

**Zeitschrift:** Eclogae Geologicae Helvetiae

**Herausgeber:** Schweizerische Geologische Gesellschaft

**Band:** 80 (1987)

**Heft:** 2: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"

**Artikel:** Migmatitgenese in metapelitischen Gesteinen aus Bohrungen der Nordwestschweiz : vorläufige Resultate

**Autor:** Mazurek, Martin

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-165999>

#### **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:** 24.01.2026

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

# Migmatitgenese in metapelitischen Gesteinen aus Bohrungen der Nordwestschweiz: Vorläufige Resultate

Von MARTIN MAZUREK<sup>1)</sup>

## ABSTRACT

High-grade metapelites from two boreholes in Northwest Switzerland comprise a wide spectrum of minerals and textures. Three metamorphic stages may be distinguished: 1) amphibolite facies metamorphism and deformation, 2) generation of migmatites, 3) retrogressive overprint. The metamorphic P-T path in terms of quantitative phase diagrams is compared with microtextural evidence. The different leucosome patterns and geometries yield constraints on the processes leading to migmatization. Anatexis and metamorphic differentiation appear to be the most likely mechanisms. Evidence for the existence of metamorphic segregations in a certain rock type of the borehole of Leuggern is shown. As a conclusion, it is suggested that both anatexis and metamorphic segregation contributed to migmatization.

## ZUSAMMENFASSUNG

Hochmetamorphe Metapelite aus den Nagra-Bohrungen Kaisten und Leuggern weisen ein reiches Spektrum von Mineralien und Texturen auf. Es lassen sich drei Entwicklungsstadien unterscheiden: 1. Amphibolitfazielle Metamorphose und Deformation, 2. Migmatitbildung, 3. retrograde Überprägung. Der Metamorphosepfad wird mit Hilfe quantitativer P-T-Diagramme nachgezeichnet und mit mikrotextuellen Befunden verglichen. Die Bedeutung der stark variablen Leukosom-Geometrien zur Unterscheidung verschiedener migmatitbildender Prozesse wird diskutiert, wobei Anatexis und metamorphe Segregation die wichtigsten Mechanismen zu sein scheinen. Das Vorhandensein von Subsolidus-Segregationen in einem verwandten Gneistyp der Bohrung Leuggern wird aufgezeigt. Es ist wahrscheinlich, dass sowohl Anatexis wie metamorphe Segregation zur Migmatisierung beigetragen haben.

## 1. Einleitung

In den beiden Nagra-Sondierbohrungen Kaisten und Leuggern bestehen die kristallinen Anteile hauptsächlich aus einer hochmetamorphen Serie von Metasedimenten wahrscheinlich präkambrischen Sedimentationsalters (WIMMENAUER 1980, 1984). Eine detaillierte Beschreibung der Bohrungen liefern PETERS et al. (1987a, 1987b). Die folgende allgemeine Übersicht ist im wesentlichen diesen Arbeiten entnommen.

Die Gneisserie umfasst überwiegend Al-reiche Metapelite in Wechsellagerung mit Biotit-Plagioklas-Gneisen (metamorphe Grauwacken). Mengenmäßig weniger bedeutend sind Hornblende führende Gneise, Amphibolite und sehr helle granitische Gneise. Letztere zwei sind wohl Derivate eines bimodalen Vulkanismus; geochemische Argumente, v. a. Spurenelemente, sprechen gegen eine sedimentäre Herkunft. Untergeordnet kommen Kalksilikate vor, entweder als dm<sup>3</sup>-große Linsen (Boudins) oder in eigentlichen

<sup>1)</sup> Mineralogisch-Petrographisches Institut, Bernoullistrasse 30, CH-4056 Basel.

gebänderten, viele mächtigen Lagen. Diese metasedimentäre Serie wird durchschlagen von Pegmatiten, Apliten und Lamprophyren. In Leuggern wurde zudem ein Granit angebohrt. Diese Gesteinsassoziation entspricht weitgehend den «Gneisanatexiten Typ Hauensteiner Murgtal» (METZ 1980, WIMMENAUER 1980, 1984), welche im südlichsten Schwarzwald aufgeschlossen sind. Besonders gute Aufschlüsse bieten neben den Bohrungen der Steinbruch Wickartsmühle bei Rickenbach (Schweiz. Koord. 641.0/272.9; v. a. migmatische Metapelite) sowie die beiden Fensterstollen der Schluchsee-Werke bei Rickenbach (Koord. 640.5/274.0; v. a. migmatische Metapelite) und am Eggberg (Koord. 639.6/270.3; gebänderte kalksilikatische Serie, Hornblende führende Migmatite).

