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

**Band:** 15 (1935)

**Heft:** 1

**Artikel:** Bemerkungen zum geologisch-tektonischen Problem der magmatischen Differentiation

**Autor:** Niggli, Paul

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-15333

**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:** 15.07.2025

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

# Bemerkungen zum geologisch-tektonischen Problem der magmatischen Differentiation

Von *Paul Niggli* in Zürich

Heute, wie vor 100 Jahren, stehen die Theorien über die Entstehung granitischer Gesteine im Vordergrund des geologischen Interesses. Damals lag die Erhebungstheorie L. v. BUCHS im Streit mit derjenigen tangentialen Zusammenschubes. Heute gesellt sich dazu das Problem des Verhältnisses zwischen Epidermal- und Tiefentektonik. Die Bildungsweise granodioritischer bis granitischer Magmen in einem Orogen bildet den Schlüsselpunkt für die Art der Beurteilung dieser Fragen.

Es stehen sich besonders zwei Theorien der Granitbildung gegenüber, die der Assimilation und Wiederverflüssigung (HOLMES) und die der Differentiation (z. B. BOWEN, NIGGLI). Nach HOLMES ist die Mehrzahl der jüngeren oder deutlich intrusiven Granite durch Assimilation oder Wiedereinschmelzung entstanden. Die moderne Prüfung derartiger Fragen ist die analytisch-chemische und geochemische. Erste Phase einer magmatischen Aktivitätsperiode ist die Förderung von relativ basischen, mehr oder weniger basaltischen Magmen. Da Granit in bezug auf Kieselsäure- und Alkaliengehalt an singulärer Stelle steht, kommt eine unmittelbare Granitbildung durch Zusammenschmelzen basischer Magmen mit Tonen, Karbonatgesteinen oder intermediären Eruptivgesteinen aus rein chemischen Gründen gar nicht in Frage. Wird daher der sekundäre Ursprung postarchäischer Granite vorausgesetzt, so ergeben sich nur zwei Möglichkeiten:

1. Assimilation wird von Differentiation, Stoffwanderung, in weitgehendem Masse begleitet (handle es sich hiebei nur um Stoffzufuhr oder um Aufspaltung als Ganzes), oder
2. der Wiederverflüssigungsprozess ist keine Assimilation, sondern eine einfache Umschmelzung von Gesteinen von bereits granitischer Zusammensetzung.

Letzteres ist an sich keine Lösung des Gesamtproblems der Granitbildung, sondern nur eine Rückverschiebung mit deutlicher

Absage an das Aktualitätsprinzip auch in seiner schwächsten Form. Einmal müssten ja die jetzt nur durch Umschmelzung aktivierten granitischen Magmen doch primär entstanden sein. Der zweiten Annahme widerspricht auch die Bildung homogener Teilmagmen intermediärer Zusammensetzung im Orogen und in Zentralkomplexen und die Blutsverwandtschaft dieser mit den basischen und sauren Endgliedern (man vergleiche die Zusammenstellungen von DALY über die Mengenverhältnisse der Eruptivgesteinsarten in den pazifischen Cordilleren und die Ausführungen des Verfassers über den Bushveldkomplex). Die erste Annahme kommt ohne Differentiationsvorgänge nicht aus, unterscheidet sich also nur graduell von der gewöhnlichen Differentiationstheorie. Die Vorstellung eines langsamen Ansteigens der Geoisothermen im Orogen und damit der Umwandlung alter Gesteine zu neuen Magmen ist jedoch sicherlich als Erklärung für den gesamten Magmatismus im Orogen unbrauchbar. Natürlich ist nicht jede Wiederaufschmelzung, Aktivierung usw. zu verneinen. Ja, das basische Stammagma mag selbst zum Teil reaktiviert werden. Später sind lokal Einschmelzungen vorhanden, wie ja schon vor vielen Jahren die Palingenese granitischer Gesteine im Anschluss an die Lehre der Gesteinsmetamorphose und der leichtflüchtigen Bestandteile des Magmas gefordert wurde.

