden wir trotz des Vorkommens verschiedener Typen etwas allen Gesteinen Gemeinsames, das sie unterscheidet von solchen anderer Gebiete. Es gibt sich vor allem kund im Chemismus und im Mineralbestand.

Betrachten wir beispielsweise Fig. 1. Für die Gesteine des *Gotthardmassives* (Schweiz) und des *Kristianiagebietes* (Norwegen), die im Alter nicht sehr verschieden sind, wurden nach einer vom Vortragenden eingeführten Methode die Verhältniszahlen für SiO_2 und Alkalioxyde (*si* und *alk*) berechnet. Man sieht, wie die beiden Eruptivgesteinsprovinzen sich chemisch voneinander unterscheiden. Bei gleicher *si* Zahl sind die Werte für *alk* im Gotthardmassiv niedriger. Das hat zur Folge, dass an beiden Orten verschiedene Gesteinstypen auftreten, verschiedene Mineralassoziationen. Die wichtigsten sind dem Diagramm beigeschrieben. Beiderorts treten nicht nur einerlei Gesteine auf, sondern eine ganze Serie untereinander verwandter. Der SiO_2 -Gehalt ist besonders stark variabel. Je enger die Gesteine geologisch zusammengehören, umso inniger sind im allgemeinen auch die chemisch-mineralogischen, verwandtschaftlichen Beziehungen. Sehr oft können wir wahrnehmen, wie eine Mineralassoziation kontinuierlich in eine solche von anderem Charakter übergeht. Abänderungen dieser Art werden als verschiedene *Facies* bezeichnet. Da wir die Eruptivgesteine als die Kristallisationsprodukte der magmatischen Lösungen ansehen, zeigt sich somit, dass in ein und demselben Magmaherde stoffliche Verschiedenheiten auftreten können. Nun sind alle der Beobachtung zugänglichen, unveränderten, magmatischen Gesteine in einer Zeit der Nachaussenbewegung des Magmas entstanden. Wenn wir auch anzunehmen haben, dass im Erdinnern eine allgemeine Region des glutflüssigen (magmatischen) Zustandes vorhanden ist, so erhalten wir doch über sie direkt keine Auskunft. Erst wenn das Magma in die äussere Erdzone intrudiert oder gar unter Durchbrechung der Erdrinde an deren Oberfläche extrudiert, erzeugt es Gesteine, die unmittelbar oder im Verlauf weiterer geologischer Vorgänge (wie Gebirgsbildung und Erosion) unserem Studium zugänglich werden. Wandert Magma von innen nach aussen, so gelangt es in *kältere Regionen* und muss deshalb der Kristallisation anheimfallen. Wenn wir nun ständig beobachten, dass ein nach aussen wandernder Magmaherd nicht nur einerlei, sondern stofflich ver-

Fig. 1.



schiedene Gesteine liefert, so ergibt sich ein *ursächlicher Zusammenhang* zwischen *Magmenaufwärtsbewegung*, *Abkühlung*, *Differentiation* und *Kristallisation*. Diesem Zusammenhang soll zunächst nachgegangen werden.

Das Magma stellt eine Lösung von eigenartiger Konstitution dar. Seine Hauptmolekelarten sind Silikate, also Bestandteile von relativ hohem Schmelzpunkt (meist um und über 1000°) und an sich geringem Dampfdruck. Es sind schwerflüchtige bis refraktäre Substanzen. Aber jedes Magma enthält auch physikalisch-chemisch sich ganz anders verhaltende Substanzen. Fließt wie bei den vulkanischen Eruptionen Magma an der Erdoberfläche aus, so gibt es Gase und Dämpfe ab, die sogenannten *Exhalationen*, die ja die Eruption zur Explosion machen können. Es sind also im Magma leichtflüchtige Stoffe gelöst, die ihm einen hohen Dampfdruck verleihen, und die viskositätsvermindernd wirken. Ausserdem bilden diese „Mineralisatoren“ genannten Stoffe häufig mit den übrigen Molekeln leichtbewegliche, komplexe Ionen.

Chemisch dürfen oder müssen wir sogar annehmen, dass zu Beginn alle intrusionsfähigen Magmen einander sehr ähnlich sind, wenn vielleicht auch bereits hier ein Unterschied nach der Tiefe vorhanden ist. Es gibt eine Reihe von Beobachtungstatsachen, die es wahrscheinlich machen, dass die Magmen in einem Stadium beginnender Aktivität eine ungefähr gabbroide (bis alkaligabbroide) Zusammensetzung besitzen. Erst im Verlauf des Gestaltungsprozesses, der mit der Gesteinsbildung einen ersten Abschluss bekommt, entstehen aus diesen mehr oder weniger einheitlichen Schmelzlösungen differente Gesteine. *Das ist die sogenannte magmatische Differentiation*. Wie kann nun aus einer mehr oder weniger homogenen, flüssigen Masse Verschiedenartiges entstehen, beispielsweise aus dem gotthardmassivischen Magmaherd: Granit, Diorit, Peridotit. Die physikalische Chemie kennt einen Fall, wo solches möglich ist, ohne dass an Inhomogenität des äusseren Feldes gedacht werden muss. Es ist das die *Entmischung* einer Flüssigkeit in zwei oder mehr Flüssigkeiten verschiedener Zusammensetzung. Sowohl die experimentellen Untersuchungen als auch die Beobachtungen des Zusammenvorkommens und des Ineinanderübergehens der verschiedenen Gesteinsarten zeigen uns, dass derartigen Phänomenen für die magmatische Differentiation nur eine sehr untergeordnete Bedeutung zukommen kann. *Vogt* hat gezeigt, dass die Schwermetallsulfide, insbesondere

FeS , im flüssigen Zustande sich von Silikatschmelzen trennen können. Das wird der einzige, hierhergehörige, wesentliche Fall sein. Die Entmischung ist ein Vorgang, der bei bestimmten Temperaturen und Drucken beginnen kann, wobei im Ganzen alle Teile den gleichen Bedingungen unterworfen sind. Es ist der einzige Fall, der dadurch ausgezeichnet ist, dass unter homogenen Verhältnissen aus einer homogenen Flüssigkeit verschiedenartig zusammengesetzte Flüssigkeiten entstehen. Wie sollen wir uns die

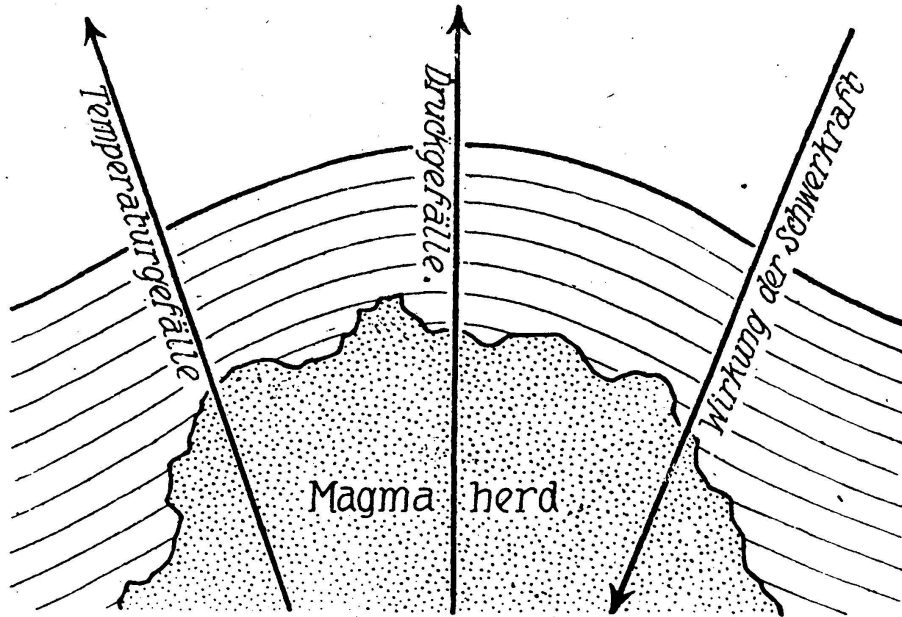


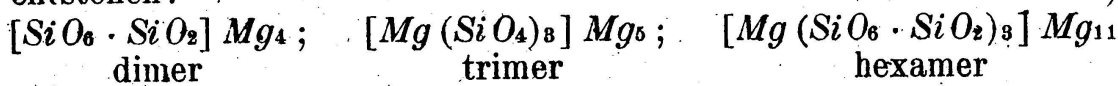
Fig. 2.

magmatische Differentiation vorstellen, wenn er bei der Deutung nicht in Frage kommt? Ist etwa die Grundvoraussetzung der einheitlich gleichen Bedingungen für den ganzen Magmaherd nicht richtig?