Eine Migmatisierung ist vor allem in den metapelitischen Chemismen ausgeprägt. Die Metapelite zeigen sowohl makroskopisch wie auch mikroskopisch die weitaus reichhaltigsten Texturen. Aus Dünnschliffbeobachtungen lässt sich ansatzweise die Geschichte der progressiven Metamorphose rekonstruieren.

## 2. Mikrotexturen und deren Interpretation

Mit Hilfe verschiedener Gefügeelemente (v. a. Einregelung, Reaktionsbeziehungen, Pseudomorphosen) lassen sich drei Metamorphosestadien mit jeweils charakteristischen Mineralparagenesen unterscheiden. Diese drei Stadien zeigen fliessende Übergänge und gehören zu ein und demselben thermischen Ereignis. Die aus Dünnschliffbeobachtungen abgeleiteten Mineralstabilitäten sind in Figur 1 dargestellt.

	1. AMPHIBOLITFAZ, METAMORPHOSE	2. MIGMATISIERUNG	3. RETROGRADE ÜBERPRÄGUNG
BIOTIT			— — — — —
GRANAT	—		
PLAGIOKLAS			
KALIFELDSPAT		—	
CORDIERIT		—	
QUARZ			
DISTHEN	—		
SILLIMANIT	—		
ANDALUSIT			
MUSKOVIT			
CHLORIT			
STAUROLITH	—		
ILMENIT			
APATIT			
ZIRKON			
TURMALIN			

Fig. 1. Mineralstabilitäten als Funktion der drei Metamorphose-Stadien, abgeleitet aus mikrotexturellen Beobachtungen.

1. Zur ältesten Phase gehören die Granat führenden Sillimanit-Biotit-Gneise. Sie weisen eine strenge Paralleltextur auf und sind zuweilen intensiv verfaltet. Als seltene gepanzerte Relikte in Plagioklas findet man Disthen und Staurolith.
2. Kontinuierlich schliesst sich an die amphibolitfazielle Metamorphose eine Migmatitbildung an. Mit dieser ist keine penetrative Deformation assoziiert, und die Blastese von Cordierit und Kalifeldspat führt zu einer Entregelung des Gefüges. Während kleinere migmatische Segregationen aus Feldspäten und Quarz bestehen, führen  $\text{dm}^3$ -grosse Leukosome bis 30–40 Vol. % Cordierit.
3. In der Regel stark ausgeprägt ist eine retrograde Metamorphose, welche eine Vergrösserung beinhaltet. Es entstehen Pseudomorphosen von Cordierit («Pinit», bestehend aus Muskovit +/– Biotit, Chlorit) und Kalifeldspat (bestehend aus Muskovit, Quarz und albitreichem Plagioklas).

### 3. Phasendiagramme

Die Dünnschliffbeobachtungen können mit berechneten P-T-Diagrammen der Mineralstabilitäten verglichen werden. Im System  $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  (KMASH) wurden die Phasen Andalusit, Clinochlor, Cordierit, Disthen, Enstatit, Kalifeldspat, Korund, Muskovit, Phlogopit, Pyrop, Quarz, Sillimanit, Spinell und Wasser ausgewählt. Die weiteren Diagrammbedingungen sind im Text zur Figur 2 erwähnt. Es wurde von den Überschussphasen Quarz und Wasser aus projiziert, was u.a. dazu führt, dass Korund und Spinell wegfallen, weil sie im ganzen P-T-Diagramm nicht mit Quarz stabil sind.

Figur 2 zeigt die nach der thermodynamischen Datenbasis von BUCHER & BAUMGARTNER (in Vorbereitung) und HELGESON et al. (1978) stabile Topologie. Diese erfährt bei Benutzung der Daten von BERMAN, BROWN & GREENWOOD (1985) zwar grössere Verschiebungen der univarianten Gleichgewichte, bleibt qualitativ aber identisch.

