

Zeitschrift:	Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
Band:	68 (1988)
Heft:	1
Artikel:	Petrographie, Mineralchemie und Metamorphose von Metasedimenten der Sondierbohrung Sta. Maria I, Lukmanierpass
Autor:	Fischer, Markus
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-52049

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: 13.01.2026

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

Petrographie, Mineralchemie und Metamorphose von Metasedimenten der Sondierbohrung Sta. Maria I, Lukmanierpass

von *Markus Fischer¹*

Abstract

Samples from the drill-hole Sta. Maria I, Lukmanier Pass, were studied petrographically and by microprobe technique. Chemically, the minerals are fairly homogeneous, except for the anorthite content of plagioclase, varying from 49.5 to 73.9 mol-%, and for amphiboles. Assuming a pressure of 5 kbar (FOX, 1975; FREY et al., 1980), temperature estimations, based on mineral assemblages in margarite-bearing marls as well as garnet-biotite- and calcite-dolomite-thermometry, show rather inconsistent results: a) 460°C for the assemblage margarite+quartz+calcite+clinozoisite+plagioclase (sample MF1751); b) 528–602°C from garnet-biotite-thermometry taking into account the Ca content in garnet (four samples, except MF1739); c) 547–566°C for calcite-dolomite-thermometry (sample MF1754).

Keywords: Mineral chemistry, metamorphism, geothermometry, Sta. Maria drill-hole, Gotthard massif, Switzerland.

Abkürzungen

Akt	Aktinolith	Ilm	Ilmenit
An	Anorthit	Kf	Kalifeldspat
Ap	Apatit	Ky	Disthen
Bi	Biotit	Ma	Margarit
Cc	Calcit	Mu	Muskovit
Chl	Chlorit	Plag	Plagioklas
Clz	Clinozoisit	Po	Pyrrhotin
Cor	Corund	Pyro	Pyrophyllit
Cumm	Cummingtonit	Qz	Quarz
Dol	Dolomit	Ru	Rutil
Ga	Granat	Tr	Aktinolith/Tremolit
Gr	Graphit	Turm	Turmalin
Hbl	Hornblende	Zr	Zirkon

von Mineralien publiziert (FREY, 1969, 1978; FOX, 1974; FREY und ORVILLE, 1974; FREY et al., 1982).

Ziel dieser Arbeit ist es, chemische Daten von Mineralien der Sondierbohrung Sta. Maria I nördlich der Lukmanierpasshöhe mitzu teilen und daraus die PT-Bedingungen während der alpinen Metamorphose abzuleiten. Die Grundlagen bilden die im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführten petrographischen und mineralchemischen Untersuchungen an Metasedimenten der Sondierbohrung Sta. Maria I (FISCHER, 1986).

1. Einleitung

Das Gebiet des Lukmanierpasses ist schon lange Ziel vieler geologischer Untersuchungen. Seit fast 20 Jahren wurden chemische Daten

2. Geologische Situation

Das Gebiet des Lukmanierpasses, welches am Südrand des Gotthard-«Massivs» liegt, wird zur Hauptsache von ultra-helvetischen

¹ Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Basel, Bernoullistr. 30, CH-4056 Basel.

Metasedimenten aufgebaut. Diese werden der Trias (Röti- und Mels-Serien, Quartenschiefer), dem Lias (Stgir- und Inferno-Serien) und dem untersten Dogger (Coroi-Serie) zugeordnet (FREY, 1967).

Das Gebiet wird im Norden durch Gneise und Granitoide des Gotthard-«Massivs» begrenzt, während im Süden die penninische Lucomagno-Decke über die erwähnten mesozoischen Metasedimente geschoben ist.

Während der alpinen Orogenese wurden die Sedimente zu einer asymmetrischen Synklinale mit nach Süden überkipptem, stark reduziertem Nord- und normal liegendem Südschenkel verfaltet: die Scopi-Synklinale. Sie bildet eine gegen Westen auftauchende Mulde, welche entlang dem Kontakt mit den Granitoiden bewegt wurde; dabei wurde der Nordschenkel herausgehoben und teilweise abgesichert (CHADWICK, 1968; ETTER, 1987).

Die die alpine Orogenese begleitende Regionalmetamorphose überprägte das Lukmanierpassgebiet unter grünschiefer- bis amphibolitfaziellen Bedingungen, mit von Norden nach Süden ansteigendem Metamorphosegrad. Verschiedene Temperatur- und Druckbestimmungen ergaben für den Höhepunkt der alpinen Regionalmetamorphose im Lukmanierpassgebiet etwa 500–550°C und 5–5.5 kbar (FREY, 1969, 1978; FOX, 1975; FREY et al., 1980).

Im Verlauf der Ausbauplanung des schweizerischen Schienennetzes wurde in den Jahren 1972 bis 1974 rund 450 m nördlich der Staumauer Sta. Maria (Koord. 160.700/704.350) die 1441.1 m tiefe Sondierbohrung Sta. Maria I abgeteuft. Diese durchfuhr dabei die Intrusionen des Medelser-Granites und des Cristallina-Granodiorites und traf in einer Bohrtiefe von 1004.5 m auf die Metasedimente der Scopi-Synklinale; die Abfolge umfasste: Quartenschiefer – Stgir-Serie – Inferno-Serie – Stgir-Serie – Quartenschiefer – Stgir-Serie (AEBERLI, 1974).

3. Petrographie

Die petrographisch untersuchten Proben lassen sich in graphitfreie triadische und graphitführende jurassische Gesteine einteilen. Im weiteren können Kalkglimmerschiefer, Glimmerschiefer, aktinolithführende Schiefer und, infolge metamorpher Segregation, Schie-

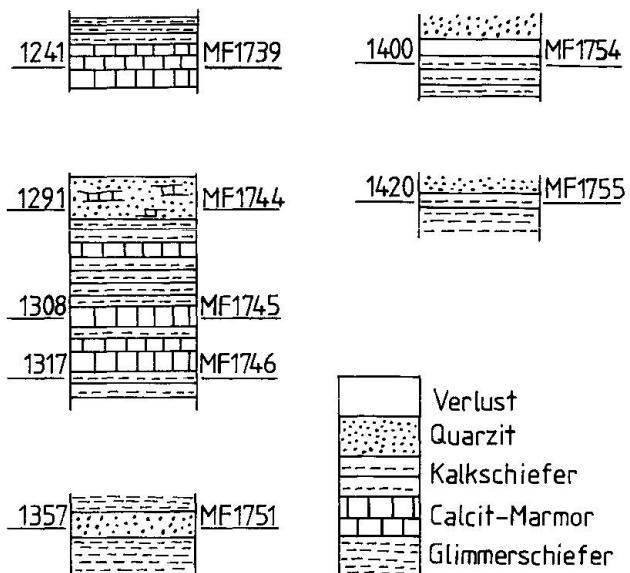


Abb. 1 Die mineralchemisch untersuchten Bohrkerne. Neben den Probennummern sind die mittleren Bohrtiefen in Meter angegeben. Bohrprofil nach AEBERLI (1974).

fer mit Lagenbau im mm-Bereich unterscheiden werden.

Die mineralchemisch untersuchten Proben lassen sich kurz wie folgt beschreiben (vgl. auch Abb. 1):

MF1739: grauer Kalkschiefer mit einem unregelmässigen Lagenbau von weisslichgrauen und grauen Lagen; vereinzelt mm-grosse Calcit-Linsen. Mesoskopisch sind rötliche, bis 3 mm grosse Granat-Porphyroblasten erkennbar.

MF1744: grauer bis grünlich-grauer Aktinolith-führender Kalkschiefer. Auffallend sind bis 3 mm grosse, grüne Aktinolith-Rosetten.