In der Tat, es lässt sich leicht einsehen, dass die einzelnen Teile eines grossen Magmaherdes niemals den gleichen Bedingungen unterworfen sein können, das *äussere Feld*, das *Feld der physikalischen Bedingungen*, ist inhomogen. Im Verlauf der Aktivitätsperiode ändern sich die Bedingungen in einer bestimmten Richtung als Ganzes, sie ändern sich aber auch relativ zueinander von Ort zu Ort. Drei Faktoren sind es vor allem, die gerichtet sein müssen, *Temperatur*, *Druckgefälle* und *Gravitation*. In ihrer nie zu trennenden Kombination werden sie notwendig eine Differentiation auslösen. Normalerweise werden sie in einem Magmaherd ungefähr einander parallel gerichtet sein. Temperatur und Druckgefälle gehen nach aussen, die Schwerkraft wirkt gleichfalls

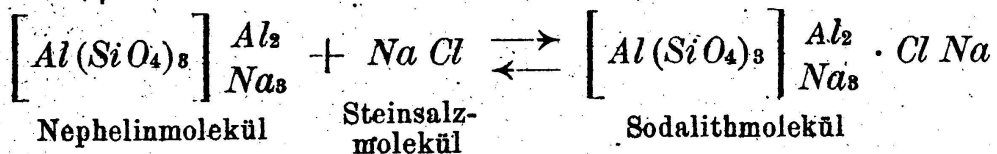
in radialer Richtung (Fig. 2). Das wird zur Folge haben, dass, allgemein gesprochen, gegen aussen hin andere physikalische Bedingungen vorhanden sind als gegen innen. Nun müssen wir uns das Magma, wie jede Lösung, als ein homogenes Gemisch verschiedener Molekelarten vorstellen, die unter gegebenen Bedingungen ein dynamisches Gleichgewicht bilden, so dass dann die Konzentration an jeder Molekelart bestimmt ist.

Polymerisationen, SiO_2 -Anlagerungen und Doppelsalzbildungen sind neben elektrolytischer Dissoziation besonders wichtige im Magma sich abspielende Prozesse. Betrachten wir etwa $[SiO_4]Mg_2$, so können daraus unter Berücksichtigung der von Jakob auf die Silikatchemie angewandten Koordinationslehre durch Polymerisation entstehen:

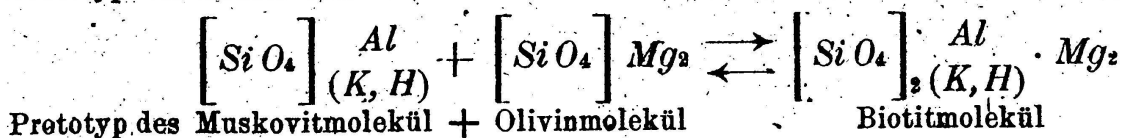
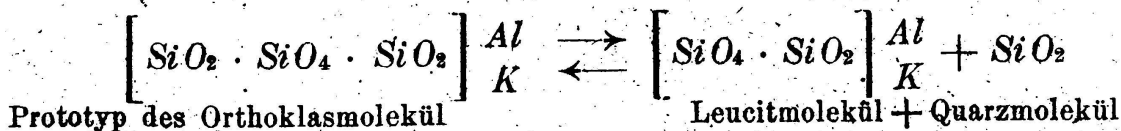
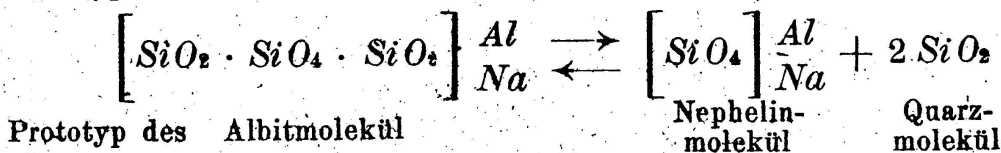
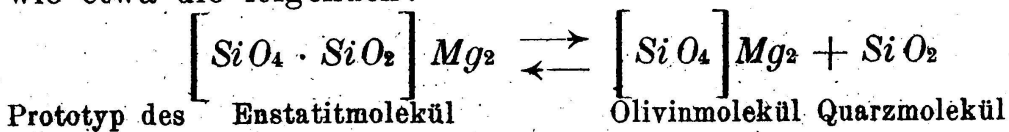


Andererseits vermögen $[SiO_4]AlK$ und SiO_2 miteinander Anlagerungsverbindungen zu bilden, wie etwa $[SiO_4 \cdot SiO_2]AlK$ und $[SiO_2 \cdot SiO_4 \cdot SiO_2]AlK$. Und was für die einfachen Molekeltypen gilt, ist auch für ihre Polymeren möglich.

Schliesslich sind Doppelsalze von Silikaten + Silikaten oder Silikaten und Nichtsilikaten möglich. So reagieren etwa Nephelinmolekül + Steinsalzmolekül unter Bildung von Sodalithmolekül.



Sehen wir von der Polymerisation ab, so zeigen uns Reaktionen, wie etwa die folgenden:



wie bei gleichem Bauschalchemismus die molekulare Verteilung eine andere sein kann. Linke und rechte Seite einer Reaktionsgleichung besitzen ja gleichen Chemismus und die Aufspaltung oder Doppelsalzbildung kann nach rechts hin zu ganz verschiedenen Prozentsätzen erfolgt sein.

Bei gleicher chemischer Bauschalzusammensetzung ist die molekulare Verteilung, das heisst der Grad der Assoziationen und Dissoziationen, eine Funktion der äusseren Bedingungen.

In den andere physikalische Bedingungen besitzenden Teilen herrschen daher notwendigerweise auch andere Zustände in bezug auf die molekulare Verteilung. Einer bestimmten Komponente kommt eine andere thermodynamische Potentialgrösse (ein anderer osmotischer Druck) zu, wenn die drei physikalischen Faktoren andere sind. Es stehen jedoch innerhalb eines Magmaherdes alle Teile miteinander in Verbindung, die Potentialgefälle suchen sich auszugleichen. Das ist nur möglich durch selektive Diffusionswanderungen, die eine chemische Differenzierung zur Folge haben und zu einem sogenannten stationären Gleichgewicht tendieren.

Ist beispielsweise das Molekül $[SiO_4 \cdot SiO_2 \cdot SiO_2]_{Alk}^{Al}$ an einer Stelle zu 50 % in $[SiO_4 \cdot SiO_2]_{Alk}^{Al} + SiO_2$ gespalten, an einer anderen Stelle nur zu 5 %, so wird SiO_2 nach dieser letzteren Stelle hinwandern können, wodurch natürlich eine Verschiebung des Bauschalchemismus beider Teile entsteht.

