

## METAMORPHOSEBEDINGUNGEN IN DER GFÖHLER EINHEIT

K. PETRAKAKIS

### Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Metamorphosebedingungen von Gesteinen aus der Gföhler Einheit wurden ein Opx+Gr- Gneis und ein Cpx+Gr Amphibolit, beide aus den, die Granulite und Gföhler Gneise begleitenden Serien, herangezogen. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe der Ge0Calc Software, welche die zu berechnenden Metamorphosebedingungen nicht nur an Hand vereinzelter, womöglich auf inkonsistenten thermodynamischen Daten beruhender Reaktionen, sondern auf die Gesamtheit aller im Rahmen des definierten thermodynamischen Systems möglichen stabilen und metastabilen univarianten Gleichgewichten ermittelt. Diese Methode setzt eine intensive Mikroanalytik aller beteiligten Phasen voraus. Die erste Probe weist textuelle und mineralchemische Merkmale auf, die auf eine Annäherung des Gleichgewichtszustandes hinweisen. Zur Berechnung der Metamorphosebedingungen wurden gemittelte Analysen aus dem internen Bereich der Mineralphasen verwendet. Die zweite Probe liefert Hinweise auf eine späte, partielle Einwirkung von Fluids niedriger Temperatur, die sekundäre Mineralbildungen verursacht haben. Allerdings sind noch in dieser Probe textuelle Merkmale erhalten, die auf eine Gleichgewichtseinstellung hinweisen. Zur Berechnung der Metamorphosebedingungen wurden einzelne Granat- und Einschlußanalysen verwendet. In beiden Fällen liegt der berechnete P,T-Bereich bei 750 °C und 8.5-9.0 kbar. Wird die Distanz von ca. 50 km zwischen beiden entnommenen Proben betrachtet, dann lassen sich aus den oben angegebenen Werten konstante P,T-Bedingungen über weite Bereiche der Gföhler Einheit während der prägenden Metamorphose vermuten.

### Abstract

Two rocks, a mafic Opx+Gr-gneiss and a Cpx+Gr-amphibolite, both accompanying the granulites of the Gföhl unit were used for the estimation of the condition of the latter. The calculation of P and T was carried out by means of the Ge0Calc software. This enables the calculation of the thermodynamic parameters on the grounds of all stable and metastable reactions, which may be defined for the rock system. Further on, the Ge0Calc software is primarily based on a file of standard thermodynamic data for minerals, which are characterized by a high internal consistency. The application of the method needs the accurate microanalysis of all mineral constituents of the rock. The first of the two samples shows textural and mineral compositional features indicating a close attainment to equilibrium. In this case averaged analyses of the mineral interiors were used for the calculation. The second sample shows late, partial retrogression due to Ca rich fluids. Nevertheless, the primary textural and paragenetic relations are locally still preserved. The garnets in this sample are poikiloblastic showing a distinct inclusions' distribution. In this case analyses of mineral inclusions and near by garnets were used for the calculation. The estimated P,T-conditions approximate 750°C and 8.5-9.0 kbar for both samples. In view of the distance (50 km) between the sampling areas of both samples the constancy of the P,T-conditions on a regional scale may be postulated.

## 1. EINLEITUNG

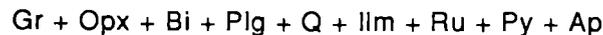
Unser heutiger Wissensstand über die Metamorphosebedingungen der Gföhler Einheit beschränkt sich primär auf die Arbeit von Scharbert und Kurat (1974), die mit Hilfe von Mikrosondendaten und den damals bekannten experimentell bestimmten Phasenbeziehungen die P,T-Bildungsbedingungen der Granulite mit 760° C und 11 kbar festlegten. Diese Bedingungen haben allgemein Eingang in die relevante Literatur (z.B. Fuchs und Matura 1980) als repräsentative Werte für die Metamorphosebedingungen innerhalb der gesamten Gföhler Einheit gefunden.

In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Arbeiten am Institut für Petrologie der Universität Wien durchgeführt, die die Aufklärung der Metamorphosebedingungen der Bunten Serie betreffen (Zaydan und Scharbert 1983; Petrakakis 1984, 1986a, 1986b; Hödl 1985; Kuschnig 1986; Högelsberger 1989). Petrakakis (1986a, 1986b) konnte aufgrund von Detailstudien von Gneisen aus der südlichen Bunten Serie zeigen, daß die prägende Metamorphose durch Bedingungen von 700 - 770 °C und 6-9 kbar unter aH<sub>2</sub>O << 1 gekennzeichnet ist. Er äußerte die Vermutung, daß angesichts der eingangs erwähnten P,T-Bedingungen in der Gföhler Einheit kein wesentlicher Metamorphosesprung zwischen beiden Einheiten und insbesondere im südlichen Bereich existiert. Somit würde ein wesentliches Merkmal, welches zur Abtrennung der Bunten Serie von der Gföhler Einheit herangezogen wurde (Fuchs 1976; Fuchs und Matura 1976; Matura 1976), wegfallen.