MF1745 und MF1746: graue bis dunkelgraue Schiefer mit dunkleren, Muskovit-reichen und helleren, Quarz-reichen Lagen. Bis 2 mm grosse, teils rotierte Granate.

MF1751: grauer Kalkglimmerschiefer mit helleren und dunkleren Lagen. Bis 3 mm grosse, teils rotierte Granate.

MF1754: Schiefer mit dunkleren, Muskovit-reichen und helleren, Calcit-reichen Lagen. Einschaltungen von mm-grossen Calcit-Linsen.

MF1755: grau bis graugrüner Schiefer mit dunkleren, Margarit-Biotit-reichen und helleren, Dolomit-Quarz-reichen Partien sowie Einschaltungen von mm-grossen Calcit-Lagen. Bis 1 mm grosse Granate.

Die dominierende Planarstruktur ist die Hauptschieferung S2, welche in den Metasedimenten mit einem Ost-West Streichen steil nordwärts fällt; der Deformationsphase D2 wird die Bildung der Scopi-Synklinale zugesprochen (CHADWICK, 1965, 1968: Phase B; SIBBALD, 1971: Phase D2; THAKUR, 1973: Phase F2; DIRKS, 1986: Phase D2; ETTER, 1987). Vereinzelt zeigen die Proben eine spätere schwache Runzelung der Hauptschieferung, welche jedoch erst südlich der Passhöhe in Form einer Crenulationsschieferung dominant wird (CHADWICK, 1968; DIRKS, 1986; ETTER, 1987).

Die mesoskopisch zu beobachtende Hauptschieferung S2 äussert sich mikroskopisch in Form einer engständigen, parallelen Planarstruktur: fast alle Mineralien zeigen in S2-Richtung eine bevorzugte Einregelung; charakteristisch für die Proben MF1745, MF1746, MF1751, MF1754 und MF1755 ist ein Lagenbau im sub-mm- bis mm-Bereich, welcher als Folge einer metamorphen Segregation während der Deformation/Metamorphose betrachtet wird.

Tab. 1 zeigt den Mineralbestand der sieben mineralchemisch untersuchten Proben.

Muskovit

Muskovit ist der vorherrschende Hellglimmer und tritt, mit Ausnahme der Amphibol-führenden Proben, als Hauptgemengteil auf. Muskovit bildet in Quarz-reichen Partien einzelne kleine Schuppen, in Glimmer-reichen Partien parallel zur Hauptschieferung mono-mineralische Lagen.

Margarit

Der Ca-Hellglimmer konnte optisch, röntgenographisch und chemisch identifiziert werden. Im Dünnschliff lässt sich Margarit am höheren Relief, der niedrigeren Doppelbrechung und an Zwillingsbildung gut von Muskovit unterscheiden. Auffallend ist das ausgeprägte Korngrößenspektrum von 0.05 bis 0.7 mm. Dies dürfte eine Folge der Wachstums geschwindigkeit sein, welche in Quarz-reichen Partien kleiner ist als in Hellglimmer-reichen Lagen. Margarit bildet teils kleine Aggregate, teils lange, porphyroblastische Schuppen, welche das Gefüge oft regellos überwachsen.

Biotit

Zwei Generationen von Biotit können unterschieden werden. Syn- bis postkinematische Biotit-Blättchen mit deutlichem, hell- bis dunkelbraunem Pleochroismus und einer Länge von 0.05 bis 1 mm sind in der Matrix eingegelt oder wachsen im Druckschatten von Granat. Zahlreiche Einschlüsse von Graphit, Quarz, Ilmenit und Turmalin sowie stellenweise Chloritisierung sind charakteristisch. Postkinematische Querbiotite überwachsen die Matrix in Form von 0.1 bis 0.8 mm grossen Blästen.

Chlorit

Chlorit tritt sowohl primär in Form einzelner kleiner Schuppen in Quarz-reichen Zonen, wie auch pseudomorph nach Biotit und Granat auf. Nach Biotit pseudomorpher Chlorit bildet grössere Schuppen, die nicht selten radialstrah-

Tab. 1 Mineralbestand der analysierten Bohrkerne.

	Qz	Mu	Ma	Bi	Chl	Cc	Dol	Clz	Plag	Ga	Akt	Hbl	Cumm	Iilm	Po	Gr	Turm	Ru	Zr	Ap	Kf
MF1739	X			X	X	X				X		X	X		X	X					o
MF1744	X			X	X	X					X				X	X					o
MF1745	X	X	X	X	X					X		X			X	X	X				o
MF1746	X	X	X	X	X	X				X		X			X	X	X				o
MF1751	X	X	X	X	X	X				X		X	X		X	X	X	o	o	o	o
MF1754	X	X	X	X	X	X	X	X							X	X	X	o	o		
MF1755	X	X	X	X	X				X						X	X	X				

lig angeordnet sind. Chlorit kann mit Muskovit auch parallel verwachsen sein. Die chemischen Analysen wurden nur an primären Chloriten durchgeführt. Sowohl optisch als auch chemisch handelt es sich um Ripidolith.

Calcit

Calcit dominiert zumeist über Dolomit. Calcit kommt in Form einzelner Körner, in Aggregaten oder in Adern und Linsen vor. Charakteristisch ist die Abwesenheit von Graphit in den meisten Körnern.

Dolomit

Einzig in den Proben MF1754 und MF1755 treten linsenförmige Dolomitaggregate auf. Sie weisen Einschlüsse von Graphit, Quarz und Muskovit auf.

Granat

Granat zeigt verschiedene Ausbildungsformen: Porphyroblasten sind vereinzelt stark chloritiert; in den noch gut erhaltenen Granaten ist ein sigmoidales Interngefuge markant, welches stets nur eine Wachstumsphase erkennen lässt. Das Interngefuge wird zur Hauptsache durch Graphit, Ilmenit, Calcit, Muskovit, Biotit, gelängtem Quarz und Clinozoisit abgebildet; in einem Granat-Korn der Probe MF1746 wurde zudem Chloritoid beobachtet. In Probe MF1739 bilden einzelne Granate teils siebartige, teils zusammenhängende Formen mit unregelmässigen Korngrenzen. Die eingeschlossenen Calcit-Körner zeigen Anlösungserscheinungen.

Plagioklas

In Probe MF1751 tritt Plagioklas in zwei Erscheinungsformen auf: zum einen angereichert in Form länglicher, in der Hauptschieferung eingeregelter, xenomorpher Körner in einer Plagioklas-Muskovit-Lage, welche stark Graphit-führend ist und von Clinozoisit überwachsen wird. Plagioklas scheint auf Kosten von Muskovit gewachsen zu sein; zum anderen in Form einzelner, xenomorpher Plagioklas-Körner in Clinozoisit- und Margarit-reichen Lagen parallel zur Hauptschieferung. Diese zeigen viele Einschlüsse von Graphit, Muskovit, Quarz und Ilmenit. Zwillinge sind nur selten beobachtbar.

Kalifeldspat

Dank der Feldspat-Färbung wurden in

Probe MF1751 wenige xenomorphe Körner von primärem (?) Kalifeldspat, welche in direktem Kontakt mit Pyrrhotin stehen, erkannt.

Clinozoisit

Die an ihren anomal gelblichblauen bis tiefblauen Interferenzfarben leicht erkennbaren Clinozoisite treten hauptsächlich stengelig auf. Sie überwachsen zum Teil Muskovit und Plagioklas und weisen vor allem durch Graphit und Quarz abgebildete, leicht gewellte Interngefuge auf.