Was jedoch das Quantitative derartiger durch Temperatur-, Druck- oder Gravitationsgefälle erzeugter Konzentrationsänderungen in einer flüssigen Phase betrifft, so haben Untersuchungen an Schmelzen und wässrigen Lösungen gezeigt, dass es im allgemeinen geringfügiger Art ist. In direkter Übertragung auf magmatische Vorgänge würde es niemals die grossen Verschiedenheiten zusammengehöriger magmatischer Gesteine erklären können. Hier müssen zwei Dinge in Berücksichtigung gezogen werden, die beide letzten Endes auf eine Phasentrennung hinauslaufen, auf eine Umbildung des homogenen in ein heterogenes System. Es sind die Wanderungstendenz der leichtflüchtigen Bestandteile (*Destillationstendenz*) und die *Kristallisation*. Beides sind ebenfalls Folgen der allgemeinen Bedingungsänderungen beim Nachaussenwandern der Magmen. Die leichtflüchtigen Bestandteile werden nach den

Stellen geringsten Druckes strömen, wo sie, wenn möglich abdestillieren. Sie werden eine gewisse Art von Konvektionsströmung in Gang halten. Sie und ihre Verbindungen sind leichter beweglich und Bedingungsänderungen gegenüber empfindlicher als die anderen Molekelarten; von ihrer Konzentration ist aber die einer jeden Molekelart abhängig.

Noch bedeutender ist wohl der Einfluss, den das *Gravitationsfeld* erlangt, sobald das Magma im Verlaufe des allgemeinen Abkühlungsprozesses ins *Kristallisationsstadium* eintritt. Während der grossen geologischen Zeitabschnitte (für eine erhebliche Differentiation sind immer lange Zeiten erforderlich), wird eine Sonderung nach dem spezifischen Gewicht der nach und nach sich ausscheidenden Kristalle möglich sein. Die Richtung der dadurch ausgelösten Differentiation wird naturgemäss in wesentlichem Masse durch die Ausscheidungsfolge der Mineralien bestimmt. In einem, allgemein gesprochen, gabbroiden Magma sind femische Mineralien und basische Plagioklase wohl meistens Erstausscheidlinge. Indem sie der Schmelze entzogen werden, zu Boden sinken, ändert diese sich in der Richtung zum granitischen Pol hin, sie wird relativ reicher an SiO_2 und Alkalien. Sie kann nun in verschiedenen Stadien der Saigerung nach aussen abwandern. Wir dürfen uns den Differentiationsprozess jedoch nicht einfach als gravitative Kristallsonderung vorstellen etwa in der Weise, dass gewisse Gesteine ständig Restschmelzerstarrungen, andere Kristallagglomerate darstellen. Dafür sprechen weder Beobachtung noch gründliche Überlegung.

Sinkende Kriställchen, und die genannten Erstausscheidungen werden im allgemeinen sinken müssen, wandern dem Temperaturgefälle entgegen, werden also sicherlich zum Teil wieder resorbiert, das heisst aufgelöst. Die inneren Partien haben ja die zugehörige Ausscheidungstemperatur noch nicht erlangt. Jedoch wenn sie auch wieder verflüssigt sind, können die entstandenen Molekelarten nicht mehr zum Ausgleich nach oben wandern, denn täten sie das, so würden sie dort wieder ausgeschieden, sie müssten wieder fallen. Auch hier ist nur möglich, dass Ausgleichswanderungen, die zu einem stationären Zustand führen wollen, in *anderem Sinne* stattfinden. Wir dürfen uns im Grenzfall den Vorgang ganz in der flüssigen Phase sich abspielend denken, und wiederum sind es die inneren chemischen Gleichgewichte, die

letzten Endes die resultierende Verteilung bedingen. Die Kristalle sind in gewissem Sinne nur die Vehikel, die den Sonderungsprozess einleiten und ständig in Fluss halten. Sehen wir so im Grossen die Bedingtheit der magmatischen Differentiation und die Notwendigkeit ihrer Verknüpfung mit der Intrusion, Abkühlung und Kristallisation ein, so sind wir auch überzeugt, dass im Einzelnen eine grosse Mannigfaltigkeit, entsprechend der Mannigfaltigkeit der physikalischen Bedingungen resultieren muss. In der Tat, es gibt nicht zwei magmatische petrographische Provinzen, die in allen Einzelheiten miteinander übereinstimmen. Dennoch heben sich, wenn man die petrographischen Provinzen vom chemischen und mineralogischen Gesichtspunkte aus studiert, gewisse ähnliche Tendenzen und ähnliche Vergesellschaftungen analoger Gesteinstypen heraus. Das meist Gemeinsame entspricht:

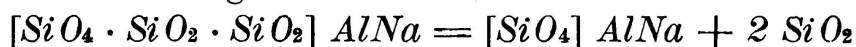
1. Dem einseitig Gerichteten eines magmatischen Gestaltungsprozesses. (Intrusion → Abkühlung → Kristallisation.)
2. Einem Vorherrschen gewisser Gleichgewichtsverhältnisse unter ungefähr gleichen Bedingungen.

Das erste hat zur Folge, dass wir zumeist zu einem Stamm-Magma gehörige Gesteine von leukokratem bis melanokratem Charakter vorfinden. Das Zweite ermöglicht uns, gewisse Hauptvergesellschaftungen als Hauptreihentypen herauszugreifen und eine mehr oder weniger natürliche Klassifikation der magmatischen Gesteine aufzubauen.

Will man die erste Sonderung nicht zu weit treiben, so ist eine Zusammenfassung in drei Reihen möglich, die öfters ziemlich reine und selbständige Provinzen bilden.

Es sind 1. die *Kalkalkalireihe* oder die *granitisch-dioritische Reihe*. 2. die *Natronreihe* oder *foyaitisch-théralithische Reihe*. 3. die *Kalireihe* oder *monzonitisch-shonkinitische Reihe*. Die Unterschiede zwischen diesen drei Reihen werden uns verständlich auf Grund verschiedener Gleichgewichtsverhältnisse, entsprechend verschiedenen physikalischen Bedingungen, wobei vorläufig dahingestellt bleiben möge, ob nicht kleinere stoffliche Unterschiede von Anbeginn an der Differentiation eine bestimmte Richtung aufprägen können. Provinzen von vorwiegendem oder alleinigem Typus der Kalk-Alkalireihe sind am verbreitetsten und ausgedehntesten. Gabbroide-dioritische und gewöhnlich granitische Gesteine sind in Erguss- oder Tiefengesteinsfacies die wichtigsten charakterisierenden

Minerallagerstätten. Die Einheitlichkeit gibt sich auch im Mineralbestand kund. Feldspate, gewöhnliche Augite, Orthaugite, gewöhnliche Hornblenden, Biotit, \pm Quarz oder \pm Olivin sind die Hauptgemengteile. Der Feldspat kann in kieselsäurereichen Gesteinen zu einem grossen Teil Kalifeldspat sein, im übrigen herrscht Plagioklas vor, der mit abnehmendem basischem Kieselsäuregehalt anorthitreicher wird. Nephelin, Leucit, Analcim, Sodalith, Hauyn, Melilith, Alkaliaugite und Alkalihornblenden fehlen. Die Molekeltypen der ersteren dieser fehlenden Mineralien sind in gewissem Sinne Entsilizierungsprodukte der Feldspatmolekeln, beispielsweise gemäss der Gleichung



Albit (Natronfeldspatmolekel) Nephelin Quarz

Kristallisieren diese Feldspatvertreter genannten Mineralien nie aus, so bedeutet das, dass während des ganzen Verlaufes des Differentiationsprozesses derartige Gleichgewichte nach links verschoben waren, so dass durch SiO_2 -Abgabe entstehende freie Alkalialumosilikat-Molekeln in zu geringer Konzentration vorkamen. Es muss also häufig realisierbare Bedingungen geben, bei denen dies der Fall ist. Im übrigen erklärt die Kristallisationsdifferentiation, worauf besonders *Bowen* hingewiesen hat, den Hauptdifferentiationsverlauf gut. Denken wir uns ein gabbroides Magma nach aussen wandernd und der Kristallisation anheimfallend. Durch Abwanderung von erst ausscheidendem Olivin wird es relativ kieselsäurereicher und, da Olivin *Fe-Mg*-Silikat ist, relativ *Ca*-reicher. Der zunächst sich ausscheidende Plagioklas muss, das geht aus physikalisch-chemischen Experimenten hervor, anorthitreicher sein als alle später folgenden, so dass schliesslich sich auch Alkalien im Reste anreichern. In Kombination mit Gegenwanderung von SiO_2 und eventuell *KAl*-Silikat können so dioritische, quarzdioritische bis granitische Oberschichten zurückbleiben. Je grösser ein Magmaherd ist, umso langsamer verläuft die Abkühlung, umso vollständiger die Differentiation, die letzten Endes zum Granit führt. Deshalb sind die sichtbar gewordenen Teile der grossen Massive und Stöcke in der Hauptsache von granitischer Zusammensetzung. Das mehr oder weniger ursprüngliche Magma konnte nur in kleineren Vorkommnissen ohne Differentiation zu Gabbro erstarren. Derartige Kleinintrusionen oder Extrusionen sind dann auch meist älter als die des erst später entstandenen granitischen