In der vorliegenden Arbeit wird kurz über die Bildungsbedingungen von zwei Proben berichtet, die beide charakteristischen Gesteinen der Gföhler Einheit angehören. Die erste Probe (88-GE-31) stammt aus dem Gelände des Bahnhofes Weitenegg und gehört zu der die Gföhler Einheit begleitenden Amphibolitserie. Die zweite Probe (GE-SL-40A/2) stammt von einem Aufschluß an der Straße Steinegg-St.Leonhard, etwa 1,5 km südlich der Kampbrücke bei Steinegg. Sie gehört zu der die St.Leonharder Granulite begleitenden Serie und tritt im Verband mit (Gr-Cpx)- Amphiboliten auf.

## 2. BESCHREIBUNG DER GESTEINE

Die Probe 88-GE-31 ist ein dunkelgrauer mafischer Gneis, mit der Paragenese



Das Gestein ist schwach gebändert. Makroskopisch kann man Biotit und Feldspat erkennen. Letztere bilden manchmal 1-2 mm augenförmige Schlieren, die parallel zur Schieferung des Gesteins liegen.

Man kann unter dem Mikroskop zwei Größen vom Granat erkennen: wenige, größere Kristalle, die eine leichte Resorption aufweisen, und viel kleinere, in der Regel idioblastisch bis subidioblastisch geformte Körner, die gleichmäßig über den Schliiff verteilt sind. Die größeren Granate führen allgemein wenige Einschlüsse

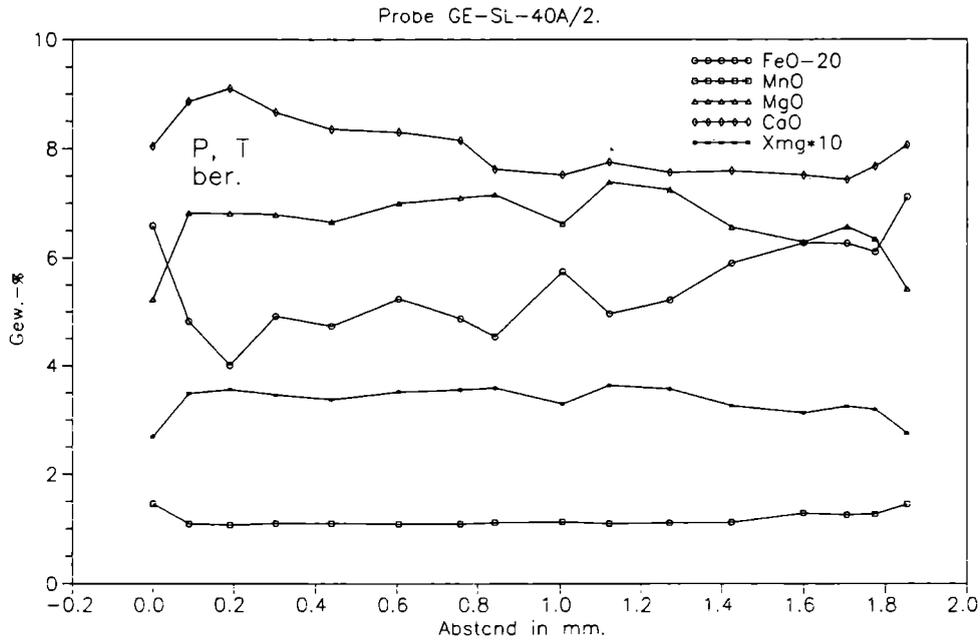


Fig.1: Profil durch einen größeren Granat in der Probe 88GE-31.

Granat	Rand (28)		Inneres (15)	
Xmg	0.273	0.024	0.299	0.022
Opx	Rand (10)		Inneres (10)	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.79	0.10	1.65	0.10
Xmg	0.603	0.033	0.584	0.031
Ilmenit	Matrix (20)		Einschl. (2)	
XTi	0.943	0.012	0.919	
XFe <sub>2</sub>	0.924	0.015	0.883	
XFe <sub>3</sub>	0.056	0.012	0.081	
Plag.	Rand (9)		Manche Kerne(4)	
an	0.449	0.023	0.373	0.014
ab	0.511	0.023	0.582	0.015
or	0.041	0.006	0.046	0.005

Tab. 1: Übersicht über die Zusammensetzung der in der Probe 88-GE-31 auftretenden Mineralphasen. Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Mittelwert und die Standardabweichung von Punktanalysenwerten, deren Anzahl in () angegeben ist. Formelberechnungen: Granat auf 12 O, Orthopyroxen auf 6 O, Ilmenit auf 3 O, Plagioklas auf 8 O.