Amphibole

Probe MF1739 ist charakterisiert durch das Auftreten von farblosem *Cummingtonit* sowie *Hornblende*, die einen bläulichgrünen Pleochroismus zeigt. Einschlüsse von Calcit, Pyrrhotin und Apatit sind selten. Beide Amphibole sind in Form von grösseren Leisten ausgebildet. Auffallend sind die teils scharfen, teils diffusen Farbübergänge zwischen beiden Amphibolen. Scharfe Farbübergänge können auch in ein und demselben Kristall beobachtet werden. Eindeutige Reaktionstexturen sind jedoch nicht erkennbar.

Die in der Probe MF1744 auftretenden *Aktinolith*e sind überwiegend in Rosetten angeordnet, die aus vielen feinen Leisten zusammengesetzt sind. Seltener sind Büschel und einzelne Leisten.

4. Mineralchemie

Die Mikrosondenanalysen wurden am Mineralogisch-Petrographischen Institut der Universität Basel mit einem ARL-SEMQ, der Methode SCHWANDER und GLOOR (1980) folgend, durchgeführt. Dabei wurde in einem kombinierten energie- und wellenlängendifpersiven Betrieb gearbeitet, und alle gewünschten Elemente wurden gleichzeitig im gleichen Messpunkt analysiert. Ein Teil der Analysen ist in Tab. 2 zusammengestellt.

Muskovit

Alle analysierten Muskovite zeigen sowohl in einer einzelnen Probe wie auch untereinander einen ähnlichen Chemismus. In einem K-Na-Ca-Diagramm (Abb. 2a) sind die folgenden Variationen feststellbar: 85.7 bis 93.1

Tab. 2 Chemische Durchschnittsanalysen von Plagioklas und Amphibolen mit Minimal- und Maximal-Werten. Fe²⁺ und Fe³⁺ der Amphibole nach LEAKE (1978) und ROCK und LEAKE (1984).

MINERAL PROBE ANZAHL	PLAG 1751 15	HBL 1739 22	CUMM 1739 32	AKT 1739 24
	MIN MAX	MIN MAX	MIN MAX	MIN MAX
SiO ₂	52.80 50.12 58.11	42.83 36.81 46.95	50.37 45.32 51.94	52.77 51.29 53.79
Al ₂ O ₃	29.26 26.08 31.45	11.22 6.06 14.82	1.30 0.26 8.71	2.72 1.79 4.15
TiO ₂	0.02 0.00 0.08	0.29 0.11 0.41	0.02 0.00 0.21	0.13 0.00 0.27
FeO	0.03 0.00 0.21	18.84 17.04 20.97	29.07 22.88 31.26	10.14 9.60 11.03
MnO	0.05 0.00 0.07	0.02 0.00 0.12	0.03 0.00 0.13	0.23 0.13 0.37
MgO	0.12 0.00 0.55	8.05 6.03 10.39	11.86 8.44 13.50	16.39 15.72 16.96
CaO	11.95 10.22 14.46	11.14 9.83 14.89	1.50 0.45 7.70	11.52 10.69 12.01
Na ₂ O	4.40 2.82 5.73	0.95 0.53 1.28	0.13 0.01 0.82	0.22 0.15 0.37
K ₂ O	0.02 0.00 0.06	0.27 0.00 0.53	0.01 0.00 0.27	0.00 0.00 0.00
TOTAL	98.61 =====	93.61 =====	94.29 =====	94.12 =====
O	8	23	23	23
Si	2.418	6.624	7.891	7.692
Al	1.580	2.047	0.240	0.468
Ti	0.001	0.034	0.002	0.014
Fe+++	0.000	0.607	0.000	0.461
Fe++	0.001	1.828	3.807	0.775
Mn	0.002	0.003	0.004	0.028
Mg	0.008	1.857	2.771	3.563
Ca	0.586	1.846	0.252	1.799
Na	0.391	0.285	0.039	0.062
K	0.001	0.053	0.002	0.000

Mol-% K, 6.9 bis 10.8 Mol-% Na und 0.0 bis 5.1 Mol-% Ca. Die Muskovite besitzen einen geringen Gehalt an Celadonit-Komponente (Si = 6.1–6.3 pro Formeleinheit).

Margarit

In den Margarit-Analysen variiert der Ca-Einbau von 78.1 bis 89.9 Mol-%; der Na-Einbau ist mit 9.6 bis 20.9 Mol-% deutlich höher als in Muskovit; der K-Einbau variiert von 0.0 bis 8.5 Mol-% (Abb. 2b).

Die relativ hohen Ca-Gehalte in Muskovit und relativ hohen K-Gehalte in Margarit der Probe MF1755 lassen eine feine Verwachsung beider Hellglimmer vermuten.

Die Si/Al-Verhältnisse von Margarit sind mit 0.519 bis 0.591 durchwegs höher als der

Idealwert des reinen Endgliedes mit Si/Al = 0.50. Diese Feststellung wurde bereits von FREY et al. (1982) gemacht.

Biotit

Die Biotite sind innerhalb der Proben ziemlich homogen; beim Vergleich zwischen den Proben lassen sich jedoch Unterschiede feststellen.

Die Biotite der Hellglimmer-freien Proben besitzen mit 1.71 bis 1.91 (MF1744) und 0.50 bis 0.72 (MF1739) die höchsten respektive tiefsten Mg/Fe-Verhältnisse. Die restlichen vier Proben sind diesbezüglich sehr homogen (0.80–1.12). Alle Proben zeigen eine deutlich negative Korrelation zwischen (Mg+Al^{VI}) und (Ti+Fe) (Abb.3).