Die rekonstruierbare Geschichte der Metapelite findet ihren Anfang bei erhöhten Drucken: Dafür sprechen die Disthen-Relikte und die mit Hilfe des Granat-Plagioklas-Alumosilikat-Quarz-Thermobarometers ermittelten Drucke von etwa 6 kbar (eigene EMS-Daten). Anschliessend werden folgende Gleichgewichtskurven überschritten (Abkürzungen s. Text zu Figur 2):  $\text{Ky} \rightarrow \text{Si}$ ,  $\text{Chl} + \text{Mu} \rightarrow \text{Si} + \text{Qz} + \text{Phl} + \text{H}_2\text{O}$ ; hier werden Sillimanit und Phlogopit zusammen stabil, was etwa dem Erreichen von Stadium 1 der Metamorphose entspricht. Nach Überschreiten der oberen thermischen Muskovit-Stabilität wird Kalifeldspat stabilisiert. Die nächste Reaktion,  $\text{Si} + \text{Phl} + \text{Qz} \rightarrow \text{Crd} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$ , ist mikrotexturell sehr gut belegt. Im Dünnschliff ist sie zudem mit beginnender Migmatisierung assoziiert und daher besonders wichtig. Sie liegt in der Tat in der Nähe des Granit-Solidus (s. Fig. 2). Die experimentelle Kalibrierung dieser Reaktion durch HOLDWAY & LEE (1977) stimmt sehr gut mit der hier berechneten Gleichgewichtskurve überein.

Eine Vergrösserung dieses Teiles des P-T-Diagrammes, welches das Stadium 2 charakterisiert, ist auf Figur 3 dargestellt. Der Schnitt metamorpher Mineralreaktionen mit dem Solidus liefert je einen Invarianzpunkt. Unter der idealisierenden Annahme einer eutektischen Zusammensetzung der Schmelze ( $\text{Qz} + \text{Plag} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$ ) können nach den Schreinemakers-Regeln weitere Schmelzreaktionen definiert werden, wie sie in Figur 3 dargestellt sind. Die Steigungen dieser Reaktionen sind sehr steil, weil die Reaktionsen-