von Rutil, Ilmenit, Biotit, Quarz und seltener Plagioklas. Seine häufigsten Begleitminerale sind Plagioklas, Quarz, Orthopyroxen und seltener, Biotit. Ein Profil durch einen repräsentativen, größeren Granat zeigt Fig.1. Er ist weitgehend homogenisiert bezüglich X<sub>Mg</sub>, Mn und Ca mit Ausnahme seines bis etwa 0.1 mm breiten Randes, der eine rasche Abnahme von Ca aufweist. Diese Ca-Abnahme ist nicht monoton. Sie erfolgt über ein kleines Plateau nahe dem äußersten Rand. Innerhalb dieser Zone bildet Mg (und X<sub>Mg</sub>) ein Maximum, nach außen hin nimmt es dann rasch ab. Fe steigt monoton innerhalb dieser Randzone an, weist jedoch einen Wendepunkt beim Maximum von Mg auf. Andere Granate aus derselben Probe und insbesondere die sehr häufigen kleinen Granate weisen ein ähnliches Verteilungsmuster am äußeren Rand auf. Allerdings ist der homogenisierte, zentrale Bereich weitgehend reduziert. Das Verteilungsmuster der Elemente am äußersten Rand der Granate weist auf mögliche Prozesse nach dem metamorphen Höhepunkt (Abkühlungseffekte, eventuelle Wiederaufwärmung der moldanubischen Gesteine, etc.; vgl. dazu Petrakakis 1986a und die darin angegebenen Referenzen) hin. Die Tab.1 gibt in kurzer Form die chemische Zusammensetzung der Granate an.

Orthopyroxen ist unter dem Mikroskop sehr schwach rosa-grau gefärbt. Er hat einen Achsenwinkel von  $2V$  ca.  $90^\circ$  und zeigt in entsprechenden Schnittlagen gerade Auslöschung. Seine Größe kann bis etwa 1 mm betragen. In den meisten Fällen tritt er in Form von subidioblastischen bis xenoblastischen Kristallen auf. Der Chemismus der Orthopyroxene ist in der Tab.1 angegeben. Kleine, jedoch nicht signifikante Unterschiede zwischen Rand- und Kernzusammensetzungen sind zu beobachten.

Der Plagioklas ist vollkommen xenoblastisch ausgebildet. Sein Durchmesser erreicht selten 1 mm. In manchen hellen Lagen des Gesteins treten aber bis etwa 5 mm große Plg-Megablasten auf, die ähnlich zusammengesetzt sind wie die kleineren Kristalle. Die Plagioklase sind im allgemeinen schwach invers zonargebaut. Der An-Gehalt variiert zwischen 43 und 47 %. In wenigen Fällen konnte ein An-ärmerer Kern mit etwa 35-39% An festgestellt werden (Tab.1). Da die einzigen Ca-führenden Phasen der Granat und der Plagioklas sind, läßt sich der inverse Zonarbau der Plagioklase mit der Ca-Abnahme am Granatrand korrelieren.

Rotbraun gefärbter Biotit ist reichlich in der Matrix vorhanden. Er tritt selten als Einschluß im Granat, häufiger jedoch in Quarz und Plagioklas auf.

Der Ilmenit tritt sowohl in der Matrix als auch im Granat eingeschlossen auf. Er weist einen nicht vernachlässigbaren Anteil an Hämatit-Komponente auf. Chemische Unterschiede zwischen beiden Auftretensarten sind in Tab. 1 deutlich erkennbar.

Rutil ist ein häufiger Einschluß im Granat; Pyrit ist diskret verteilt in der Matrix vertreten.

Die Amphibolitprobe GE-SL-40A/2 stammt aus dem Bereich des St.Leonharder Granulits. Sie ist durch die Paragenese



gekennzeichnet. Neben diesen Mineralen führt die Probe auch Titanit- und Calcit-Einschlüsse im Granat und Prehnit.

Prehnit ist nur entlang von Bruchflächen, in deren Nähe die braune Hornblende stark ausgebleicht ist und die Plagioklase stark serizitisiert sind, zu finden. Seine Bildung ist auf die späte Einwirkung von Fluids niedriger Temperatur zurückzuführen.

Ilmenit ist besonders häufig in der Matrix anzutreffen. Die Mikrosondendaten und insbesondere ihre Formelberechnung auf Kationenbasis weisen darauf hin, daß sie etwa 7% Hämatit-Komponente enthalten (Tab.2). Ilmenit tritt auch als Einschluß im Granat auf. Seine Zusammensetzung ist praktisch ident mit jenen aus der Matrix.

Der Amphibolit ist durch den Reichtum an bis etwa 5 mm großen Granaten und die massige, schwach oder kaum geschieferten Textur charakterisiert. Megaskopisch kann man neben Amphibol auch Feldspat, Granat und Klinopyroxen erkennen.

Unter dem Mikroskop erkennt man gut equilibrierte granulare Texturen mit glatten Korngrenzen und deutlichen "triple junctions", besonders zwischen Plagioklas und Hornblende.