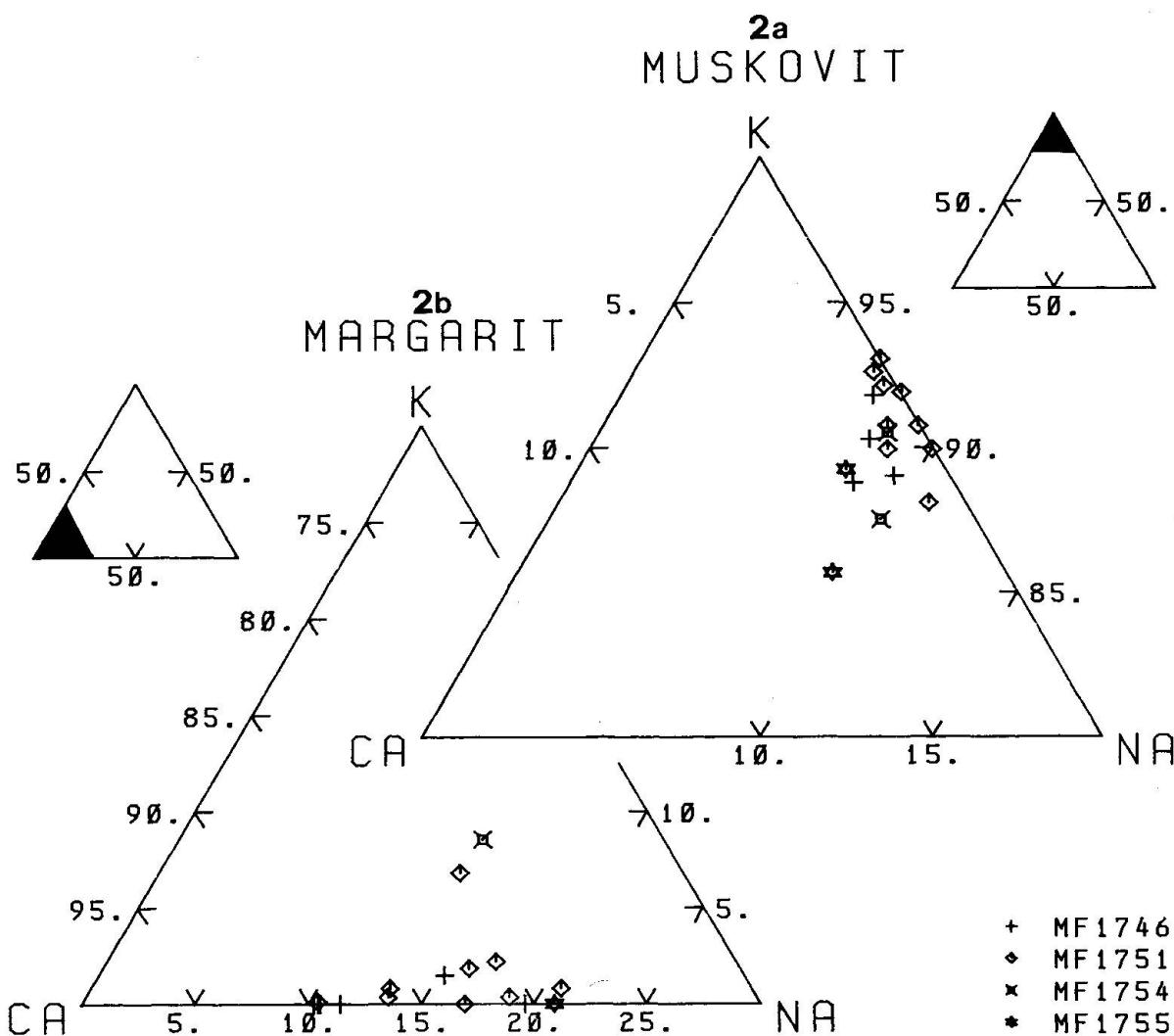


Abb. 2 K-Ca-Na-Diagramm für Hellglimmer. In Abb. 2a sind die Analysen von Muskovit, in Abb. 2b jene von Margarit dargestellt.

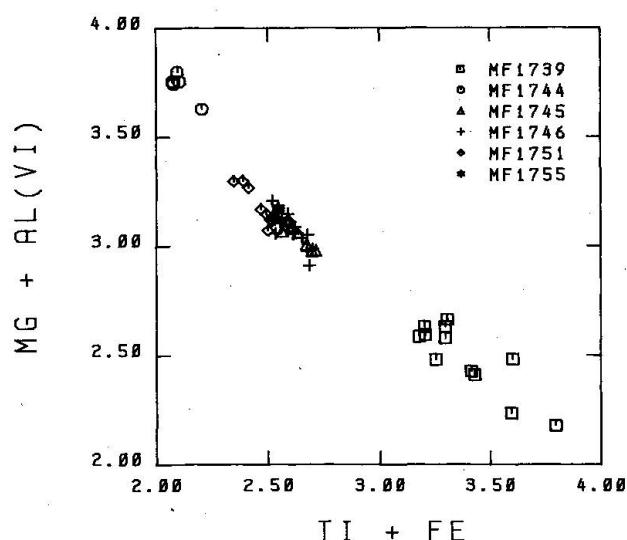


Abb. 3 (Ti+Fe) vs (Mg+Al^{VI})-Diagramm für Biotit. Deutlich ist die negative Korrelation ersichtlich.

Karbonate

Die Calcite zeichnen sich in den beiden analysierten Proben durch einen deutlich unterschiedlichen Chemismus aus. Während in Probe MF1744 FeO von 1.33 bis 1.64 Gew.-% resp. MgO von 0.19 bis 0.69 Gew.-% variiert, schwanken die Werte in Probe MF1754 für FeO von 2.96 bis 3.61 Gew.-% und für MgO von 1.73 bis 2.07 Gew.-%. Damit erreichen Mg und Fe umgerechnet auf die Strukturformeln in Probe MF1744 einen Anteil von 0.5 bis 2 Mol.-%, in Probe MF1754 von etwa 4 bis 5 Mol.-%.

Die FeO-Gehalte für die Ankerite bewegen sich zwischen 11.25 und 12.58 Gew.-%. (Fe+Mn) füllen den Mg-Platz mit über 30%.

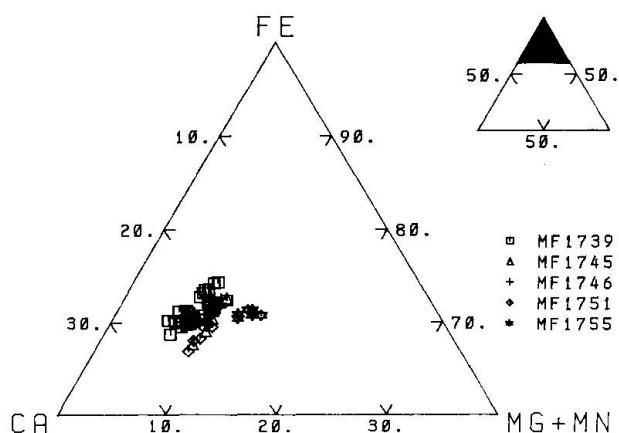


Abb. 4 Granat-Analysen im Fe-Ca-(Mg+Mn)-Diagramm.

Granat

Die Granat-Analysen wurden auf acht Kationen normiert ($X+Y+Z$ -Plätze). Die Analysen zeigen innerhalb einer einzelnen Probe nur geringe Variationen. Die Granate sind durchwegs Almandin-reich (66.5 bis 76.7 Mol-%, vgl. Abb. 4). Der Grossular-Anteil schwankt zwischen 10.2 und 22.4 Mol-%, jener von Pyrop zwischen 4.9 und 11.1 Mol-%. Der Spessartin-Anteil erreicht lediglich in den Proben MF1751 und MF1755 Werte von 1 bis 3 Mol-%, während er in den anderen Proben 1 Mol-% nicht übersteigt.

In der Probe MF1751 erweist sich der Chemismus als unabhängig von der Granat-Ausbildung: Sowohl Granat-Porphyroblasten wie auch die siebartig ausgebildeten Granate zeigen den selben Chemismus.

Plagioklas

Die Plagioklas-Analysen widerspiegeln eine grosse Inhomogenität innerhalb einzelner Körner (vgl. Tab. 2): der Anorthit-Gehalt variiert von 49.5 bis 73.9 Mol-%. Große Variationen im Anorthit-Gehalt wurden auch von GÜNTHERT et al. (1985) in Plagioklasen aus amphibolitfaziellen Karbonat-führenden Gesteinen des Lepontins mitgeteilt. Der K-Anteil ist stets gering (< 0.004 Mol-%).

Clinozoisit

Die Clinozoisite wurden auf 12.5 Sauerstoff normiert, Eisen als Fe_2O_3 verrechnet. Obwohl optisch sehr inhomogen, erweisen sich die Clinozoisite in allen Fällen als chemisch konstant. Der wichtigste Ersatz ist der Einbau von 10 bis

12 Mol-% Fe^{3+} auf Kosten von Al^{VI} . Mg und Ti sind nur in geringen Mengen vorhanden (bis 0.061 Mg, bis 0.021 Ti pro Formeleinheit).

AMPHIBOLE

Alle Amphibol-Analysen (Tab. 2) wurden auf 23 Sauerstoff normiert, da weder OH noch F oder Cl analysiert wurde.

Die Namengebung erfolgte gemäss der IMA-Konvention (LEAKE, 1978; ROCK and LEAKE, 1984).

Ca-Amphibole

Der Grossteil der *Aktinolith*-Analysen fällt in den Mg-reichen Teil des Aktinolith-Feldes (Abb. 5); zwei Analysen sind noch Mg-reicher (Tremolite), eine zeigt einen geringeren Gehalt an Si (aktinolithische Hornblende).