Von den Gegnern der Differentiationstheorie werden besonders zwei Argumente vorgebracht:

1. Die Mengenverhältnisse der Gesteinsmassen. Dazu ist zu sagen, dass aus normalen Basaltmagmen Granit-, Tonalit-, Andesitmagmen entstehen können, die $1/4$ bis $1/2$ der ursprünglichen Gewichtsmengen umfassen. Basisches Magma oder magmatisch reaktivierbares basisches Material muss aber in der Tiefe in grossen Mengen vorhanden sein. Ein interessantes Nebenergebnis derartiger Berechnungen ist folgendes: Die Restgesamtheit einer Differentiation Gabbro-Granit ist alkalibasaltisch bis hornblendit-peridotitisch. Das würde heissen, dass bei Wiederverflüssigung des Differentiationsrückstandes jede Granodiorit- bis Granitbildung von der Entwicklung atlantischer oder mediterraner Magmen begleitet sein kann. Die Lehre von den petrographischen Provinzen bestätigt diese Korrelation (Vorland vom Orogen, Zwischengebirge usw.) und stützt so ihrerseits die Vorstellung der Bildung granitischer Magmen durch Differentiation, verbunden mit Resorption oder Aufschmelzung der in die Tiefe gesunkenen schweren Kriställchen, verbunden auch mit Wanderungsprozessen, ausgelöst durch die stoffliche Änderung und Mobilität der leichtflüchtigen Substanzen.

Zur Erläuterung dieser zumeist wohl übersehenen Beziehungen sind Rechnungen ausgeführt worden, deren Ergebnisse sich in den nachstehenden Tabellen vorfinden.

Tabelle 1

| | Basalt Mittel | Tonalit Einzelbeispiel | Differentiations-Rest 1 Basalt — 1/2 Tonalit | Nephelinbasalt Mittel |
|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 49,06 | 59,62 | 38,50 | 39,87 |
| $Al_2O_3$ | 15,70 | 17,30 | 14,10 | 13,58 |
| $Fe_2O_3$ | 5,38 | 1,14 | 9,58 | 6,71 |
| FeO | 6,37 | 4,14 | 8,60 | 6,43 |
| MnO | 0,31 | 0,09 | 0,52 | 0,21 |
| MgO | 6,17 | 2,60 | 9,40 | 10,46 |
| CaO | 8,95 | 6,45 | 11,46 | 12,36 |
| $Na_2O$ | 3,11 | 2,42 | 3,80 | 3,85 |
| $K_2O$ | 1,52 | 2,43 | 0,60 | 1,87 |
| $H_2O +$ / $H_2O -$ | 1,62 | 2,51 | 0,72 | 2,22 * |
| $TiO_2$ | 1,36 | 0,76 | 1,86 | 1,50 |
| $P_2O_5$ | 0,45 | 0,28 | 0,62 | 0,94 |
| | 100,00 | 99,74 | 99,76 | 100,00 |

* enthält $CO_2$, etwas zersetzt.

Die Tabelle 1 zeigt, dass, wenn aus 100 Gewichtsteilen basaltischem Magma 50 Gewichtsteile Tonalit entstehen, ein Gesamtrest übrig bleibt, der eine Zusammensetzung aufweist, wie sie Nephelinbasalten zukommt. In Tabelle 2 sind die wasserfrei berechneten Mittelwerte von Basalt und postcambrischen Graniten nach Daly benutzt worden. Bilden sich aus 100 Gewichtsteilen Basalt 25 Gewichtsteile Granit, so bleibt ein Gesamtrest übrig, der wiederum alkalibasaltischen Charakter aufweist.