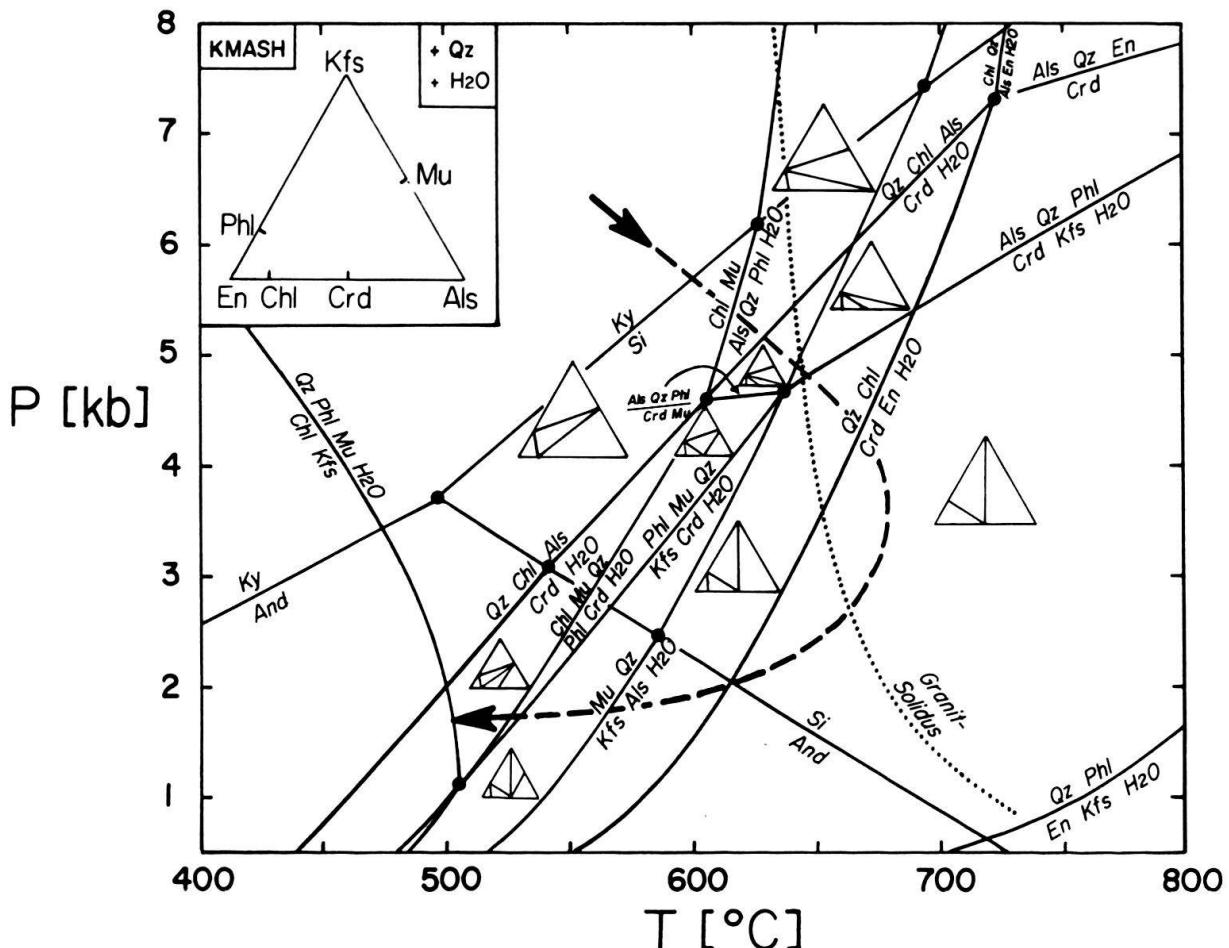


Fig. 2. Aufgrund der konsistenten Datenbasen von BUCHER-NURMINEN & BAUMGARTNER (in Vorb.) und HELGESON et al. (1978) berechnetes P-T-Diagramm für die Phasen Andalusit, Clinochlor, Cordierit, Disthen, Enstatit, Kalifeldspat, Korund, Muskovit, Phlogopit, Quarz, Sillimanit und Spinell. Es wurde von Quarz und Wasser aus projiziert. Es gilt  $P(\text{tot}) = P(\text{H}_2\text{O})$ ; für  $\text{H}_2\text{O}$  in Cordierit und  $\text{Al}$  in Enstatit wurden Korrekturen ausgeführt. Die Wasserdaten sind nach KERRICK & JACOBS (1981). Ausgezogene Kurven: Berechnete Gleichgewichtskurven; gepunktete Kurve: Granit-Solidus (experimentelle Bestimmung nach PIWINSKII (1968) und BOETTCHER & WYLLIE (1968)); gestrichelte Kurve: in dieser Arbeit abgeleiteter Metamorphosepfad; gefüllte Kreise: Invarianzpunkte. Abkürzungen: Als = Alumosilikat (And, Ky und Si), And = Andalusit, Bi = Biotit, Chl = Chlorit, Crd = Cordierit, En = Enstatit, Kfs = Kalifeldspat, Ky = Disthen, Liq = Schmelze, Mu = Muskovit, Phl = Phlogopit, Qz = Quarz, Si = Sillimanit.

tropie betragsmäßig weit grösser ist als das Reaktionsvolumen. Das wird durch Experimente bestätigt, so etwa von HOFFER (1978), der für die Reaktion  $\text{Plag} + \text{Bi} + \text{Qz} + \text{Si} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Liq} + \text{Crd}$  eine sehr steile, negative Steigung festgestellt hat.

Man nehme nun an, dass der P-T-Pfad den Solidus zwischen den Invarianzpunkten I und II überschreitet (s. Fig. 3). Die nächste zu erwartende Reaktion ist dann  $\text{Plag} + \text{Phl} + \text{Qz} + \text{Si} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Liq} + \text{Crd}$ ; es ist die erste inkongruente Schmelzreaktion, indem neben Schmelze noch Cordierit als Festphase entsteht. Die zweite inkongruente Reaktion,  $\text{Plag} + \text{Phl} + \text{Qz} + \text{Si} \rightarrow \text{Liq} + \text{Crd} + \text{Kfs}$ , ist eine «dehydration-melting»-Reaktion nach THOMPSON (1982), indem die Schmelze ihr Wasser allein aus wasserhaltigen Mineralien (hier Biotit) und nicht von einer fluiden Phase bezieht. Ein inkongruenter Schmelzmechanismus in den vorliegenden Metapeliten könnte den Cordierit-Reichtum der Leukosome erklären. Einschränkend muss betont werden, dass die angenommene