Die *Hornblende*-Analysen in Abb. 5 zeigen eine Verteilungswolke mit Anhäufungen im Fe-reichen Teil des Magnesio-Hornblende-Feldes bzw. im Mg-reichen Teil des Ferro-Tschermakit-Hornblende-Feldes. Dabei variiert Si zwischen 5.91 und 7.21, das $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ -Verhältnis zwischen 0.37 und 0.63 je Formeleinheit.

Cummingtonit

Cummingtonit zeigt einen konstanteren Chemismus als Hornblende: Si variiert von 7.40 und 8.03, das $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ -Verhältnis von 0.39 bis 0.46 je Formeleinheit.

In Abb. 6 wird die Beziehung zwischen Hornblende und Cummingtonit verdeutlicht. Abb. 6a zeigt einen Dünnschliff-Ausschnitt der Probe MF1739, in welchem scharfe Farbübergänge deutlich erkennbar sind. Werden die Amphibole bezüglich ihrem $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ betrachtet, so ergibt sich das in Abb. 6b dargestellte Bild: Cummingtonit liefert tieferen X_{Mg} -Werte als Hornblende, die Variation in Cummingtonit ist weniger ausgeprägt. Die X_{Mg} -Werte von Hornblende nehmen gegen Cummingtonit von 0.631 auf 0.510 respektive von 0.544 auf 0.529 ab. Cummingtonit seinerseits weist im Kern den tiefsten Wert von 0.387 auf. Dieser steigt gegen den Rand auf 0.400 bzw. 0.409 an.

Aus Amphiboliten des Schneebergerzuges beschreiben HOINKES und MOGESSIE (1986) konstanzierende Cummingtonite und Hornblenden. Bei Metamorphosebedingungen, die unse-

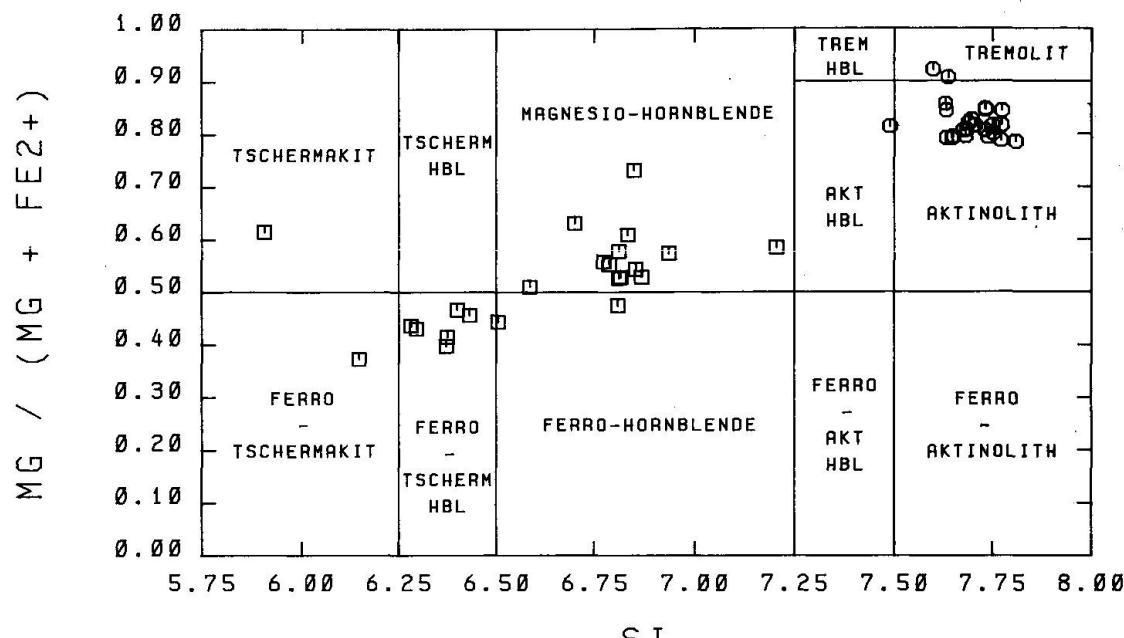


Abb. 5 Ca-Amphibol-Diagramm nach LEAKE (1978) für $(\text{Na} + \text{K})_A < 0.50$ und $\text{Ti} < 0.50$.

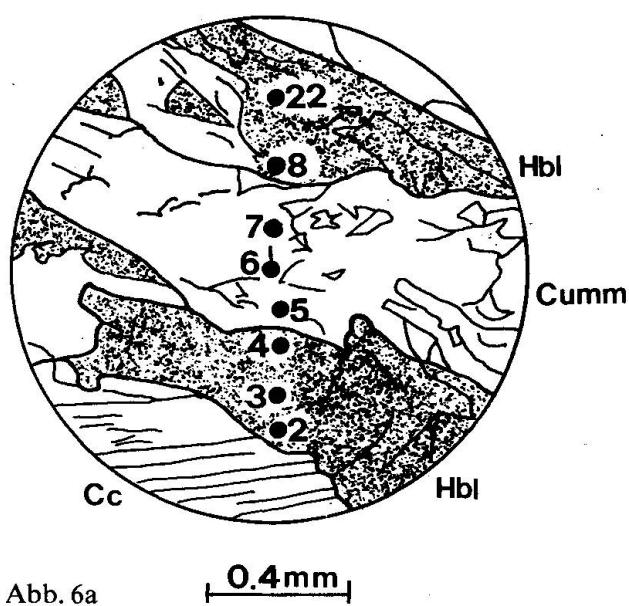


Abb. 6a

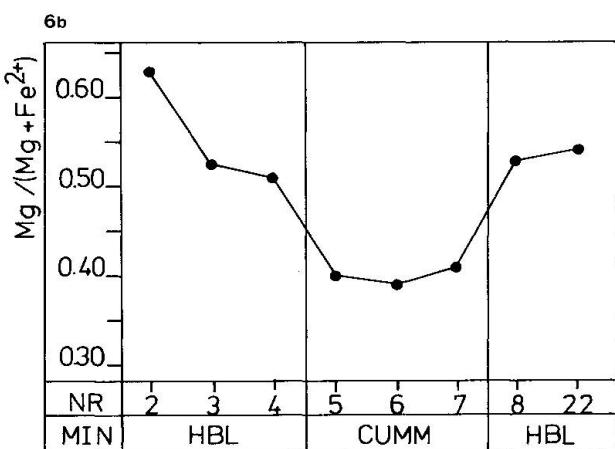


Abb. 6b

ren sehr ähnlich sind ($P = 5 \text{ kbar}$, $T = 550^\circ\text{C}$), liefern ihre Analysen X_{Mg} -Werte, welche für Cummingtonit stets höher sind als für Hornblende. In Probe MF1739 dagegen überschneiden sich die X_{Mg} -Werte: die Werte für Cummingtonit variieren von 0.387 bis 0.458, jene für Hornblende von 0.363 bis 0.511. Auch zeigen die X_{Mg} -Werte der Amphibole von HOINKES und MOGESSIE eine weit kleinere Streuung als in unserem Fall.

5. Bedingungen der Metamorphose

Im Folgenden werden die P-T-X-Bedingungen der Bohrkerne anhand von Paragenesen einerseits und Geothermometrie andererseits abgeschätzt. Dazu werden die aus der Literatur bekannten Druckwerte von 5–5.5 kbar verwendet (FOX, 1975; FREY, 1969; FREY et al., 1980).

Abb. 6 Beziehung zwischen Hornblende (Hbl) und Cummingtonit (Cumm) neben Calcit (Cc) in Probe MF1739. Abb. 6a zeigt einen Dünnschliff-Ausschnitt. In Abb. 6b sind die analysierten Amphibole bezüglich ihrem $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ dargestellt.