Tabelle 2

| | Basalt Mittel | Postcambrische Granite Mittel | 1 Basalt — 1/4 P. C. Granite |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 49,87 | 70,28 | 43,08 |
| $TiO_2$ | 1,38 | 0,34 | 1,75 |
| $Al_2O_3$ | 15,96 | 15,10 | 16,26 |
| $Fe_2O_3$ | 5,47 | 1,63 | 6,75 |
| FeO | 6,47 | 1,67 | 8,06 |
| MnO | 0,32 | 0,11 | 0,38 |
| MgO | 6,27 | 1,09 | 8,00 |
| CaO | 9,09 | 2,22 | 11,37 |
| $Na_2O$ | 3,16 | 3,31 | 3,11 |
| $K_2O$ | 1,55 | 3,98 | 0,73 |
| $P_2O_5$ | 0,46 | 0,27 | 0,52 |
| | 100,00 | 100,00 | 100,01 |

Tabelle 3

| | Molekularwerte | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | si | al | fm | c | alk | k | mg | qz |
| Basalt | 118 | 22 | 45,5 | 23 | 9,5 | 0,24 | 0,49 | - 20 |
| Granit | 329 | 41,5 | 20,5 | 11 | 27 | 0,44 | 0,37 | +121 |
| Rest | 87 | 19,5 | 49 | 24,5 | 7 | 0,41 | 0,50 | - 41 |
| Nephelinbasanit | 95 | 20 | 47 | 22,5 | 10,5 | 0,23 | 0,61 | - 47 |
| Bekinkinit | 84 | 16 | 48 | 26,5 | 8,5 | 0,18 | 0,58 | - 54 |
| Basalt | 118 | 22 | 45,5 | 23 | 9,5 | 0,24 | 0,49 | - 20 |
| Tonalit | 205 | 35 | 28 | 23,5 | 13,5 | 0,40 | 0,47 | + 51 |
| Rest | 73 | 15,5 | 54 | 23 | 7,5 | 0,09 | 0,48 | - 57 |
| Mittel von 38 Nephelinbasalten | 73 | 13 | 54 | 25 | 8 | 0,21 | 0,63 | - 59 |
| Melilith-Nephelin-Basalt des Polzengebietes | 74 | 18 | 52 | 19 | 11 | 0,19 | 0,48 | - 70 |
| Norit | 114 | 23 | 44,5 | 28 | 4,5 | 0,13 | 0,68 | - 4 |
| Granit | 407 | 41,5 | 18 | 8 | 32,5 | 0,50 | 0,06 | +177 |
| Rest bei $^1/_{12}$ Granitbildung | 108 | 22,5 | 45,5 | 28,5 | 3,5 | 0,01 | 0,69 | - 6 |
| Plateaubasalt | 115 | 19,5 | 50 | 23,5 | 7 | 0,15 | 0,47 | - 13 |
| Granit | 329 | 40 | 19 | 10 | 31 | 0,40 | 0,32 | +105 |
| Rest bei $^1/_6$ Granitbildung | 96 | 17,5 | 52,5 | 25 | 5 | 0,00 | 0,48 | - 24 |

Die Tabelle 3 enthält die Molekularwerte dieser und analoger Berechnungen. Stets ergibt sich, dass bei einer Totalbildung quarzdioritischer oder granitischer Gesteine, die einen erheblichen Bruchteil des ursprünglichen basischen Magmas ausmachen, ein sekundäres basisches Magma als Gesamtrückstand berechnet wird, das kieselsäureärmer ist als das ursprüngliche. Es ist zum Teil direkt alkaligabbroid oder zeigt Tendenzen in dieser Richtung. Ob nun alle diese Rückstände der Differentiation zusammenkommen oder nicht, hängt naturgemäss von den tektonischen Begleitumständen ab. Fest steht, dass das Mengenverhältnis des auf Differentiationswegen entstehenden granitischen Magmas zu dem des ursprünglich basischen nicht derart veranschlagt werden muss, dass eine Bildung auf diesem Wege unmöglich wäre. Die zweite Feststellung, dass bei einer derartigen Differentiation Nebenprodukte entstehen, die Magmen der Alkalireihe ähnlich sind, ist im Grunde genommen nicht neu. Bereits das Studium der Lamprophyre hat J. P. Beger und dem Verfasser gezeigt, wie häufig die reaktivierten basischen Bodensätze den Chemismus von Magmen der Natron- oder Kalireihe aufweisen. Wesentlich mag indessen sein, dass nach vollzogener Grossdifferentiation „Basalt-Granit" als Ganzes basische Schichten in der Tiefe

liegen müssen, die mehr oder weniger alkaligabbroiden Charakter aufweisen.