Schaumes. Die Veränderung des vorwiegend gabbroid-basaltischen Magmas in eine mächtige Aussenschicht von granitischer Zusammensetzung ist also der normale Verlauf einer Periode magmatischer Aktivität. Mit der Erstarrung des granitischen Magmas und den begleitenden pneumatolytisch-hydrothermalen Prozessen schliesst im Grossen ein derartiger magmatischer Zyklus ab. So finden wir beispielsweise die ersten Anfänge der hercynischen Faltung der Alpen und der nachtriasischen tertiären Faltung begleitet von gabbroiden Intrusionen bis Extrusionen. Der Hauptabschluss beider Faltungsperioden ist durch die Erstarrung und Intrusion granitischer Magmen gekennzeichnet. Eine letzte Restlauge, reich an leichtflüchtigen Bestandteilen, lieferte aplitgranitisch-pegmatitische Gesteine, währenddem die durch Kristallisationsdifferentiation und Wiederverflüssigung entstandenen basischen Unterschichten die lamprophyrischen Gangnachschiebe erzeugten. Manchmal in vulkanischen Provinzen können zum Schluss tiefstgelegene primäre (oder regenerierte) basaltische Magmen nachdringen. Mehr oder weniger monomineralische Gesteine wie Anorthosit, Peridotit, Pyroxenit sind teils lokale Schlierenbildungen, teils nur partiell resorbierte Kristallagglomeratbildungen. Randfacies sind durch die örtlich abweichenden Verhältnisse bedingt, wobei oft die Kombination einer Anzahl Faktoren dem gravitativen Sonderungsbestreben entgegenarbeiten kann. Kleinere Unterschiede in der ursprünglichen Zusammensetzung, oder Veränderung dieser ursprünglichen Zusammensetzung durch Aufschmelzung, sowie verschiedener Verlauf des Intrusions- und Abkühlungszyklus, dann aber auch verschiedener Gehalt an leichtflüchtigen Bestandteilen, sind für die Variabilität innerhalb des Sammeltypus der Kalk-Alkalireihe verantwortlich zu machen. Sie bedingen den provinziellen Eigencharakter jeder derartigen geologischen Einheit. Allgemein nennt man Provinzen von vorwiegenden Kalk-Alkaligesteinen *pazifische* Provinzen.

Nicht immer spielen die Entsilizierungsgleichgewichte der Alkalialumosilikate eine so untergeordnete Rolle wie in dieser Reihe. Unter anderen physikalisch-chemischen Bedingungen können die S. 129 erwähnten Gleichgewichte stark nach rechts verschoben sein. Trifft dies im besondern für die *Na*-Alumosilikate zu, so entstehen die Vergesellschaftungen der *Natronreihe*. Jetzt werden die Konzentrationen an Nephelin-, Analcim-, Cancrinit-, Sodalith-, Hauyn-, Nosean-, Melilith-Molekülen so gross werden können, dass derartige

Mineralien auskristallisieren und durch Differentiationswanderungen an ihnen reiche Gesteine entstehen. Niedriger basischer SiO_2 -Gehalt braucht nun nicht mehr mit einem Anwachsen des Plagioklasses und der sogenannten femischen Gemengteile (Augit, Hornblende, Biotit, Olivin) in ursächlicher Beziehung zu stehen. Auch Gesteine mit Feldspatvertretern statt Feldspat sind relativ arm an SiO_2 . Eine allgemein kleinere Differenz Al_2O_3 -Alkalien ist in den Differentiationsprodukten erkennbar. Da sich nun auch in merklichen Mengen Na-Ferrisilikate (z. B. Aegirin) bilden, kann molekular die Summe der Alkalien sogar grösser sein als die Tonerde. Alkaliaugite und Alkalihornblenden sind typische Mineralien geworden.

Theralithe, Essexite, Nephelin-(Elaeolith)-syenite (Foyaite), Alkaligranite sind die hauptsächlichsten Tiefengesteine derartiger Vergesellschaftungen. Währenddem beispielsweise im Faltungsrayon der Alpen zur Tertiärzeit quarzdioritische-granitische Magmen der Kalk-Alkalireihe empordrangen, wurden die im nördlichen Vorlande (Hegau, Rheintalgraben) gebildeten Vulkane von Magmen der Natronreihe gespeist. Diese Ergussgesteine gehören einer sogenannten *atlantischen Provinz* an.

Eine dritte häufige Vergesellschaftung magmatischer Gesteine ist durch allgemein grösseren Kalireichtum unter den Alkalien gekennzeichnet. Es bilden sich dann auch Kalialumosilikate mit niedrigerem SiO_2 -Gehalt, als ihn Orthoklas hat, beispielsweise Leucit. Aber eines dieser Dissoziationsprodukte vermag bei Anwesenheit von H_2O mit Molekeln von olivinartiger Zusammensetzung ein Doppelsalz, nämlich den Biotit, zu geben, der fast unter allen Bedingungen, insbesondere auch unter den Bedingungen, die für die Kalk-Alkalireihe charakteristisch sind, auftritt. Die Vergesellschaftung ist deshalb nicht so scharf von der zuerstgenannten zu trennen, steht mit ihr auch oft in genetischem Zusammenhang. Übrigens ist selbstverständlich, dass alle drei Reihen wie einzelne Glieder aller drei Reihen ineinander übergehen können, wenn temporal oder lateral während einer Periode magmatischer Aktivität die äusseren Bedingungen diesbezüglichen Wechsels unterworfen waren. Die Hervorhebung der drei Assoziationen soll lediglich drei Haupttendenzen magmatischer Differentiation auseinanderhalten. Die syenitischen-monzonitischen-shonkinitischen Magmen sind Hauptderivate der dritten Reihe. Eine ausgesprochene Provinz von diesem

Charakter ist die jungvulkanische, mittelitalienische mit dem Vesuv als heute noch tätigem Vulkan. Provinzen dieser Art nennt man daher zweckmässig *mediterrän*.

Nach unseren Erläuterungen ist also ausschlaggebend für die Entwicklung der einen oder anderen magmatischen Provinz der Verlauf der innermagmatischen Gleichgewichte. Dieser ist aber eine Folge der physikalisch-geologischen Bedingungen. Und es erhebt sich die Frage, ob wir zur Zeit bereits einen engeren Zusammenhang feststellen können.