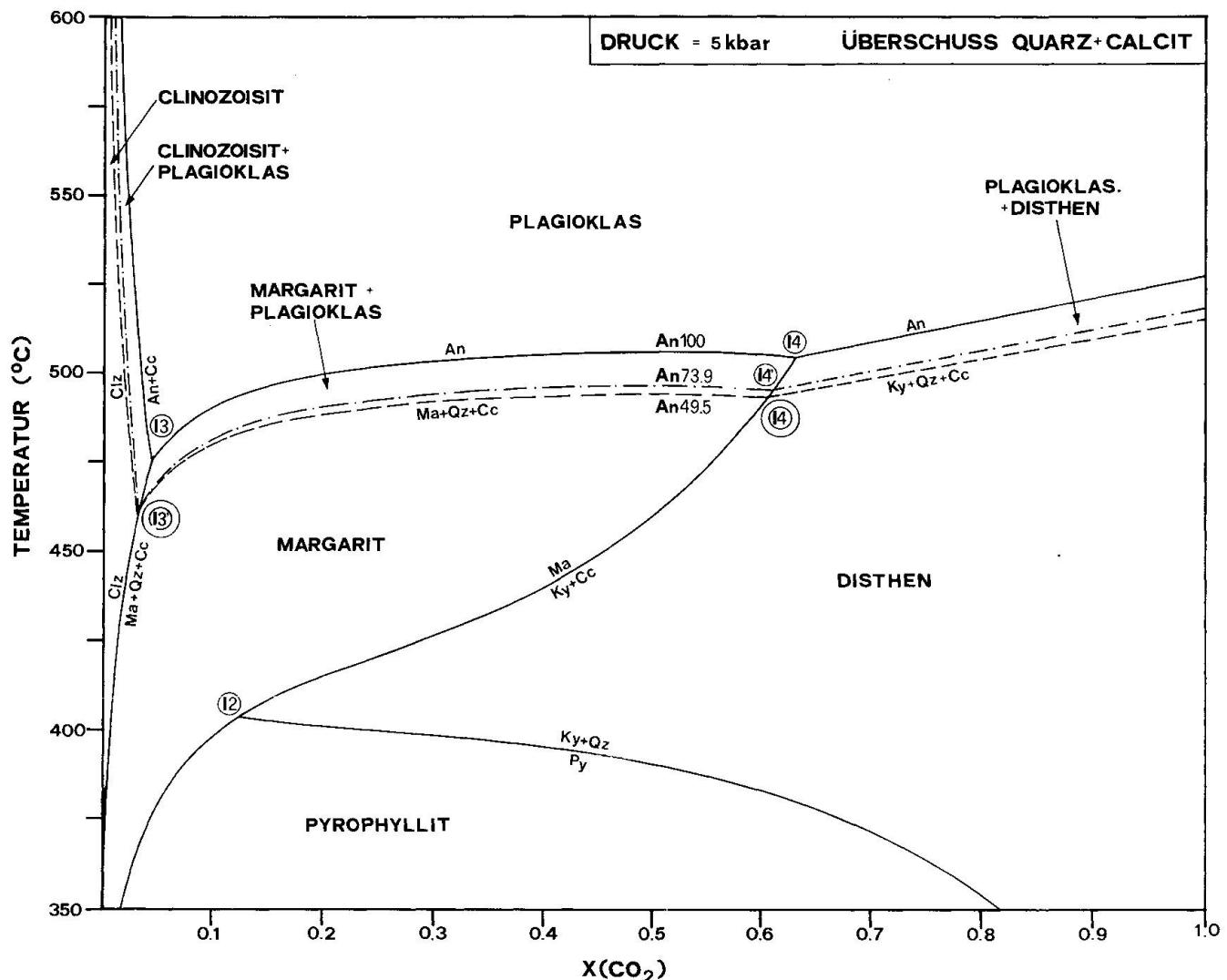


Abb. 7 T-X(CO₂)-Diagramm bei einem Druck von 5 kb und Überschuss an Calcit und Quarz. Datenbank nach BERMAN et al. (1985) für das System CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-CO₂ und den Mineralphasen Anorthit, Calcit, Clinzoisit, Corund, Disthen, Margarit, Pyrophyllit und Quarz. Nicht-ideales Mischen der Gasphase. Die Paragenese Ma+Qz+Cc+Clz+Plag ist im invarianten Punkt I3 stabil. Dieser verschiebt sich bei abnehmendem Anorthit-Gehalt von 475°C (An₁₀₀) auf 460°C (An_{73,9-49,5}). Für tiefe Anorthit-Gehalte bleibt die Temperatur praktisch unverändert. Weitere Erklärungen siehe Text.

5.1. MARGARIT-FÜHRENDE MERGEL

Neun der petrographisch untersuchten Bohrkerne sind Margarit-führende Mergel der liasischen Stgir-Serie. Folgende vier Teilparagenesen treten auf:

- (A) Ma+Qz+Clz (MF1745)
- (B) Ma+Qz+Cc (MF1748, MF1748/1)
- (C) Ma+Qz+Cc+Clz (MF1746, MF1747, MF1749, MF1754, MF1755)
- (D) Ma+Qz+Cc+Clz+Plag (MF1751)

Im System CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-CO₂ lassen sich u.a. die Phasen Anorthit, Calcit, Cli-

nozoisit, Corund, Disthen, Margarit, Pyrophyllit und Quarz darstellen. Mittels der thermodynamischen Datenbank von BERMAN et al. (1985) wurde nach PERKINS et al. (1986) ein T-X(CO₂)-Diagramm für einen Gesamtdruck von 5 kbar berechnet. Abb. 7 zeigt die Topologie im Temperatur-Intervall zwischen 350 und 600°C und für Überschuss an Quarz und Calcit.

Die Mehrzahl der untersuchten Proben ist graphitführend. Nach BUCHER et al. (1983) wird für X(CO₂) > 0.005 die Zusammensetzung der fluiden Phase durch die Anwesenheit von Graphit nicht beeinflusst. Die fluide Phase darf

daher in unserem Fall als binäres H_2O-CO_2 -System behandelt werden. Für die Gasphase wurde nicht-ideales Mischen angenommen (Berechnungen nach KERRICK und JACOBS, 1981).

Die uns interessierende Maximalparagenese (D), welche im invarianten Punkt I3 stabil ist, liegt für An_{100} bei $475^\circ C$ und $X(CO_2) = 0.04$.

Für einen Gesamtdruck von 4 kbar berechneten BUCHER et al. (1983, Fig. 4, 8 und 10), basierend auf der thermodynamischen Datenbank von HELGESON et al. (1978), das gleiche $T-X(CO_2)$ -Diagramm. Ihre Topologie ist identisch mit der unseren, hingegen liegt der isobar invariante Punkt I2 im Vergleich zu unserem Diagramm bei deutlich höherem $X(CO_2)$. Dadurch wird das Stabilitätsfeld von Disthen bei BUCHER et al. (1983, Abb. 8 und 10) auf $X(CO_2) > 0.5$ beschränkt.

Wird die Mischkristallreihe der Plagioklase zusätzlich in Rechenschaft gezogen, vergrößert sich das Stabilitätsfeld der Plagioklase mit abnehmendem Anorthit-Gehalt, und der invariante Punkt I3 verschiebt sich entlang der univarianten Reaktion $3Ma + 6Qz + 5Cc = 4Clz + 5CO_2 + H_2O$ gegen tiefere Temperaturen. In Probe MF1751 variiert der Anorthit-Gehalt zwischen 49.5 und 73.9 Mol-%. In Abb. 7 wird der invariante Punkt I3 und damit die Stabilitätsbedingung der Maximalparagenese um $-15^\circ C$ und $X(CO_2)$ um -0.01 auf $T = 460^\circ C$ bzw. $X(CO_2) = 0.03$ verschoben. Der Temperaturbereich, über welchen die isobar invariante Paragenese $Ma + Qz + Cc + Clz + Plag(An_{73.9-49.5})$ stabil bleibt, beträgt nur wenige Grad. Margarit + Plagioklas ($An_{73.9-49.5}$) ist über ein Temperatur-Intervall von maximal $3^\circ C$ stabil.