Bekanntlich ist folgende Verteilung der Differentiationsverläufe weit verbreitet:

Innerhalb der Orogene: Beginn der magmatischen Tätigkeit mit Empordringen basischer Magmen, die in sich stark differenziert sind und oft peridotitische Teilmagmen erzeugen. Später Entwicklung granodioritischer bis granitischer Magmen. Nach Abschluss der Gebirgsbildung in Senkungszonen sowie im Vorland Empordringen atlantischer Magmen. In weiter entfernten Kratogenen nur geringe Magmentätigkeit oder Plateaubasaltbildung mit deutlichen Anklängen an atlantische Vergesellschaftungen.

Innerhalb der Oceane sehr häufig Basalt-, Alkalibasalt-, Trachyt-, Phonolithvergesellschaftung. Im Orogen und Vorland sind die Alkalibasalte deutlich einer Entwicklungsstufe zugehörig, die der Granitbildung folgt. Das alles vermag nur die Differentiationstheorie zu erklären, und zwar nur, wenn die Residuen wieder aufgeschmolzen werden können. Dass Magmen eines fortgeschrittenen Stadiums der Erdkrustenerstarrung (und somit der Granitbildung) nicht mehr leicht zur Bildung quarzführender Gesteine neigen, ist selbstverständlich. Bereits die Phonolithbildung verlangt als Gegenpol sehr kieselsäurearme pyroxenolithische bis jacupirangitische Rückstände. Man hat in neuerer Zeit sehr oft von zwei basaltischen Magmentypen gesprochen. Sie stehen in der Beziehung von Basalt und Alkalibasalt zueinander, bilden jedoch eine durch Übergänge verbundene Reihe. Eine Möglichkeit der Bildung auseinander ist soeben erläutert worden. Aber auch die Übergänge zu peridotitischen Magmen (durch Olivinabsaigerung und Wiederaufschmelzung) ergibt basische Magmen, die wenig zur Granitbildung neigen. Das aber sind gerade verbreitete Typen oceanischer Vulkantätigkeit.

2. Der zweite Einwand stützt sich auf die Frage: Wie können sich aus quarzfrei erstarrenden Magmen an $SiO_2$ übersättigte Teilmagmen bilden? Nach der Aufschmelzungstheorie nur durch Aufschmelzung saurer Gesteine. Vermutlich ist diese Meinung durch den ausschliesslichen Gebrauch der normativen Mineralzusammensetzung entstanden. Da die Silikate viel komplexer sind, ergibt dies einen völligen Trugschluss. Wir wissen beispielsweise heute aus strukturellen Untersuchungen etwas über die Wirkungsweise des $H_2O$ im Magma. Dadurch, dass sich (OH) mit Mg oder Al usw. bindet, wird Kieselsäure frei. Betrachten wir etwa die Gleichung

$$\underset{\substack{(OH)_2 \\ \text{Biotit}}}{[(SiO_2)_2 AlO_2 \cdot SiO_4 \mid (Mg,Fe)_3] K} + 3\,SiO_2 \rightleftarrows \underset{\text{Kalifeldspat}}{[(SiO_2)_3 AlO_2] K} + \underset{\text{Orthaugit}}{1\tfrac{1}{2}(SiO_2 SiO_4)(Mg,Fe)_2} + H_2O,$$

so ist zweierlei ersichtlich:

Im Linksverlauf zeigt sie, wie durch Hydrolyse freies $SiO_2$ entstehen kann. Im Rechtsverlauf ist ersichtlich, wie umgekehrt eine Biotitschmelze nach Wasserabgabe nur durch $SiO_2$-Aufnahme hochsilifizierte Silikate zu liefern vermag. Ist $SiO_2$ nicht genügend vorhanden, so werden sich Feldspatoide oder (und) Olivin bilden (direktes Beispiel für die Bildung sekundärer alkalischer Magmen, in diesem Falle z. B. von mediterraner Zugehörigkeit). Die Beziehungen: Augit-Olivin, Orthoklas-Leucit, die Bildung von Hämatit aus Aegirin sind ausserdem heute experimentell so gut bekannt, dass der genannte Einwand keine Stütze mehr findet. Besonders interessant mag noch sein, dass unzweifelhaft auch die Hornblendebildung bei dem Differentiationsprozess eine grosse Rolle spielt. In der Hornblende ist ja der Anfang einer Hydratation erkennbar. Wie Tabelle 4 zeigt, lassen manche Restzusammensetzungen der Normaldifferentiation einen Chemismus erkennen, der demjenigen basaltischer Hornblenden nahe steht.