Granat variiert in seiner Größe. Er ist stark resorbiert und führt viele Einschlüsse, die in zwei Bereichen verteilt sind: Der zentrale Bereich wird durch Einschlüsse von Titanit, Calcit, Plagioklas und Klinopyroxen charakterisiert. Im intermediären und Randbereich treten Plagioklas, Hornblende, Klinopyroxen, Ilmenit und Rutil auf, während Calcit und Titanit stark zurücktreten. Diese Einschlußverteilung spricht für eine lange, höchstwahrscheinlich prograde Wachstumsperiode zumindest einiger großer Granate.

Fig.2 zeigt ein Profil durch einen größeren Granat aus der Probe GE-SL-40A/2. Dieser Granat ist bezüglich aller Komponenten homogenisiert. Die Xgrs-Verteilung weist ein undeutlich ausgebildetes Maximum innerhalb einer 0.2-0.3 mm breiten Zone auf, die vom resorbierten Rand nach innen reicht. Innerhalb dieser Zone sind die Hornblende-, Klinopyroxen-, Rutil- und Ilmenit-Einschlüsse zu finden. Die Mikrosondeanalysen zeigen außerdem eine systematische Änderung im Chemiesmus der Pyroxen- und Plagioklas-Einschlüsse. So werden z.B. im zentralen Bereich die Plagioklase durch An-Gehalte um 22% und die Klinopyroxene durch Xmg-Werte von etwa 0.85 charakterisiert. Im Randbereich hingegen liegen die Werte bei rund 50% An und 0.75-0.78 Xmg. Manche größere Plg-Einschlüsse im äußeren Bereich weisen An-arme Kerne (< 30% An) auf. Solche Einschlüsse sind unter dem Mikroskop durch ihre starke konzentrische Auslöschung auffallend. Es ist noch zu bemerken, daß dieselben Minerale in der Gesteinsmatrix annähernd

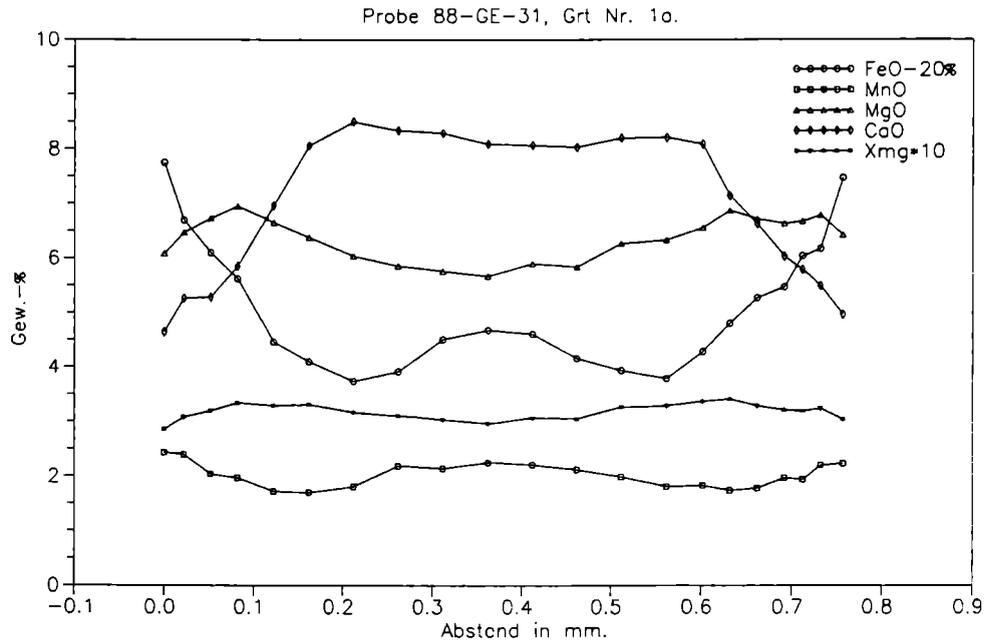


Fig.2: Profil durch einen repräsentativen Granat in der Probe GE-SL-40A/2. Die zur Berechnung der P,T- Bedingungen verwendeten Einschlüsse liegen nahe dem linken Randbereich.

<b>Granat nahe Einschuß (4)</b>			<b>Plagioklas-Einschuß (2)</b>	
<b>Xmg</b>	0.336	0.003	<b>an</b>	0.498
<b>Xgrs</b>	0.182	0.013	<b>ab</b>	0.499
			<b>or</b>	0.003
<b>Ilmenit- Einschuß (4)</b>			<b>Klinopyroxen-Einschuß (1)</b>	
<b>XTi</b>	0.936	0.007	<b>Xmg</b>	0.760
<b>XFe<sub>2</sub></b>	0.895	0.008	<b>Al<sup>IV</sup></b>	0.100
<b>XFe<sub>3</sub></b>	0.062	0.007	<b>Al<sup>VI</sup></b>	0.065

Tab. 2: Chemische Charakterisierung der zur Berechnung des Diagramms in Abb.4 verwendeten Mineraleinschlüsse. Zur Erläuterung der angegebenen Werte siehe auch Tab. 1.