Die Magmabewegung ist nur eine der allgemeinen tektonischen Erscheinungen. Die Frage wird daher zu der, ob mit gewissen geotektonischen Erscheinungsbildern gewisse Differentiationsverläufe Hand in Hand gehen. Ohne das ganze erst jetzt in statistischer Bearbeitung befindliche Material erwähnen zu können, ist eine Antwort daraufhin nicht zu geben. Immerhin mag daran erinnert werden, dass Beziehungen dieser Art vorhanden sind. Es zeigt sich das schon darin, dass der einfache Differentiationsverlauf der Kalk - Alkalireihe häufig mit einer langandauernden Faltenbewegung in einer typischen Geosynklinalregion zusammenfällt, wobei Tendenzen, die zur 3. Reihe führen, besonders gegen das Ende hin auftreten. Andererseits sind viele atlantische Provinzen in Gebieten mehr oder weniger reiner Schollenbewegungen heimisch, also hauptsächlich in den Vorländern der aktiven Geosynklinalregionen. Eine grosse Rolle wird ausser der Stetigkeit der tektonischen Bewegungen die Tiefe spielen, in der sich die Magmaherde während der Abkühlung und Kristallisation befinden. Nicht ausser Acht darf gelassen werden, dass auch Assimilationsprozesse richtunggebend sein können. Das Magma wird insbesondere anfänglich im Stande sein, Nebengesteine, mit denen es in Berührung kommt, teilweise aufzuschmelzen. Es kann, wie besonders *Daly* betont, sein hangendes Dach zerstückeln und sich so einen Weg nach oben bahnen. Die losgesprengten Gesteinsstücke werden aber grösstenteils in die Tiefe sinken und hier Material an die flüssige Masse abgeben. Sicherlich ist die Differentiation eines aktiven Magmas nicht an Assimilation gebunden, die Differentiation ist eine notwendige Begleiterscheinung empordringenden, in zentrifugalem Bewegungszustand befindlichen Magmas, aber das bedeutet nun wieder nicht, dass Assimilationen nicht mitbestimmend und richtunggebend sein können. Fassen wir zusammen: Die magmatische

Differentiation, somit auch die Art und Entstehung magmatischer Gesteinsassoziationen, sind durch die physikalisch-chemischen Umstände bedingt, denen jedes geotektonisch aktivierte Magma unterworfen ist. Der Wechsel der Bedingungen in absolutem und relativem Sinne schafft aus einem ursprünglich mehr oder weniger einheitlichen Stamm-Magma eine Serie miteinander verwandter Gesteine.

Die Verwandtschaft der Gesteine einer magmatischen Provinz ist also eine Blutsverwandtschaft, die Differentiation eine durch äussere Umstände bedingte Sonderung.

Die magmatischen Provinzen sind jedoch nicht nur *Gesteinsprovinzen* im engeren Sinne. Die Anwesenheit der leichtflüchtigen Stoffe bedingt auch *nicht-gesteinsartige*, akzessorische Mineral-lagerstätten, besonders *Erzlagerstätten*. Sie entstehen zu einem grossen Teil durch die sogenannten pneumatolytisch-hydrothermalen Begleiterscheinungen, die zu jeder Periode magmatischer Aktivität gehören, und besitzen ebenfalls provinziale Kennzeichen.

Sedimentäre petrographische Provinzen.

Das Phänomen der provinzialen Verwandtschaft von Gesteinen beschränkt sich fernerhin nicht auf Eruptivgesteine. Eher noch offensichtlicher tritt es bei den *Sedimenten* zu Tage. Hier sind ja die Begriffe der Facies, der Gesteinsübergänge aufgestellt worden. Wenn ich das Wort schweizerische „Molasse“ ausspreche, so wird allen unter uns, die im schweizerischen Mittelland je auf den Felsuntergrund geachtet haben, eine ganze Anzahl verschiedener Gesteinstypen (bunte Mergel, mergelige Sandsteine, Sandsteine, Kalksandsteine, Muschelsandsteine, Süsswasserkalke, Arkosen, Nagelfluh) in Erinnerung gerufen, und doch bleibt uns die Vorstellung einer Einheit, und doch besitzt der Begriff Molasse eine nur ihm eigene Färbung. In der Tat, diese zwischen Jura und Alpen liegenden Molasseablagerungen bilden eine typische petrographische Provinz, alle Gesteine dieser Provinz sind untereinander nahe verwandt. Allen kommen gewisse Merkmale zu, die in dieser Art nur ihnen zukommen. Wir müssen daher ganz allgemein auch bei sedimentären Provinzen zwischen Merkmalen von *provinzialem* und *serialem* Charakter unterscheiden. Wir nennen sie *provinzial*, wenn sie allen sedimentären Ablagerungen der geologischen Einheit, welche letztere in engerem oder weiterem Sinne gewählt werden

kann, eigentümlich sind, so dass sie diese Ablagerungen von anderen unterscheiden. *Serial* sind diejenigen, die von Ort zu Ort innerhalb der Provinz wechseln, so dass Gesteinsserien entstehen. Eine Eigenschaft von grossem provinzialem Geltungsbereich für triasische Ablagerungen ist beispielsweise, dass diese Ablagerungen auf der Grenze zwischen mechanisch sedimentär und chemisch präcipitativ stehen, so dass Anhydrit bzw. Gipsgesteine oder gar Kalisalzparagenesen häufig sind. Damit steht wiederum im Zusammenhang, dass unter den Karbonatgesteinen Dolomit eine grosse Rolle spielt. Eine Ablagerung wie Gault der Kreide ist weit herum in

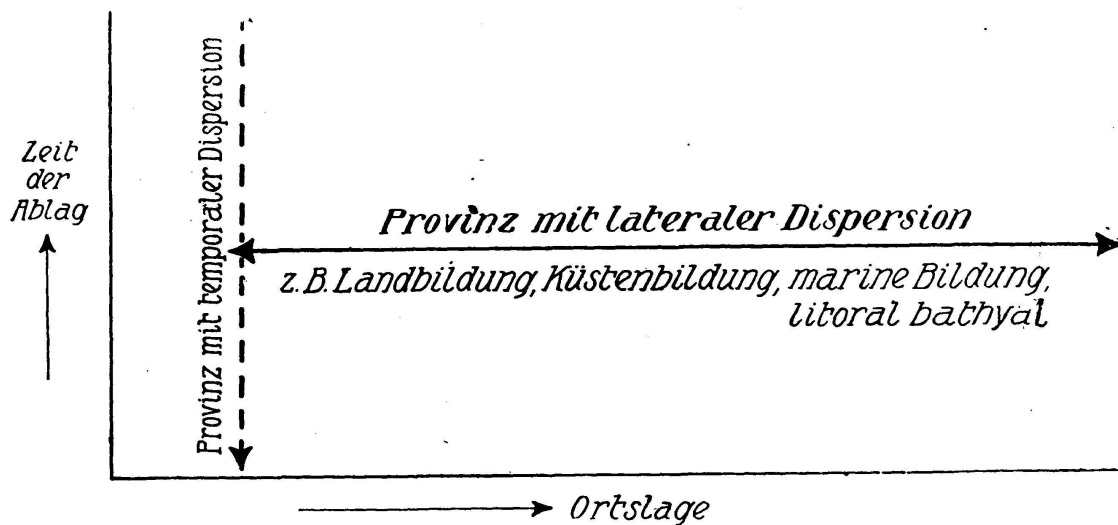


Fig. 3.

Europa reich an Glaukonit usw. Es ist offensichtlich, dass wir derartige Eigentümlichkeiten zurückführen müssen auf allgemeine Bedingungen, die, geologisch gesprochen, der Zeit der betreffenden Ablagerungen den Charakter gegeben haben. Sie sind eine Folge des jeweiligen gerade erreichten Entwicklungsstadiums der Erde, sehr oft auch eine Folge bestimmter Klimate.

Die serialen Eigenschaften zerfallen, wie übrigens auch bei den magmatischen Provinzen, in solche von *lateraler* und *temporaler Richtung* (Fig. 3). Wir können die Veränderung des Gesteinscharakters, die Facienübergänge und Facienfolgen zur gleichen Zeit in ihrer Abhängigkeit von der Ortslage verfolgen, wir können aber auch untersuchen, wie sich der Gesteinscharakter an einem Orte im Laufe der Zeiten verändert hat. Die erstgenannte Veränderung ist die Folge örtlich verschiedener physikalisch-chemischer Bedingungen, die zweite des Wechsels dieser physika-

lisch-chemischen Bedingungen mit der Zeit. Die räumliche oder zeitliche Ausdehnung einer Provinz wird als ihre laterale oder temporale Streuung, beziehungsweise *Dispersion*, bezeichnet.

Wie die Untersuchung der magmatischen Provinzen führt uns auch die Untersuchung der sedimentären Provinzen auf die Grundprobleme der Geologie. Das Studium der magmatischen Provinzen wird uns letzten Endes gestatten, die Tiefenvorgänge geologischen Geschehens schärfer zu fassen, das Studium der sedimentären Provinzen die Oberflächenvorgänge. Und weil die sedimentären Gesteine Erdoberflächengesteine sind, müssen zwei neue Wissenschaften in Betracht gezogen werden, nämlich die *Geographie* bzw. *Palaeogeographie*, die sich mit der Morphologie der Erdoberfläche befasst, und die *Biologie*, die von den unter gewissen Bedingungen darauf vorkommenden Lebensgemeinschaften handelt.