Wesentlich empfindlicher als auf die Plagioklas-Zusammensetzung reagiert die Topologie in Abb. 7 auf Druckänderungen. Eine Druckerhöhung um 500 bar führt zu rund 6 bis $18^\circ C$ höheren Temperaturen, $X(CO_2)$ bleibt unverändert resp. fällt um maximal 0.04.

5.2. GRANAT-BIOTIT-THERMOMETRIE

Das Granat-Biotit-Thermometer basiert auf dem Mg-Fe-Austausch zwischen koexistierenden Granat-Biotit-Paaren. In den letzten zehn Jahren wurde die Temperatur-Abhängigkeit des binären Mg-Fe-Austausches sowohl empirisch

(z. B. THOMPSON, 1976; HOLDAWAY und LEE, 1977) als auch experimentell (z. B. FERRY und SPEAR, 1978) kalibriert. Der Einbau von Ca und Mn in Granat respektive von Al^{VI} und Ti in Biotit beeinflusst das Granat-Biotit-Thermometer (DALLMEYER, 1974a, 1974b). Für den Ansatz von FERRY und SPEAR gelten folgende Nebenbedingungen:

Granat:

$$(Ca + Mn) / (Ca + Mn + Fe + Mg) \leq 0.20$$

Biotit:

$$(Al^{VI} + Ti) / (Al^{VI} + Ti + Fe + Mg) \leq 0.15$$

Die in dieser Arbeit analysierten Granate erfüllen mehrheitlich obige Bedingung mit Werten zwischen 0.19 und 0.242, während einzig die Biotite der Probe MF1739 die Bedingung erfüllen; die anderen Proben zeigen Werte bis 0.215. Die Temperatur-Werte nach FERRY und SPEAR werden deshalb im Folgenden ausser acht gelassen.

In den Kalibrierungen von HODGES und SPEAR (1982) und HOINKES (1986) wird zusätzlich eine Korrektur für den Ca-Anteil im Granat vorgenommen. Der Mn-Anteil sollte zudem möglichst gering sein. Letztere Bedingung trifft auf die analysierten Granate zu. Der Einfluss von Al^{VI} und Ti im Biotit wird nicht berücksichtigt.

Die Unsicherheit der einzelnen Thermometer wird auf $\pm 50^\circ C$ geschätzt. Die Temperaturen wurden für einen Druck von 5 kbar berechnet.

In Tab. 3 sind alle Thermometriedaten zusammengestellt. Für die Berechnungen wurden jeweils die Durchschnittszusammensetzungen für Biotit und Granat verwendet. Mit Ausnahme von Probe MF1755, die schlechter belegt ist, schwankt die Anzahl der Biotit-Analysen zwischen 7 und 18 pro Probe, jene der Granat-Analysen zwischen 6 und 16 pro Probe.

Im binären Mg-Fe-System variieren die Temperatur-Werte von 446 bis $559^\circ C$. Unter Miteinbezug der Korrektur für den Ca-Anteil im Granat erhöhen sich die Temperaturen auf 528 bis $650^\circ C$, was einer Erhöhung um 27 bis $92^\circ C$ entspricht. Die Proben MF1739 und MF1751 liefern die höchsten respektive niedrigsten Temperaturen. Dies dürfte auf ihre Gesamtgesteinschemismen zurückzuführen sein, welche die Bildung von Hornblende und Cummingtonit (MF1739) bzw. von Plagioklas (MF1751) ermöglichten. Zudem erlauben Dünnschliff-Beobachtungen sowie Mikroson-

Tab. 3 Granat-Biotit-Thermometriedaten.

PROBE	$x_{\text{Fe}}^{\text{Bi}}$	$x_{\text{Phl}}^{\text{Bi}}$	$x_{\text{Ann}}^{\text{Bi}}$	$x_{\text{Fe}}^{\text{Ga}}$	$x_{\text{Alm}}^{\text{Ga}}$	$x_{\text{Pyr}}^{\text{Ga}}$	$x_{\text{Gro}}^{\text{Ga}}$	$x_{\text{Spe}}^{\text{Ga}}$	HOLDAWAY & LEE (1976)	FERRY & SPEAR (1978)	HODGES & SPEAR (1982)	HOINKES (1986)	
MF1739	.614	.345	.549	.912	.712	.069	.214	.004	559	546	531	612	650
MF1745	.531	.385	.435	.895	.704	.083	.207	.007	525	517	490	567	602
MF1746	.520	.389	.427	.899	.713	.080	.202	.005	510	503	471	543	595
MF1751	.502	.406	.409	.900	.687	.077	.224	.013	489	484	446	528	551
MF1755	.495	.420	.412	.882	.710	.095	.170	.025	522	514	486	549	590

$x_{\text{Fe}}^{\text{Bi}} = \text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ $x_{\text{Phl}}^{\text{Bi}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Ti})$ $x_{\text{Ann}}^{\text{Bi}} = \text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Ti})$

$x_{\text{Fe}}^{\text{Ga}} = \text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ $x_{\text{Alm}}^{\text{Ga}} = \text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca}+\text{Mn})$ $x_{\text{Pyr}}^{\text{Ga}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca}+\text{Mn})$

$x_{\text{Gro}}^{\text{Ga}} = \text{Ca}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca}+\text{Mn})$ $x_{\text{Spe}}^{\text{Ga}} = \text{Mn}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca}+\text{Mn})$

den-Untersuchungen den Schluss, dass Probe MF1739 durch Deformation nach Einstellung des Granat-Biotit-Gleichgewichts zusätzlich beeinflusst worden ist. Möglicherweise ist ein Zusammenhang mit der Amphibol-Bildung zu suchen. Die Temperaturen der Probe MF1739 werden als zu hoch betrachtet.

5.3. CALCIT-DOLOMIT

Das Calcit-Dolomit-Thermometer basiert auf der Mischungslücke im binären System $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$. BICKLE und POWELL (1977) berücksichtigen zusätzlich den Einbau von Fe in Calcit und Dolomit. Sie schätzen dabei die Temperatur-Unsicherheiten auf $\pm 30^\circ\text{C}$. Die chemischen Analysen ergaben für die Karbonate der Probe MF1754 folgende Thermometriedaten: für Calcit mit 0.40 Gew.-% MnO ein X_{Fe} von 0.044 und ein X_{Mg} von 0.045, für Dolomit mit 0.59 Gew.-% MnO ein X_{Fe} von 0.170.

Bei einem Druck von 5 kbar erhalten wir somit eine Temperatur von 566°C (Fe-Gehalt in Cc) resp. von 547°C (Fe-Gehalt in Dol). Unter Verwendung der Arbeit von ANOVITZ und ESSENE (1987) ergibt sich eine Temperatur von 552°C .

6. Schlussbemerkungen

Die Temperaturabschätzungen für die alpine Regionalmetamorphose an mesozoischen Metasedimenten der Bohrung Sta. Maria I er-

gaben widersprüchliche Resultate. Bei einem angenommenen Gesamtdruck von 5 kbar erhielten wir folgende Ergebnisse:

- 460°C für die Paragenese Margarit + Quarz + Calcit + Clinozoisit + Plagioklas (Probe MF1751);
- $528\text{--}602^\circ\text{C}$ für die Granat-Biotit-Thermometrie, welche den Einfluss von Ca im Granat berücksichtigt (vier Proben, ohne MF1739);
- $547\text{--}566^\circ\text{C}$ für die Calcit-Dolomit-Thermometrie (Probe MF1754).