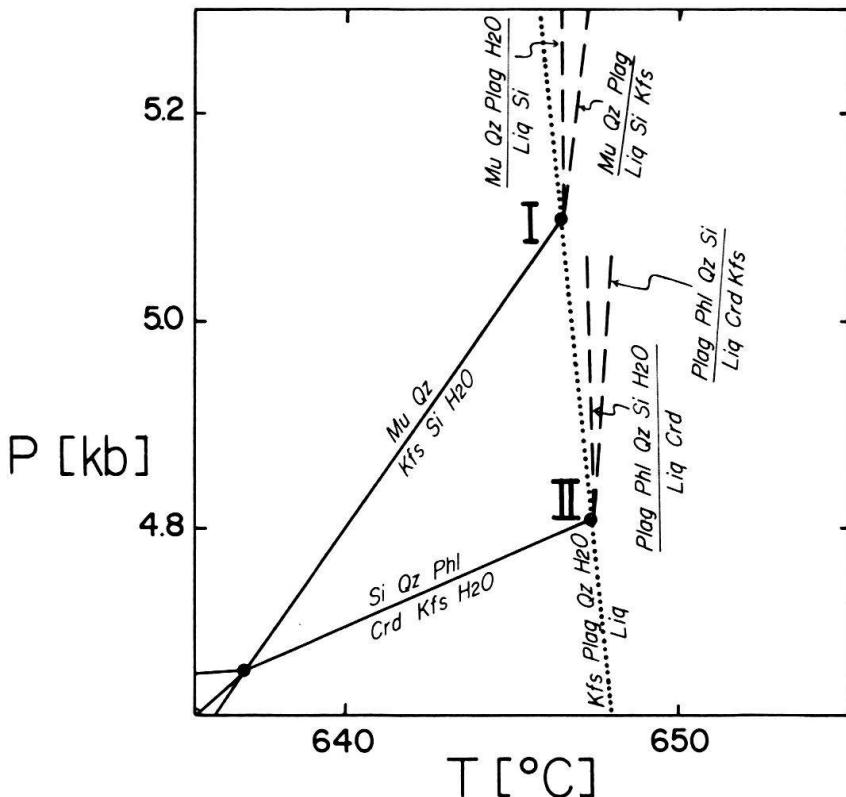


Fig. 3. Vergrösserung eines Teils des P-T-Diagramms von Figur 2 bei etwa 5 kb/650 °C. Ausgezogene Kurven: berechnete Gleichgewichtskurven; gepunktete Kurve: Granit-Solidus; gestrichelte Kurven: schematisch und qualitativ dargestellte inkongruente Schmelzreaktionen. Abkürzungen siehe Figur 2.

Schmelzzusammensetzung stark idealisiert ist. Ihre Veränderung mit progressiver Anatexis ist weitgehend unbekannt.

Die retrograde Verglimmerung (Stadium 3) findet im Stabilitätsfeld von Muskovit statt. Eine besonders wichtige Reaktion ist  $Kfs + Crd + H_2O \rightarrow Mu + Phl + Qz$ , welche für die Bildung von Crd- und Kfs-Pseudomorphosen verantwortlich ist, wie sie im Dünnschliff erkennbar sind. Das vereinzelt beobachtbare Wachstum von Andalusit während der retrograden Metamorphose deutet auf geringe Bildungsdrücke hin. Im Phasendiagramm ergibt sich für die metamorphe Entwicklung der Metapelite eine kontinuierliche Schlaufe, wie schon aus Dünnschliffbeobachtungen geschlossen wurde.

Trotz dieser Übereinstimmung hat das Diagramm Mängel wegen gewisser vereinfachender Annahmen. Dazu zählen vor allem die Vernachlässigung der Komponente FeO oder, allgemeiner gesagt, die fehlende Einführung von Aktivitätstermen (des Mg-Endglieds) in die Berechnung. Besonders krass äussert sich dies beim Granat, dessen Stabilitätsbereich stark vom Fe/Mg-Verhältnis abhängt. Während für die Berechnung des Phasendiagramms Pyropdaten verwendet werden mussten, weisen die vorliegenden Granate eine Almandin-Komponente von etwa 75% auf. Dies ist der Grund, warum Granat im ganzen Diagramm nicht als stabile Phase vorkommt. Viele der Reaktionskurven werden bei Einführung einer FeO-Komponente zu tieferen Drucken verschoben. In diesem Sinne dürfen die P-T-Werte der einzelnen Reaktionen nicht als absolut übernommen werden.

#### 4. Gedanken zu den Prozessen, die zur Migmatitbildung geführt haben

Argumente für eine anatektische Herkunft der Migmatite sind:

1. Vorhandensein von klar rotierten und assimilierten Gneisschollen in Leukosomen.
2. Die Konsistenz der makro- und mikrotexturellen Beobachtungen mit einem schmelzinvolverierenden P-T-Pfad, wie er auf Figur 3 dargestellt ist.

Es gibt aber auch Leukosome, welche gegen eine anatektische Herkunft sprechen:

1. Biotit und Sillimanit, reliktisch in Leukosomen erhalten, sind teilweise noch sehr gut eingeregelt, obwohl sie in einer massigen Quarz-Feldspat-Matrix schwimmen. War das Leukosom einmal geschmolzen, ist die Erhaltung der Kornorientierung schwer vorstellbar.
2. Zuweilen riesige Korngrößen v.a. von Cordierit (bis 5 cm), umgeben von einer biotitfreien Korona, erinnern eher an einen aus dem Fluid auskristallisierten pegmatoiden Körper als an einen anatektischen Granit.
3. Es gibt Leukosome, welche mineralogisch klar zoniert sind. Zonierungen sind im festen Zustand viel leichter zu erklären als bei Annahme einer Schmelzphase.