Was die Gestalt der Erdoberfläche betrifft, so ist selbstverständlich, dass von ihr Art und Charakter einer Ablagerung in weitgehendem Masse abhängig sind, es braucht ja nur daran erinnert zu werden, dass man zwischen fluviatilen, lacustren, marinen Sedimenten, zwischen küstennahen (litoralen-neritischen) und küstenfernen (bathyalen oder hemi-bis eupelagischen) Ablagerungen unterscheidet. Es ist jedoch nicht nur die Gestalt der Erdoberfläche an der Ablagerungsstelle, die eine Rolle spielt, sondern die Morphologie des ganzen Einzugsgebietes, das für die Materiallieferung in Betracht kommt. Die Biologie spielt eine Doppelrolle. Einmal gibt es viele Gesteine mit wesentlich organogenem Einschlag. Es sei an die Kreide, an Tripel, an Echinodermenbreccien, an Kohle erinnert. Zum andern kann uns auch das Studium eines akzessorischen Fossilgehaltes Auskunft über die während der Ablagerung herrschenden Bedingungen geben, weil eben gewisse Lebensgemeinschaften an gewisse Bedingungen geknüpft sind. Die Palaeobiologie (nicht die Palaeontologie) ist eine wichtige Hilfswissenschaft für den Sedimentpetrographen.

Aber auch diese morphologischen und klimatischen Erscheinungen sind nur das nach aussen gewendete Antlitz des Erdkörpers, das widerspiegelt, was in seinem Innern vorgeht. Sie sind die Folgen von Prozessen der Veränderung, die im weiten Sinne des Wortes immer geotektonischer Art sind. Und es ist, wenn wir etwa die marinen Ablagerungen betrachten, selbstverständlich, dass das geotektonisch bedingte Verhältnis von Land zu Meer, von Meeresboden-

morphologie zur Landoberfläche in erster Linie den Provinzialcharakter bestimmt. Also wie bei den magmatischen Provinzen, werden auch hier gewisse physikalische Bedingungen an das eine oder andere geotektonische Erscheinungsbild gebunden sein, und es erhebt sich lediglich die Frage, ob die heutige Klassifikation der tektonischen Phänomene genügt, um charakteristischen sedimentpetrographischen Provinzen einzelne Typen zuzuordnen. Man nennt seit *Gilbert* die mit Faltengebirgsbildung verknüpften Bewegungen, die für die labilen Zonen der Erdkruste, die Geosynklinalen, besonders charakteristisch sind, *orogenetisch*, während die einfachen meist an Brüche gebundenen Auf- und Abwärtsbewegungen *epirogenetisch* genannt werden. In einem Geosynklinalgebiet werden, worauf ja *Bertrand* besonders hingewiesen hat, die Sedimentationsverhältnisse andere sein müssen als in einem nur unter Epirogenese stehenden Epikontinentalmeer.

Das klastische Material stammt dann vom werdenden Gebirge. Die ständige Faltung des Einzugsgebietes, die ständige Bewegung des Meeresbodens lässt in den Ablagerungen keine deutliche, vertikale, zyklische Gliederung aufkommen. Mächtige Sedimente von mehr oder weniger einheitlichem Gepräge werden gebildet. Das klastische Material der *epirogenen Sedimentation* stammt von einem wenigstens zunächst relativ starren Kontinentalblock, der weniger kontinuierlichen als diskontinuierlichen Bewegungen (Hebungen und Senkungen) ausgesetzt ist. Deshalb sind diese Sedimente meist in vertikaler Richtung (d. h. temporal) zyklisch gegliedert.

Auf eine *Transgressionsphase* (Aufarbeitung des Untergrundes, Ablagerung mehr toniger Sedimente) folgt eine *Inundationsphase* (mit Ablagerung von Sedimenten, die für tiefern Meeresgrund typisch sind, d. h. Mergeln und Kalken). In vielen Fällen löst eine *Regressionsphase*, gekennzeichnet durch Zurückweichen des Meeres, die Inundationsphase wieder ab. Weicht das Meer so weit zurück, dass die Schichten blossgelegt werden oder der Wirkung der Brandungswellen anheimfallen, so entsteht eine sogenannte *Emersion*. Ein neuer Zyklus ist dann von den ersten durch eine Diskontinuitätsgrenze getrennt.

Man ist soweit gegangen, dass man die Sedimente in epirogenetische und orogenetische einzuteilen versucht hat. Mir scheint, dass die Sedimentpetrographie gut tun wird, den bei der Eruptivgesteinspetrographie eingeschlagenen Grundsätzen zu folgen. Die

erste Einteilung muss, wofür ja schon Ansätze vorhanden sind, eine beschreibend lithologische sein, wobei allerdings der Wert der einzelnen unterscheidenden Merkmale bereits auf Grund der Assoziationsverhältnisse eingeschätzt werden kann. Dann wird zu versuchen sein, ob es gewisse Reihenentwicklungen von Gesteinen gibt, die gerne im assoziativen Verband auftreten. Man wird so vielleicht für marine Ablagerungen in erster Haupteinteilung eine vorwiegend an epirogenetische Regionen gebundene Reihe unterscheiden können. Auch dabei wird es sich nur um zwei ungleiche Tendenzen handeln, die nicht notwendigerweise in allen Gliedern gesondert sein müssen. Die von *Arbenz* „thalattogen“ genannten Sedimente rein chemisch bis chemisch-organogenen Ursprungs können ebenso wie etwa die granitischen und gabbroid-peridotitischen Endglieder der Eruptivgesteinsreihen beiderorts einander sehr ähnlich werden.

Wiederum liefern die Alpen ausgezeichnete Beispiele für die Variabilität und das Gesetzmässige derartiger petrographischer Provinzen. Die Molassebildung kann beispielsweise als typisch spätorogene Provinz ausgesprochen werden, das Molassebecken ist die letzte Vortiefe des bereits zum Gebirge werdenden Alpenbogens. Wildflysch und Flysch sind die Ablagerungen mittelorogener, Bündnerschiefer solche frühorogener Provinzen. Und in ähnlichem Verhältnis stehen im hercynischen Alpenrayon Verucano zu Casanschiefer. Dem zyklisch in Transgression-, Inundations- und Regressionsphasen gegliederten Jura des helvetischen Beckens fehlt hingegen der Charakter der Orogenese, er ist eine Epikontinentalmeerbildung. Wie fruchtbar die stratigraphisch-lithologische Untersuchung für geologische Erforschung eines Gebietes ist, zeigen die Arbeiten unserer hervorragenden Alpengeologen. Ich kann mir versagen, auf Einzelheiten der Probleme der Sedimentation und ihrer Beziehungen zur Gebirgsbildung einzugehen, da erst neuerdings von *Arbenz*, *Argand*, *Heim* und *Staub* darüber Grundsätzliches gesagt wurde. Halten wir fest, auch der Charakter der Sedimentgesteinsassoziationen ist bedingt durch die physikalischen und physikalisch-chemischen Verhältnisse, welche in der zugehörigen geologischen Einheit zur Bildungszeit herrschten.

Zu den Sedimentgesteinen in weiterem Sinne gehören die Böden, die Verwitterungsrückstände einer geologischen Epoche. Die verschiedenen Bodenarten finden sich ebenfalls nicht regellos miteinander vergesellschaftet, die allgemeinen *klimatischen* Verhält-

nisse in einem klimatologisch zusammengehörigen Gebiet prägen sich ihnen auf. Örtliche Unterschiede im Substrat oder den für die Verwitterung und den Transport massgebenden Faktoren bestimmen den Einzelcharakter innerhalb einer Bodenprovinz. Hierbei bei der Bodenbildung handelt es sich bereits um die Anpassung von Gesteinen verschiedener Art und Herkunft an neue Bedingungen, im gegebenen Falle an die auf der Erdoberfläche herrschenden Verhältnisse. Das führt uns über zu den

Metamorphen Gesteinsprovinzen.