Es sind weitere Untersuchungen notwendig, bevor diese unterschiedlichen Temperaturangaben gedeutet werden können.

Verdankungen

Herrn Prof. M. Frey möchte ich für die zur Verfügung gestellten Bohrkerne und für seine stete Bereitschaft zur Diskussion herzlich danken. Die Mikrosonden-Analysen entstanden unter der Mithilfe von Prof. H. Schwander. Herrn Dr. H.-R. Pfeifer, Lausanne, danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Für Diskussionen haben sich H. U. Fischer und U. Glasmacher, Aachen, Zeit genommen.

Literaturverzeichnis

- AEBERLI, U. (1974): Tiefbohrung Sta. Maria I. Geologischer Schlussbericht. SBB Dokumentationsdienst 3.5874 Bau-tb.
 ANOVITZ, L. M. und ESSENE, E. J. (1987): Phase equilibria in the system $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3$. J. Petrol. 28, 389–414.

- BERMAN, R., BROWN, T.H. and GREENWOOD, H.J. (1985): An internally consistent data base for minerals in the system Na_2O - K_2O - CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - TiO_2 - H_2O - CO_2 . Atomic energy of Canada technical report TR-377.
- BICKLE, M.J. and POWELL, R. (1977): Calcite-dolomite geothermometry for iron-bearing carbonates. The Glockner Area of the Tauern Window, Austria. *Contrib. Mineral. Petrol.* 59, 281-292.
- BUCHER, K., FRANK, E. and FREY, M. (1983): A model for the progressive regional metamorphism of margarite-bearing rocks in the Central Alps. *Amer. J. Sci.* 283-A, 370-395.
- CHADWICK, B. (1965): The structural and metamorphic geology of the Lukmanier region, Ticino-Grisons, Switzerland. Ph. D. thesis, London.
- CHADWICK, B. (1968): Deformation and metamorphism in the Lukmanier region, Central Switzerland. *Geol. Soc. Am. Bull.* 79, 1123-1150.
- DALLMEYER, R.D. (1974a): The role of crystal structure in controlling the partitioning of Mg and Fe^{2+} between coexisting garnet and biotite. *Amer. Mineralogist* 59, 201-203.
- DALLMEYER, R.D. (1974b): Metamorphic history of the Northeastern Reading Prong, New York and Northern New Jersey. *J. Petrol.* 15, 325-359.
- DIRKS, P. (1986): A structural analysis of the Mesozoic cover sediments of the Gotthard Massif at Nufenen and Lukmanier, Switzerland. A comparison. Unpublished diploma thesis, Univ. Utrecht.
- ETTER, U. (1987): Stratigraphische und strukturgeo-logische Untersuchungen im gotthardmassivischen Mesozoikum zwischen dem Lukmanierpass und der Gegend von Ilanz. Unveröffentlichte Dissertation, Geol. Inst. der Univ. Bern.
- FERRY, J.M. and SPEAR, F.S. (1978): Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.* 66, 113-117.
- FISCHER, M. (1986): Zur Petrographie der Bohrung Sta. Maria I, Lukmanierpass. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Mineral.-petrograph. Inst. der Univ. Basel.
- Fox, J.S. (1974): Petrology of some low variance metapelites from the Lukmanier Pass area, Switzerland. Ph.D. thesis, Cambridge University.
- Fox, J.S. (1975): Three-dimensional isograds from the Lukmanier Pass, Switzerland, and their tectonic significance. *Geol. Mag.* 112, 547-564.
- FREY, J.D. (1967): Geologie des Greinagebietes (Val Camadra-Valle Cavalsca-Val di Carciolo-Passo della Greina). *Beitr. geol. Karte Schweiz NF* 131.
- FREY, M. (1969): Die Metamorphose des Keupers vom Tafeljura bis zum Lukmaniergebiet. *Beitr. geol. Karte Schweiz NF* 137.
- FREY, M. (1978): Progressive low-grade metamorphism of a black shale formation, Central Swiss Alps, with special reference to pyrophyllite and margarite bearing assemblages. *J. Petrol.* 19, 93-135.
- FREY, M. and ORVILLE, P.M. (1974): Plagioclase in margarite-bearing rocks. *Amer. J. Sci.* 274, 31-47.
- FREY, M., BUCHER, K., FRANK, E. and MULLIS, J. (1980): Alpine metamorphism along the Geotra-verse Basel-Chiasso - a review. *Eclogae geol. Helv.* 73, 527-546.
- FREY, M., BUCHER, K., FRANK, E. and SCHWANDER, H. (1982): Margarite in the Central Alps. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 62, 21-45.
- GÜNTHER, A., SCHWANDER, H., STERN, W.B. und FRANK, E. (1985): Anorthitgehalt an Plagioklas in karbonatführenden Gesteinen der Amphibolitfazies der Zentralalpen (Tosa-Tessin-Region). *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 65, 159-210.
- HELGESON, H.C., DELANY, J.M., NESBITT, H.W. and BIRD, D.K. (1978): Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals. *Amer. J. Sci.* 278-A.
- HODGES, K.V. and SPEAR, F.S. (1982): Geother-mometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *Amer. Mineralogist* 67, 1118-1134.
- HOINKES, G. (1986): Effect of grossular-content in garnet on the partitioning of Fe and Mg between garnet and biotite. *Contrib. Mineral. Petrol.* 92, 393-399.
- HOINKES, G. and MOGESSIE, A. (1986): Coexisting cummingtonite and calcic amphibole in amphi-bolites from the Schneeberg Complex, Tyrol, Austria. *Tscherm. mineral. petrogr. Mitt.* 35, 33-45.
- HOLDAY, M.J. and LEE, S.M. (1977): Fe-Mg cor-dierite stability in high grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural obser-vations. *Contrib. Mineral. Petrol.* 63, 175-198.
- KERRICK, D.M. and JACOBS, G.K. (1981): A modified Redlich-Kwong equation for H_2O , CO_2 and H_2O - CO_2 mixtures at elevated pressures and tem-peratures. *Amer. J. Sci.* 281, 735-767.
- LEAKE, B.E. (1978): Nomenclature of amphiboles. *Amer. Mineralogist* 63, 1023-1052.
- PERKINS, E.H., BROWN, T.H. and BERMAN, R.G. (1986): PT-System, TX-System, PX-System: Three programs which calculate pressure-temper-ature-composition phase diagrams. *Computers Geosci.* 12, 749-755.
- ROCK, N.M.S. and LEAKE, B.E. (1984): The Inter-national Mineralogical Association amphibole nomenclature scheme: computerization and its consequences. *Min. Mag.* 48, 211-227.
- SCHWANDER, H. und GLOOR, F. (1980): Zur quantita-tiven Mikrosondenanalyse von geologischen Proben mittels kombiniertem EDS/WDS. X-Ray Spectrometry 9, 134-138.
- SIBBALD, T.I.T. (1971): The structural and metamor-phic geology of the Val Piiora region, Ticino, Switzerland. Ph.D. thesis, London.
- THAKUR, V.C. (1973): Events in the Alpine deforma-tion and metamorphism in the Northern Pennine Zone and Southern Gotthard Massif regions, Switzerland. *Geol. Rundschau* 62, 549-563.
- THOMPSON, A.B. (1976): Mineral reactions in pelitic Rocks: II. Calculation of some P-T-X(Fe-Mg) phase relations. *Amer. J. Sci.* 276, 425-454.

Manuscript erhalten 17. Februar 1988; ergänztes Manuscript angenommen 25. März 1988.