Direkte und eindeutige Argumente für metamorphe Segregationen sind schwer zu finden. Sie sind aber vorhanden in einem Gneistyp der Bohrung Leuggern, welcher in Wechsellegerung mit den Migmatiten vorkommt und im folgenden beschrieben wird.

#### 5. Metamorphe Segregationen in Gneisen der Bohrung Leuggern

Ein bestimmter Gneistyp mit den Matrixmineralien Biotit, Plagioklas, Kalifeldspat und Quarz weist stellenweise reichlich diskusförmige, mehrere cm grosse Quarz-Sillimanit-Segregationen auf, die ungefähr im Gneisgefüge eingeregelt sind (s. Fig. 4). Bei genauerer Betrachtung im Mikroskop erkennt man einen Schalenbau der Segregationen, wie er in Figur 5 dargestellt ist. Es fällt auf, dass von aussen nach innen von einer Schale zur nächsten jeweils eine Phase weniger vorkommt, bevor man zum eigentlichen Quarz-Sillimanit-Kern der Segregation gelangt. Eine derart gut definierte, konzentrische Geometrie lässt einen diffusiven Bildungsmechanismus vermuten. Die Abweichung der Gestalt der Segregationen von der Kugelform lässt sich durch die bessere Fluid-Wegsamkeit parallel zur Schieferung erklären. Jedenfalls sind die Segregationen aus texturellen Gründen jünger als die Schieferung.

Die quantitative Behandlung der Segregationen mittels irreversibler Thermodynamik gründet auf der Theorie von FISHER (1973, 1977). Die Anwendung auf natürliche Segregationen, ähnlich den vorliegenden, stammt von FOSTER (1981, 1982, 1983). Sein Fortran-IV-Programm SEG6 wurde hier zur Berechnung beigezogen. Das Modell fusst auf der Annahme lokalen Gleichgewichts zwischen Mineral und Fluid; der Stofftransport sei diffusiv entlang Gradienten im chemischen Potential. Die wichtigsten Grundgleichungen sind (1), (2), (8) und (9) in FOSTER (1981). Die zur Berechnung notwendigen phänomenologischen Diffusionskoeffizienten ( $L_{ij}$ ) sind weitgehend nach FOSTER (1981); einziger Koeffizient für Al musste vergrössert werden. Die Berechnung liefert folgende Größen:

1. Abfolge der Schalen in der Segregation
2. Modalbestände aller Schalen
3. Relative Volumina aller Schalen.

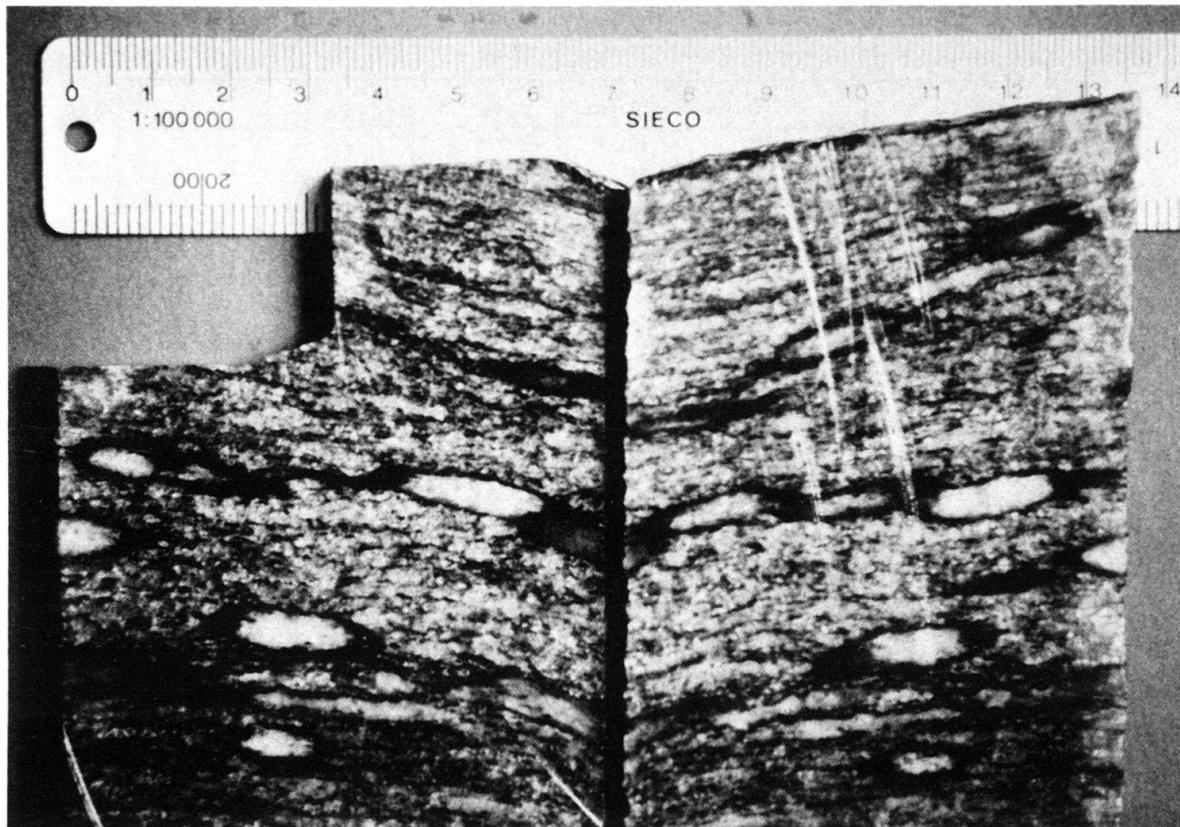


Fig. 4. Zonierte, Sillimanit führende Segregationen in einem hellen Biotitgneis der Bohrung Leuggern (Teufe 891,96 m). Der helle, sillimanitreiche Kern wird von einer biotitreichen Hülle umgeben.

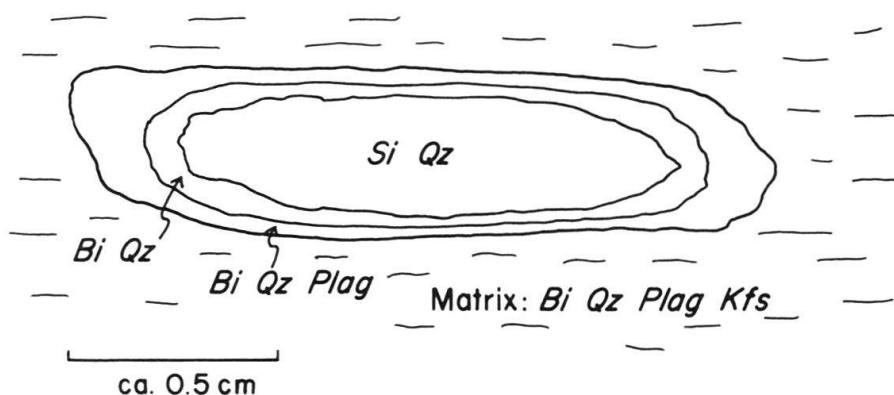


Fig. 5. Leicht idealisierte Skizze einer Segregation wie in Figur 4 abgebildet. Um den Sillimanit-Quarz-Kern sind zwei recht scharf voneinander abzugrenzende Säume unterscheidbar.

Wie die Tabelle zeigt, stimmen alle berechneten Größen für alle Schalen ausgezeichnet mit der Beobachtung (Pointcounter-Analysen) überein und bestätigen die Anwendbarkeit des Diffusionsmodells.

## 6. Schlussfolgerung

Das Vorhandensein metamorpher Segregationen, entstanden durch diffusiven Stofftransport, ist zumindest in den eben beschriebenen Gneisen angezeigt. Es ist möglich und

Tabelle: Vergleich von beobachteten und berechneten Modalbeständen aller Schalen der in den Figuren 4–5 abgebildeten Segregationen. Die Berechnungsmethode ist im Text skizziert.

		Berechnet mit Diffusions-Modell	Beobachtet
Matrix	Vol% Qz		35.2
	Vol% Ab		29.8
	Vol% Kfs		27.6
	Vol% Phl		7.4
Aeussere Schale	Vol% Qz	44.9	51.4
	Vol% Ab	42.3	38.3
	Vol% Phl	12.8	10.2
Innere Schale	Vol% Qz	79.9	75.0
	Vol% Phl	20.1	25.0
Kern	Vol% Qz	63.0	60.5
	Vol% Si	37.0	39.4

wahrscheinlich, dass auch in den Metapeliten neben Anatexis metamorphe Segregation zur Migmatitbildung beigetragen hat. Möglicherweise haben diese beiden Migmatisierungs-Prozesse in verschiedenen Teilbereichen des Gesteins gleichzeitig gespielt, wie dies ebenfalls durch das Nebeneinander verschiedener Leukosomtypen angedeutet wird.