ähnliche aber nicht identische Zusammensetzungen aufweisen wie die Einschlüsse im äußeren Granatbereich. Die markantesten Unterschiede sind bei den Pyroxenen und den Hornblenden zu beobachten. Zur Berechnung der P,T-Bildungsbedingungen wurden Einschluß- und benachbarte (jedoch nicht angrenzende) Granatanalysen aus dem äußeren Bereich ausgewählt (Tab.2).

### 3. BERECHNUNGSMETHODEN

Die vollständige Charakterisierung der Proben erfolgte durch umfassende Mikrosondenanalytik aller auftretenden Phasen. Die Analysen wurden im Mineralogisch-Petrographischen Institut der Universität Bern durchgeführt. Die Meßbedingungen betragen 15 kV /20 nA auf Messing bei einer EDS- bestückten ARL-SEMQ Mikrosonde. Als Standards wurden natürliche und synthetische Minerale verwendet. Die Meßergebnisse wurden nach ZAF korrigiert. Mittelwertbildung und Formelberechnungen der Mineralanalysen wurden mit Hilfe des Programmes MINSORT (Petraakis and Dietrich 1985) durchgeführt. Berechnungen von Fe<sup>3+</sup> beruhen auf Ladungsbilanzkriterien. Eine Zusammenfassung der Mineralanalysen ist in den Tab.1 und 2 zu finden. Eine komplette Dokumentation über den Chemismus der Mineralphasen ist in Vorbereitung.

Die Berechnung der P,T-Bedingungen erfolgte mit Hilfe des Ge0Calc Softwarepakets (Helgeson et al. 1981; Berman et al. 1985; Brown et al. 1987; Brown et al. 1988; Berman 1988, 1990). Die neueste Testversion des Hauptprogramms PTAX ermöglicht sowohl die Berechnung von stabilen und metastabilen univarianten Gleichgewichtskurven als auch deren Ausgabe am Bildschirm oder hochauflösenden Drucker. Das Programm ermöglicht eine Auswahl der zu berechnenden Diagramme (P-T, P-a, P-X, T-a, T-X, a-a), die Definition des interessierenden Bereiches der ausgewählten Achsenvariablen und die Definition des thermodynamischen Systems, bestehend aus beliebig vielen Komponenten und Phasen. Die Vorgangsweise des Programms ist folgende:

Zunächst wird die Anzahl von möglichen Reaktionen im definierten thermodynamischen System berechnet. Danach werden die stöchiometrischen Koeffizienten der ersten Reaktion berechnet, und mit Hilfe der thermodynamischen und thermochemischen Daten von entsprechenden Mischungsmodellen wird die Lage der Reaktionskurven innerhalb des ausgewählten Variablenbereiches definiert. Dabei wird die Lage der Reaktionskurve durch Nullstellensuche ihrer G-Funktion, die im allgemeinen ein Polynom höheren Grades darstellt, ermittelt. Die G-Funktion beinhaltet zusätzliche Terme, die die Abhängigkeit von G von Zusammensetzung, Ordnungsgrad und Phasentransformationen beschreiben. Sollte sich die errechnete Reaktion als metastabil in Bezug auf den definierten Variablenbereich oder auf alle anderen Phasenkombinationen erweisen, wird ihre Phasenassoziation zur Eliminierung derjenigen Reaktionen benützt, die eben diese metastabile Assoziation beinhalten. Dadurch wird die Anzahl der zu berechnenden Reaktionen und damit die Rechenzeit erheblich reduziert. In Abhängigkeit von der Auswahl des Benutzers (ob nur stabile oder stabile und metastabile Reaktionen innerhalb des definierten Variablenbereiches berechnet werden sollen) werden die Reaktionen