Tabelle 4

| | Rest Basalt-Granit | Rest Basalt-Tonalit | Rest Basalt-Andesit | Basaltische und gemeine Hornblenden Beispiele: | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| si | 87 | 73 | 75 | 71 | 74,5 | 77 |
| al | 19,5 | 15,5 | 16 | 18,5 | 13,5 | 17 |
| fm | 49 | 54 | 52,5 | 51 | 56,5 | 53,5 |
| c | 24,5 | 23 | 25 | 23 | 24,5 | 23 |
| alk | 7 | 7,5 | 6 | 7,5 | 5,5 | 6,5 |
| k | 0,14 | 0,09 | 0,20 | 0,27 | 0,18 | 0,3 |
| mg | 0,50 | 0,48 | 0,51 | 0,75 | 0,48 | 0,66 |

Einerseits beweist dies aufs neue, dass Granit durch einfache Kristallisationsdifferentiation aus gabbroiden Magmen entstehen kann, andererseits ist die besonders von A. Lacroix beobachtete Heteromorphie hornblenditischer Magmen besonders geeignet, die Mannigfaltigkeit der Prozesse darzutun, die zu ähnlichen Resultaten führen können.

Die Wirklichkeit ist natürlich noch komplexer, und es sind magmatischer Schmelzzustand und Kristallisationsverhältnisse (Ko-

ordinationszahlen gegenüber Sauerstoff, Koordinationsschema; molekülartige Gleichgewichte, Zerfall, angedeutet durch inkongruente Schmelzpunkte und Entmischung) als Ganzes die massgebenden Grössen. Der Spezialverlauf der Differentiation ist vom innermolekularen Zustand der Magmen abhängig. Der Gehalt an $H_2O$, $CO_2$ etc. hat besonders grossen Einfluss.

Die heute am meisten diskutierten Probleme sind die der Evolutionsprozesse vom Orogen zum Kratogen. Die Orogene sind labilere Erdkrustenteile als die Kratogene. Da die Begriffe Sial (oder Sal), Sialsima und Sima ursprünglich rein chemische Begriffe darstellten, dann aber auch in mechanischem Sinne (feste Erdmasse, mehr oder weniger flüssiges Substrat) gebraucht wurden, entstand eine grosse Begriffsverwirrung, die durch Nichtanwendung dieser Begriffe am besten beseitigt wird. Man spricht zweckmässiger von Granitgneiss, granitischem Magma, basischen Krustenteilen, basischem Magma. Die Lösung des ganzen Fragenkomplexes beruht in so starkem Masse auf der Art der zugrunde gelegten Hypothesen, dass man heute noch, ohne Beweise bringen zu können, zu den extremsten Ansichten gelangen kann. So interessant die neue Oscillations- und Undationstheorie ist, so wenig scheint sie die tektonischen Probleme für sich allein zu lösen. Und so wichtig es in Zukunft sein wird, der Rolle der magmatischen Veränderungen in der Tiefe erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken, so verfehlt wäre es zur Zeit, in der magmatischen Differentiation ganz allein die Ursache der Faltengebirgsbildung zu erblicken. Sie ist wohl von viel grösserer Bedeutung, als man früher vermutet hat; sie vermag neue Bewegungen auszulösen, aber sie selbst ist nur die Folge eines komplexen Geschehens. Es ist die geologisch durchdachte Geophysik, die zunächst neue Daten schaffen muss, damit neue Folgerungen gezogen werden können.

Eingegangen: 17. Juni 1935.