Wer mit offenem Auge in den Alpen umhergewandelt ist, der wird bemerkt haben, dass trotz der Fülle vorhandener Gesteinsarten allen Gesteinen etwas Gemeinsames zukommt.

Und wer daraufhin vergleichend Aarmassiv, Gotthardmassiv und Berninagebiet betrachtet hat, wird gefunden haben, dass diese drei Einzelgebiete jedes für sich wieder eine gewisse Selbständigkeit besitzen. Es sind Unterfälle der höheren Einheit. Es ist die Metamorphose, welche, wie ich sagen möchte, nivellierend gewirkt hat, die alle Gesteine in einer bestimmten Richtung hin veränderte. Unter Gesteinsmetamorphose verstehen wir die Anpassung eines Gesteines an seine physikalischen Bedingungen. Der Mineralbestand der Eruptivgesteine ist beispielsweise nur für die hohen Temperaturen charakteristisch, bei denen er gebildet wurde. Für sie kann die Mineralassoziation als Ganzes oder doch in einzelnen Teilen einen Gleichgewichtszustand darstellen. Wird nun das Gestein abgekühlt, so ändern sich die Koexistenzverhältnisse für einzelne Phasen. Was früher im Gleichgewicht war, ist es nicht mehr. Wo immer aber für die Einleitung von Reaktionen günstige Umstände zusammentreffen, will sich der den neuen Bedingungen angepasste Zustand einstellen. Der Mineralbestand wandelt sich in einen neuen um. Und wiederum werden die durch Metamorphose entstandenen Neuprodukte einander verwandt sein, da zu einer gewissen Zeit innerhalb einer geologischen Einheit die physikalischen Bedingungen ähnlich waren oder doch von Punkt zu Punkt miteinander in Beziehung standen.

Stellen wir uns ein feinkörniges Gestein von bestimmten Bauschalchemismus vor, dem dieser Chemismus bereits in kleinen Bruchstücken zukommt, und denken wir uns nun dieses chemische System, wie wir es nennen wollen, verschiedenen physikalischen Umständen

unterworfen, hohen, mittleren und niedrigen Temperaturen, jede einzelne kombiniert mit hohem, mittlerem oder niedrigem Druck. Wir werden dann finden, dass es für jedes Wertepaar von Temperatur und Druck einen, und nur einen (stabilen) Zustand gibt, der die vollkommenste Anpassung des Chemismus an die äusseren Bedingungen darstellt. Meistens wird dieser Zustand mehrphasig sein, das heisst, eine Assoziation von mehreren Mineralarten darstellen. Wir werden auch finden, dass gewisse dieser Mineral-

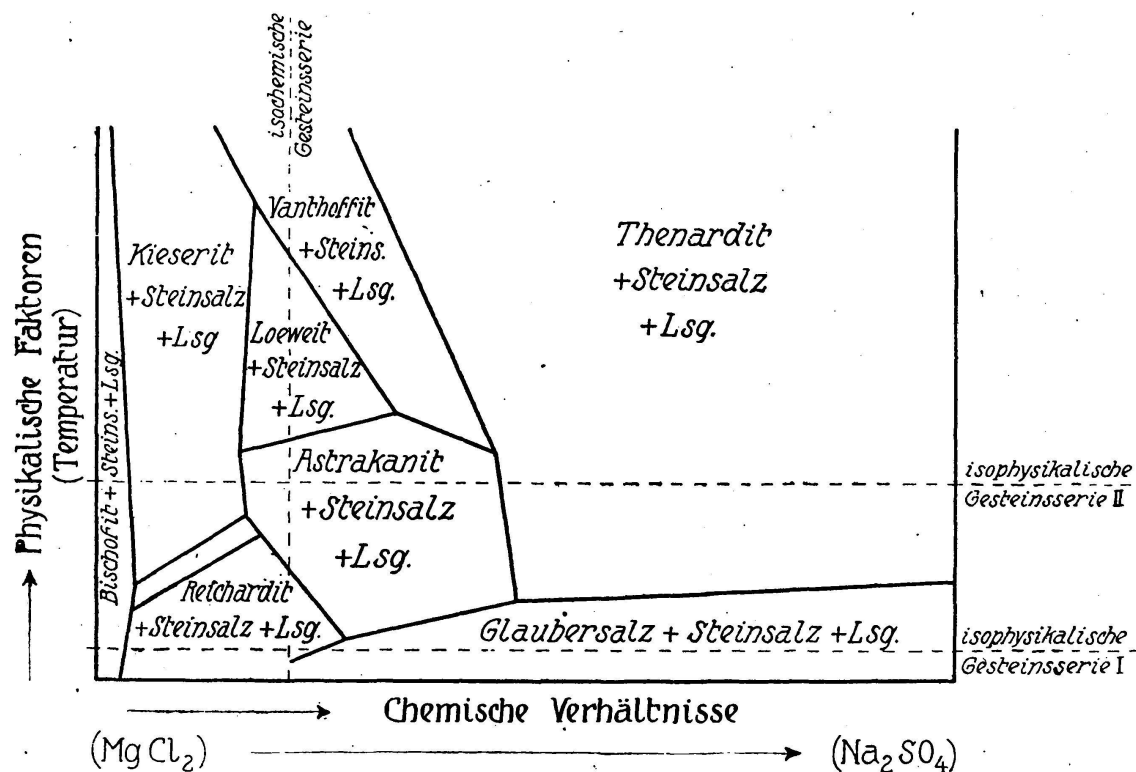


Fig. 4.

assoziationen, besonders die von relativ kleiner Phasenzahl, über ein ganzes Temperatur- und Druckintervall beständig bleiben, dass aber ihr Beständigkeitsfeld irgendwo an das einer anderen Assoziation grenzt, die sich von ihr durch das Auftreten neuer und das Verschwindensein anderer Mineralien unterscheidet. Verändern wir nun in beliebiger Richtung den Chemismus, so nehmen wir ganz ähnliches wahr. Trotz der Veränderungen kann bei bestimmten äusseren Bedingungen der Charakter der Mineralassoziation, was die Art und Zahl der Kristalle betrifft, gleich bleiben. Nur die quantitativen Verhältnisse oder die Mischungsverhältnisse innerhalb der Mineralien verschieben sich. Jedoch auch hier werden von bestimmten Momenten ab Neubildungen auftreten und andere

Mineralien verschwinden. Betrachten wir trotz ihrer Mannigfaltigkeit physikalische und chemische Faktoren als je eine Variable, so würde etwa ein Schema resultieren, wie es Figur 4 für an Steinsalz gesättigte Lösungen von $MgCl_2$ — Na_2SO_4 zeigt.

Gewisse Mineralbestände besitzen in bezug auf Temperatur, Druck und Chemismus bestimmte, wohlbegrenzte *Geltungsbereiche*. Wenn nun im Verlaufe der geologischen Geschichte eines zusammengehörigen Erdrindenteiles irgendwelche in sich wenig variable physikalische Bedingungen herrschend werden und günstige Umstände die Anpassung der Gesteine an diese Bedingungen ermöglichen, werden Neuprodukte gebildet, die im schematischen Diagramm ungefähr auf einer Horizontalen liegen. Der neue Mineralbestand ist der für die betreffenden Temperaturen und Drucke charakteristische. Gesteine ähnlichen Chemismus, die verschiedener Entstehung halber (etwa Eruptivgesteine und mergeliges Sediment) ursprünglich ganz verschiedene Mineralbestände besaßen, erhalten einen gleichen Neubestand, *Konvergenzerscheinungen* treten auf. Aber auch chemisch verschiedene Gesteine werden sich ähnlicher, nicht nur in der durch die Umstände bedingten Struktur oder Textur, sondern auch im Mineralbestand, da es unter gleichen physikalischen Bedingungen immer Mineralien gibt, die als Durchläufer über ein grosses chemisches Intervall beständig sind. Metamorphe Gesteinsserien einer geologischen Einheit mit physikalischen Bedingungen als ungefähr Konstantes und Chemismus als Variables, sollen *isophysikalisch* genannt werden. In einer anderen metamorphen Provinz wird unter anderen physikalischen Bedingungen eine andere isophysikalische Gesteinsreihe entstehen. Etwa entsprechend der Horizontallinie II, der Figur 4. Die im Chemismus einander entsprechenden Glieder beider Reihen heissen dann *korrelat*.