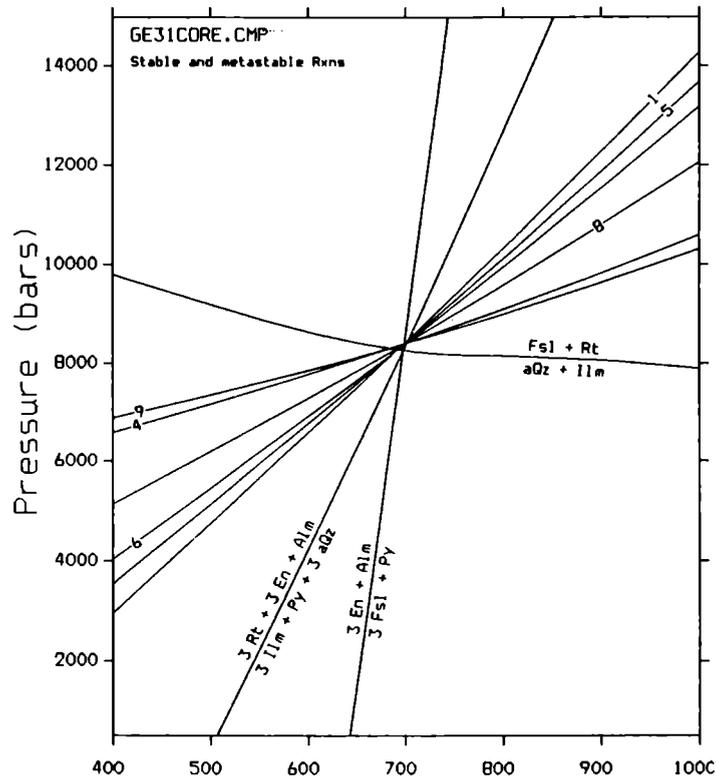


Fig.3: Berechnete stabile und metastabile Reaktionen in der Probe 88-GE-31.

1):	.....	2 Alm + Gr + 3 aQz = 6 Fsl + 3 An
2):	.....	3 En + Alm = 3 Fsl + Py
3):	.....	Fsl + Rt = aQz + Ilm
4):	.....	Gr + 2 Py + 3 aQz = 6 En + 3 An
5):	.....	3 Rt + Gr + 2 Alm = 3 An + 3 Fsl + 3 Ilm
6):	.....	2 Alm + Gr + 6 Rt = 3 aQz + 6 Ilm + 3 An
7):	.....	3 Rt + 3 En + Alm = 3 Ilm + Py + 3 aQz
8):	.....	3 Rt + Py + Gr + Alm = 3 An + 3 En + 3 Ilm
9):	.....	3 Rt + 2 Py + Gr + 3 Fsl = 3 An + 6 En + 3 Ilm

Abkürzungen:  
 Alm = Almandin, An = Anorthit, aQz = alpha-Quartz, Di = Diopsid, En = Enstatit,  
 Fsl = Ferrosilit, Gr = Grossular, Hd = Hedenbergit, Ilm = Ilmenit, Py = Pyrop, Rt =  
 Rutil.

Tab. 3: Stabile und metastabile Reaktionen in der Fig. 3, Probe 88-GE-31. Mineralasoziationen an der linken Reaktionsseite sind stabil bei höheren Werten von P bzw. T.

beschriftet, am Bildschirm gezeichnet und in eine Plot-Datei geschrieben. Letztere dient zur Reproduktion des berechneten Diagramms am Bildschirm oder hochauflösenden Drucker mit Hilfe von Hilfsprogrammen, die dem Ge0Calc beigelegt sind. Der oben skizzierte Vorgang wird bis zur Erschöpfung der Reaktionen wiederholt.

Die zur Berechnung der P,T-Bedingungen verwendeten thermodynamischen Standarddaten stammen aus der intern äußerst konsistenten Datenbank von Berman (1988) unter Berücksichtigung von Ergänzungen, die in Berman (1990) dokumentiert sind. Die Überschußfunktionen wurden für Granat nach Berman (1990) und für Plagioklas nach Fuhrman and Lindsley (1988) berechnet. Für Orthopyroxen, Klinopyroxen und Ilmenit-Hämatit-Mischkristalle wurde ideal cation mixing on sites herangezogen.

#### 4. ERGEBNISSE

Zur Berechnung der Bildungsbedingungen der oben beschriebenen Proben wurde zunächst das Fluid als Phase in beiden Proben und die Hornblende in der Probe GE-SL-40A/2 ausgeschlossen. Somit wurden die Bildungsbedingungen beider Proben nur an Hand von solid-solid Reaktionen ermittelt. In der Biotit-führenden Probe 88-GE-31 würde das Auftreten einer zusätzlichen wasserfreien Phase - wie Kalifeldspat - die Durchführung von Berechnungen der Wasseraktivität  $a_{H_2O}$  erlauben. Allerdings wäre dann ein geeignetes Mischungsmodell für den Biotit notwendig, obwohl ideal ionic mixing on sites als erste Annäherung genügen könnte. In der zweiten Probe kommt Hornblende reichlich vor. Die thermodynamische Datenbank von Berman (1988) enthält Standarddaten über den Tremolit. Zur Zeit fehlen jedoch geeignete Mischungsdaten für dieses Mineral und darüber hinaus würde die Einbeziehung von Fluid und Hornblende in die thermodynamische Berechnung zu zwei weiteren Variablen führen. Wie man jedoch in den Fig.3 und 4 erkennen kann, vermindert der Ausschluß von Fluid und Hornblende keineswegs die Genauigkeit der berechneten P,T-Bedingungen, da Ge0Calc alle möglichen Reaktionen zwischen den ausgewählten Phasen berechnet. Im Falle des Gleichgewichtes definieren diese Reaktionen einen invarianten Punkt (bzw. kleinen P,T-Bereich), der den Bildungsbedingungen entspricht. In Tab.1 und 2 sind die für jede Probe ausgewählten Phasen sowie ihre Zusammensetzung in Kurzform angegeben. Die Berechnung schließt stabile und metastabile Reaktionen ein, da beide Reaktionsarten gleich aussagekräftige Resultate liefern. Die Liste der Reaktionen in den Fig.3 und 4 ist in den Tab. 3 und 4 angegeben.