### Verdankungen

Für die Überlassung von Gesteinsproben aus den Bohrungen Kaisten und Leuggern sei der Nagra gedankt. Zur Berechnung wurden u. a. das Fortran-IV-Programm SEG6 von C. T. Foster (Iowa City) und das Fortran-77-Programm PT-SYSTEM von E. H. Perkins (Zürich), T. H. Brown und R. G. Berman (Vancouver) benutzt. Ich danke den Autoren, ebenso L. Baumgartner, der die Programme an unseren Rechenanlagen installiert hat. M. Frey (Basel), J. Meyer (Bern) und Tj. Peters (Bern) haben das Manuskript sorgfältig durchgesehen. Besonderen Dank verdient J. Meyer, der uneigennützig eigene Resultate zur Verfügung gestellt hat und mir seit langem als kompetenter Diskussionspartner zur Verfügung steht. Diese Arbeit entstand mit finanzieller Unterstützung durch den Schweiz. Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Projekt Nr. 2.578-0.84).

### LITERATURVERZEICHNIS

- BERMAN, R., BROWN, T. H., & GREENWOOD, H. J. (1985): An internally consistent thermodynamic data base for minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . – Atomic energy of Canada technical report TR-377.
- BOETTCHER, A. L., & WYLLIE, P. J. (1968): Melting of granite with excess water to 30 kilobars pressure. – J. Geol. 76, 235–244.
- BUCHER-NURMINEN, K., & BAUMGARTNER, L. (in Vorbereitung): Revised thermodynamic data for Mg-clino-chlore–spinel–Mg-cordierite–phlogopite–pyrope.
- FISHER, G. W. (1973): Nonequilibrium thermodynamics as a model for diffusion-controlled metamorphic processes. – Amer. J. Sci. 273, 897–924.
- (1977): Nonequilibrium thermodynamics in metamorphism. In: FRASER, D. G. (Ed.): Thermodynamics in geology (S. 381–403). – Reidel publ. comp.

- FOSTER, C. T. (1981): A thermodynamic model of mineral segregations in the lower sillimanite zone near Rangeley, Maine. – Amer. Mineralogist 66, 260–277.
- (1982): Textural variation of sillimanite segregations. – Canad. Mineralogist 20, 379–392.
- (1983): Thermodynamic models of biotite pseudomorphs after staurolite. – Amer. Mineralogist 68, 389–397.
- HELGESON, H. C., DELANY, J. M., NESBITT, H. W., & BIRD, D. K. (1978): Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals. – Amer. J. Sci. 278-A.
- HOFFER, E. (1978): Melting reactions in aluminous metapelites: Stability limits of biotite + sillimanite + quartz in the presence of albite. – N. Jb. Mineral. [Mh.] 1978, 396–407.
- HOLDAWAY, M. J., & LEE, S. M. (1977): Fe–Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observations. – Contr. Mineral. Petrol. 63, 175–198.
- KERRICK, D. M., & JACOBS, G. K. (1981): A modified Redlich-Kwong equation for  $H_2O$ ,  $CO_2$ , and  $H_2O-CO_2$  mixtures at elevated pressures and temperatures. – Amer. J. Sci. 281, 735–767.
- METZ, R. (1980): Geologische Landeskunde des Hotzenwaldes. – Moritz-Schauenburg-Verlag, Lahr/Schwarzwald.
- PERKINS, E. H., BROWN, T. H., & BERMAN, R. G. (1986): PT-SYSTEM, TX-SYSTEM, PX-SYSTEM: Three programs which calculate pressure-temperature-composition phase diagrams. – Computers Geosci. 12, 749–755.
- PETERS, T., MATTER, A., ISENSCHMID, C., BLAESI, H. R., MEYER, J., & ZIEGLER, H. J. (1987a): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. – Nagra Tech. Ber. NTB 86-04 (im Druck).
- PETERS, T., MATTER, A., ISENSCHMID, C., BLAESI, H. R., MEYER, J., & MEYER, C. (1987b): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. – Nagra Tech. Ber. NTB 86-05 (im Druck).
- PIWINSKII, A. J. (1968): Experimental studies of igneous rock series, central Sierra Nevada Batholith, California. – J. Geol. 76, 548–570.
- THOMPSON, A. B. (1982): Dehydration melting of pelitic rocks and the generation of  $H_2O$ -undersaturated liquids. – Amer. J. Sci. 282, 1567–1595.
- WIMMENAUER, W. (1980): Lithology of the Precambrian in the Schwarzwald. An interim report. – N. Jb. Mineral. [Mh.] 1980, 364–372.
- (1984): Das prävariskische Kristallin im Schwarzwald. – Fortschr. Mineral. 62, Beih. 2, 69–86.

Manuskript eingegangen am 15. Januar 1987

Revision angenommen am 27. Februar 1987