Schliesslich ist auch denkbar, dass wir unserer Untersuchung eine so ausgedehnte geologische Einheit zu Grunde legen, dass die physikalischen Bedingungen von einem Ende bis zum andern stark wechseln, während unter Umständen das chemische Substrat das gleiche ist. Dann wird es von Interesse sein, den Wechsel im Mineralbestand in Abhängigkeit von den physikalischen Faktoren zu studieren, das heisst *isochemische* metamorphe Gesteinsserien aufzusuchen.

Allein zu einer durchgreifenden Metamorphose braucht es für die Anpassungsreaktionen besonders günstige Umstände. Diese finden sich z. B. dann zusammen, wenn das Erdrindenstück geotektonisch aktiv wird. Dabei sind es besonders orogenetische Bewegungen, welche infolge der auftretenden Stresse umwandlungsfördernd wirken. Magmatische Intrusionen erzeugen in gewissem Umkreis (dem *Kontakthof*) abnorm hohe Temperaturen, sie können auch an die Nebengesteine durch sogenannte Pneumatolyse leichtflüchtige Bestandteile abgeben, wodurch ein durchdringendes Medium geschaffen wird, indem sich Reaktionen leichter abspielen. Fehlen derartige Intrusionen, so spricht man von gewöhnlich *orogenen-geotektonischen Provinzen* (dislokationsmetamorphe Provinzen), im anderen Falle von *kontaktmetamorphen Provinzen*. Rein epirogenetische Bewegungen, Schichtüberlagerungen und Erosion aufsteigender Schollen verändern den Standort der Gesteine in bezug auf die normale Folge von aussen nach innen. Das Fehlen besonderer günstiger Umstände wird oft die Neuanpassung des Mineralbestandes verhindern, doch gibt es sehr empfindliche Gesteine, wie etwa die ozeanischen Salzablagerungen, die schon auf derartige, mehr regional gleichförmige Bedingungsänderungen reagieren (*regionalmetamorphe Provinzen*).

Die Alpen sind das typische Beispiel einer orogenmetamorphen Provinz. Da die letzte orogenetische Epoche von der Trias bis ins Tertiär angedauert hat, sind der grossen temporalen Dispersion entsprechend zeitlich verschiedene Stadien auseinanderzuhalten. Für grosse Gebiete ergibt sich jedoch ein Mineralbestand, der nach der Zoneneinteilung von *Grubenmann*, dem Pionier der Lehre von der Gesteinsmetamorphose, in die oberste und mittlere Zone fällt. Die physikalischen Bedingungen waren natürlich nicht überall genau die gleichen, zwei Arten der Metamorphose lassen sich besonders auseinanderhalten. Eine erste, rein epizonale mit Sericit, Chlorit, Chloritoid, Epidot, Zoisit, Granat, Serpentin, Albit, Quarz als Leitmineralien, eine zweite mesozonale mit Muskowit, Biotit, Oligoklas, Staurolith, Disthen, Granat, Hornblende, Quarz als charakterisierenden Neubildungen. Phyllite, Chloritoidschiefer, Epidotchloritschiefer, Prasinite, Chloritschiefer, Serpentine, Granat- oder Zoisit-führende Kalke sind assoziativ verbundene Gesteine der ersten Entwicklung, Zweiglimmerschiefer, Hornblendegarbenschiefer, Granatglimmerschiefer und Granatglimmergneise, Staurolith-

schiefer und Staurolithgneise, Staurolithfelse, Disthenschiefer, Grammatitfelse usw. solche der zweiten Entwicklung.

Die alpin-metamorphe Provinz ist zugleich noch durch nicht gesteinsbildende, gleichzeitig entstandene Mineralassoziationen ausgezeichnet, die Kluftminerale des sogenannten alpinen Typus. Während der orogenetischen Bewegungen bildeten sich Zerrklüfte, in welche die in den Gesteinen zirkulierenden wässerigen Lösungen drangen, charakteristische Mineralabsätze erzeugend. Die wunderbaren Kristallstufen unserer Sammlungen mit Adular, Albit, Bergkristall, mit Sphen, Rutil, Brookit, Anatas, Hämatit, mit Zeolithen, Calcit und Chlorit sind derartige provinzial zugehörige, akzessorische Mineralassoziationen. Sie vervollständigen und erweitern das Bild, das wir auf Grund mineralogisch-petrographischer Studien von den Bedingungen erhalten, denen das Alpengebirge zur Tertiärzeit unterworfen war.

Also auch die metamorphen Gesteinsverbände, die metamorphen Assoziationen sind in ihrer Erscheinungsweise bedingt durch die physikalischen und chemischen Umstände, die in der zugehörigen geologischen Einheit zur Zeit der Neubildungsprozesse herrschten.

So gibt uns, wie wir sehen, das Studium der Mineral- und Gesteinsassoziationen ganz allgemein Auskunft über Art und Charakter des physikalisch-chemischen Bedingungskomplexes der einem Erdrindenteil mit gemeinsamem geologischen Geschehen zukam. Die Verwandtschaft der Assoziationen ist eine Folge des Gemeinsamen in der geologischen Geschichte; die Variabilität ein Ausdruck für die Mannigfaltigkeit in der Einheit.

In den *magmatischen* Provinzen führt dies vor allem zu einer stofflichen Verschiedenheit in einer durch den Totalcharakter vorbestimmten Richtung. Den *metamorphen* Provinzen ist das chemische Substrat in der Hauptsache gegeben, die physikalischen Umstände bedingen die neuen Mineralbestände. Die *sedimentären* Provinzen nehmen eine Mittelstellung ein. Bereits die getrennte Betrachtung magmatischer, sedimentärer und metamorpher Provinzen hat uns gezeigt, dass mit gleichen geologischen Vorgängen in allen drei Klassen gewisse Provinztypen verbunden sind. In der Tat es ist kein Zufall, sondern innere Gesetzmässigkeit, dass die spät orogene Molasseprovinz, die orogen-metamorphe alpine Provinz, die mesozoisch-tertiäre magmatische Kalkaliprovinz (mit den mesozoischen, ophiolithisch-gabbroiden Bildungen und den

tertiären quarzdioritischen Gesteinen von Melirola und Albigena) zusammengehören, dass im Gebiet der atlantischen Hegauvulkane die Molasse als Juranagelfluh mehr epirogenen Charakter annimmt und die Metamorphose zurücktritt. Die Riginagelfluh, der Muschelsandstein, der Flysch, die Bündnerschiefer, die helvetischen Seewerkalke, der Chloritoidschiefer der Garvera, der Staurolithschiefer von Piora, die Quarzdruse von Tiefengletsch, der Malencoserpentin und der Quarzdiorit von Melirola bilden genetisch ein Ganzes.

Wir verstehen, dass Gesteine nicht bloss in Handstücken studiert werden dürfen, dass wir ihr So- und Nichtanderssein nur verstehen werden, wenn die Verbandsverhältnisse in Betracht gezogen werden, dass unser Eindringen ein viel tieferes ist, wenn wir den Blick nicht ständig ins Mikroskop richten, sondern in die weite Natur hinaus.

Hier liegt uns die grosse Aufgabe ob, eine moderne regionale Petrographie und Mineralogie zu schaffen, in welcher der Fundort wieder zu seinem Recht gelangt, aber nicht mehr als blosse Ortsbezeichnung, sondern als Ausdruck der relativen Lage zu anderen Mineralien oder Gesteinen einer geologischen Einheit. Und wie die vergleichende Anatomie des tierischen Körpers, so wird die vergleichende Anatomie des Erdkörpers neue Gesetzmässigkeiten enthüllen und die tiefsten Probleme der Geologie einer Lösung entgegenführen.