Wie aus den Fig.3 und 4 zu entnehmen ist, liegen die Bildungsbedingungen für beide Proben in einem Bereich von  $T = 720-750^{\circ} C$  und  $P = 8.5 - 9.0$  kbar. Dieser Druckbereich weicht erheblich vom Druck ab, den Scharbert und Kurat (1974) für die Granulitbildung vorgeschlagen haben. Die berechneten Bedingungen decken sich ausgezeichnet mit jenen aus der Bunten Serie (Petraakis 1986 a,b). Es ist jedoch notwendig zu unterstreichen, daß wirklich gültige Vergleiche nur dann vorgenommen werden können, wenn die Gesteine der Bunten Serie derselben strengen thermodynamischen Behandlung unterworfen würden.

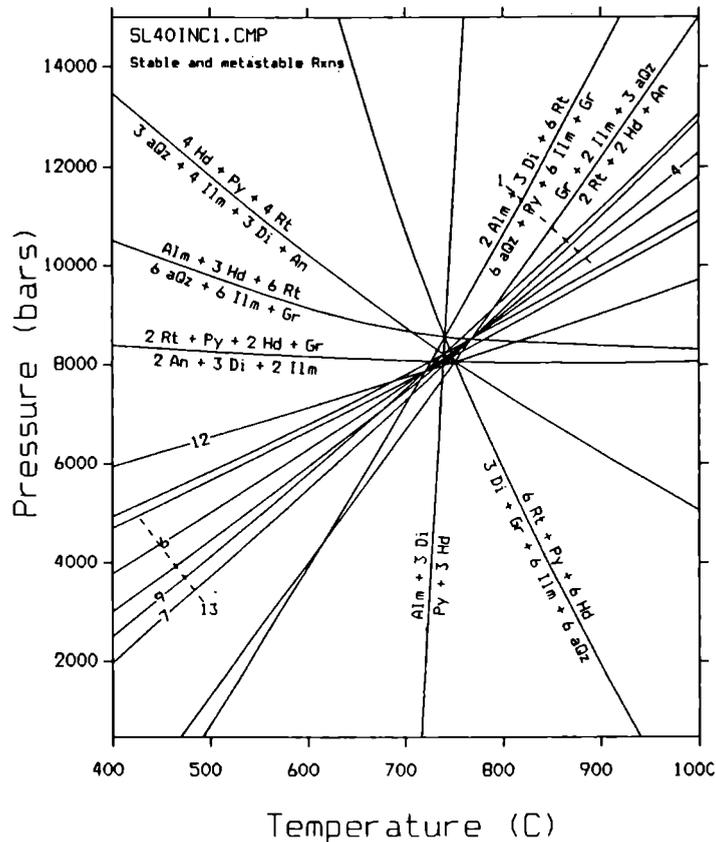


Fig.4: Berechnete stabile und metastabile Reaktionen in der Probe GE-SL-40A/2.

1):	Alm + Hd + 4 Rt = 3 aQz + 4 Ilm + An
2):	Gr + 2 Ilm + 3 aQz = 2 Rt + 2 Hd + An
3):	4 Hd + Py + 4 Rt = 3 aQz + 4 Ilm + 3 Di + An
4):	2 Rt + Gr + Alm = 2 An + Hd + 2 Ilm
5):	Alm + 3 Hd + 6 Rt = 6 aQz + 6 Ilm + Gr
6):	6 Rt + Gr + 2 Alm = 3 An + 6 Ilm + 3 aQz
7):	3 aQz + 2 Gr + Alm = 3 An + 3 Hd
8):	Alm + 3 Di = Py + 3 Hd
9):	4 Alm + 3 Di + 12 Rt = 9 aQz + Py + 12 Ilm + 3 An
10):	2 Rt + Py + 2 Hd + Gr = 2 An + 3 Di + 2 Ilm
11):	6 Rt + Py + 6 Hd = 3 Di + Gr + 6 Ilm + 6 aQz
12):	3 aQz + Py + 2 Gr = 3 An + 3 Di
13):	6 Rt + Py + 3 Gr + 2 Alm = 6 An + 3 Di + 6 Ilm
14):	2 Alm + 3 Di + 6 Rt = 6 aQz + Py + 6 Ilm + Gr

Tab. 4: Stabile und metastabile Reaktionen (Abb.4) und Zusammensetzung der Mineralphasen in der Probe GE-SL-40A/2. Mineralassoziationen in der linken Reaktionsseite sind bei höheren Werten von P bzw. T stabil. Abkürzungen wie in Tab. 3.

Bemerkenswert ist auch die Tatsache, daß die Fundpunkte der beiden untersuchten Gesteine eine Horizontalabstand von ca. 50 km aufweisen. Die Gleichheit der P,T-Werte zeigt, daß über beträchtliche Distanzen hinweg während des Metamorphosehöhenpunktes ganz ähnliche Bedingungen herrschten.

#### DANK

Der Autor bedankt sich beim FWF für die großzügige Unterstützung (Projekte Nr. J0340-GEO und S 4709-GEO). Großer Dank gilt auch Prof. Dr. W. Richter sowohl für die aufschlußreiche Diskussionen über diese Arbeit als auch für seine Unterstützung. Ebenfalls gedankt sei der Institutsleitung des Mineralogisch-Petrographischen Instituts der Universität Bern, insbesondere Prof. M. Engi, für die großzügige Unterstützung bei diesem Vorhaben.

#### 5. LITERATUR

- Berman, R.G., T.H. Brown, H.J. Greenwood, 1985: An internally consistent thermodynamic data base for Minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . Atomic Energy of Canada Ltd. Technical Report 377, 62p.
- Berman, R.G., 1988: Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . Journ. Petrol., **29**, 445-522.
- Berman, R.G., 1990: Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. Am. Mineralogist., **75**, 328-344.
- Brown, T.H., R.G. Berman, E.H. Perkins, 1987: GE0-CALC: A software package for rapid calculation of stable pressure-temperature- activity phase diagrams. Geol. Soc. Amer., 1987 Annual meeting (Abs), **19**, no. 7, 603.
- Brown, T.H., R.G. Berman, and E.H. Perkins, 1988: GE0-CALC: Software package for calculation and display of pressure-temperature- composition phase diagrams using an IBM or compatible personal computer. Computers & Geosciences. **14**, 279-289.
- Fuchs, G., 1976: Zur Entwicklung der Böhmisches Masse. Jb. Geol. B.-A., **119**, 45-61.
- Fuchs, G. und A. Matura, 1976: Zur Geologie des Kristallins der Südlichen Böhmisches Masse. Jb. Geol. B.-A., **119**, 1-43.
- Fuchs, G. und A. Matura, 1980: Die Böhmisches Masse in Österreich. In Oberhauser, (ed): Der geologische Aufbau Österreichs. S. 121-143, Springer, Wien.
- Fuhrman, M.L. and D.H. Lindsley, 1988: Ternary-feldspar modeling and thermometry. Amer. Min., **73**, 201-215.
- Högelsberger, G., 1989: Die Marmore und Kalksilikatgesteine der Bunten Serie - Petrologische Untersuchungen und geologische Konsequenzen. Jb. Geol. B.-A., **132**, 213-230.
- Helgeson, H.C., D.H. Kirkham and G.C. Flowers, 1981: Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: IV. Calculation of activity coefficients, osmotic coefficients and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600°C and 5 kbar. Amer. J. Sci., **281**, 1249-15-16.

- Hödl, M., 1985: Petrologie und Geochemie des Rehberger Amphibolites im Niederösterreichischen Moldanubikum. Dissertation, Institut. f. Petrologie, Univ. Wien.
- Kuschnig, G., 1986: Geochemie und Petrologie der Amphibolite der Bunten Serie. Dissertation, Inst. f. Petrologie, Univ. Wien.
- Matura, A., 1976: Hypothesen zum Bau und zur geologischen Geschichte des kristallinen Grundgebirges von Südwestmähren und dem Niederösterreichischen Waldviertel. Jb. Geol. B.-A., **119**, 63-74.
- Petrakakis, K., 1984: Polymetamorphe Entwicklung der Bunten Serie, Moldanubikum, N.Ö. Fortschr. Min., **62**, Bh. 1, 185-186.
- Petrakakis, K., 1986a: Metamorphism of high grade gneisses from the Moldanubian Zone, Austria, with particular reference to the garnets. Journ. metamorphic Geol., **4**, 323-344.
- Petrakakis, K., 1986b: Metamorphoseentwicklung in der südlichen Bunten Serie am Beispiel einiger Gneise, Moldanubikum, Niederösterreich. TMPM, **35**, 243-259.
- Petrakakis, K. and H. Dietrich, 1985: MINSORT: A program for the processing and archivation of microprobe analyses of silicate and oxide minerals. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Mh. **8**, 379-384.
- Scharbert, H.G. and G. Kurat, 1974: Distribution of some elements between coexisting ferromagnesian minerals in Moldanubian granulite Facies Rocks, Lower Austria, Austria. TMPM, **21**, 110-134.
- Zaydan, A. und H.G. Scharbert, 1983: Petrologie und Geochemie moldanubischer Serien im Raume Persenbeug (südwestliches Waldviertel). Jb. Geol. B.-A., **126**, 181-199.

Adresse des Autors:

Dr. K. Petrakakis  
 Institut für Petrologie der Universität Wien  
 Dr. Karl Lueger-Ring 1  
 A-1010 Wien

Manuskript eingegangen am 4.12.1989, in Endform am 30.3.1990