

**FLÜSSIGKEITSEINSCHLUSSUNTERSUCHUNGEN AN AUSGEWÄHLTEN
PROBEN DES NIEDERÖSTERREICHISCHEN MOLDANUBIKUMS**

von

Christine Jaweckl⁺

(eingelangt am 14. 5. 1992, angenommen am 2. 6. 1992)

Zusammenfassung

In Proben aus dem Niederösterreichischen Moldanubikum wurden drei Typen von Flüssigkeitseinschlüssen in Quarzen identifiziert. Sie entsprechen den Zusammensetzungen $\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$, H_2O , $\text{N}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$. Das sekundäre Erscheinungsbild sowie mittlere bis geringe Dichten lassen auf Einschlußbedingungen am absteigenden Ast der Metamorphose schließen. Transpositionsphänomene führten zu Wasserverlust in ursprünglich gemischten $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen und/oder zur Re-equilibrierung der Dichte. Aufgrund der Flüssigkeitseinschlußuntersuchung konnte eine Entwicklung von CO_2 -dominierten hin zu gering salinaren, stickstoffhaltigen wäßrigen Fluiden festgestellt werden.

Geologie

Die Geologie des Österreichischen Anteils an der Böhmisches Masse wurde von FUCHS (1976) und FUCHS & MATURA (1976) eingehend beschrieben. Sie läßt sich in zwei großtektonische Einheiten, dem Moldanubikum und dem Moravikum, gliedern. Das im wesentlichen N-S streichende Moldanubikum weist einen internen Deckenbau auf: die tiefste Einheit, die Monotone Serie, wird durch einen Blastomylonithorizont von der darüberliegenden Bunten Serie getrennt. Letztere besteht aus einer Abfolge von Amphiboliten, Metapeliten, Marmoren und Kalksilikatgesteinen. Die tektonisch höchste Einheit, die Gföhler Einheit ist im wesentlichen aus einem Orthogneis und einem darüber liegenden Granulit aufgebaut. Die variszische Metamorphose wird für die Monotone Serie bei 700° und 4-5 kbar angegeben (LINNER, mündl. Mitt.). Die Bunte Serie ($700-770^\circ$, 7-9 kbar) und die Gföhler Einheit (750° , 8,5-9 kbar) haben ähnliche Metamorphosebedingungen erfahren, unterscheiden sich jedoch im Deformationsgrad (PETRAKAKIS, 1986 und PETRAKAKIS & RICHTER, 1991). Die metamor-

⁺ Anschrift des Verfassers
Mag. Christine Jaweckl
Institut für Petrologie der Universität Wien
Dr. Karl Lueger-Ring 1, 1010 Wien.

phen Serien werden im Westen vom Südböhmischen Pluton diskordant geschnitten. Im Osten sind sie durch eine Überschiebungszone vom Moravikum abgegrenzt.

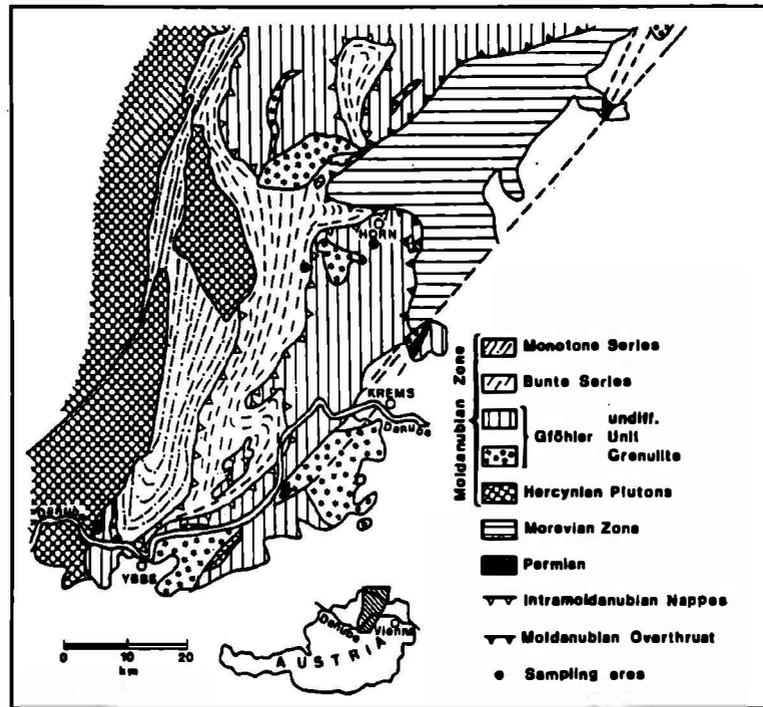


Abb. 1: Geologische Karte des Niederösterreichischen Moldanubikums nach FUCHS & SCHARBERT, 1979 (aus PETRAKAKIS, 1986) mit eingetragenen Probenpunkten.

Einleitung

Die fluide Phase spielt bei metamorphen Prozessen zweifellos eine große Rolle. Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen erlauben es, sie hinsichtlich der Zusammensetzung und der Dichte zu charakterisieren. In dieser Arbeit wird versucht, die Fluidentwicklung in Bezug zur Metamorphosegeschichte des Moldanubikums zu klären. Die Ergebnisse der Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen an drei ausgewählten Proben aus dem Niederösterreichischen Moldanubikum sollen vorgestellt werden. Es handelt sich um einen Opx-führenden Granulit (89-GR-13) und einen Granatamphibolit (BS-DO-12) aus der Gföhler Einheit, sowie einem Granatamphibolit (GE-HO-21A) aus der Bunten Serie (Abb. 1). Intensive dünnstliffmikroskopische Arbeit an zahlreichen anderen Gesteinen ergab, daß sich die Flüssigkeitseinschlußarten nicht wesentlich

von denen in den drei vorgestellten Proben unterscheiden. Die Bearbeitung und Interpretation der Einschlüsse ist aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften (wie geringe Größe, Auftreten von Transpositionsphänomenen sowie mehrerer Generationen) schwierig.

Methodik¹

Zur Flüssigkeitseinschlußuntersuchung wurden doppelt polierte Dickschliffe (150 bis 350 μm) verwendet. Die Messungen erfolgten an einem "Linkam"- und einem "Chaix-meca"-Heiz-Kühltisch mit einem Meßbereich von -196° bis 600°C . Es wurden Schmelz- und Homogenisierungstemperaturen von CO_2 und H_2O gemessen. Der volumetrische Wasseranteil von gemischten ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ - und $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -) Einschlüssen wurde optisch bestimmt. Die Isochoren der wäßrigen Einschlüsse wurden nach ZHANG & FRANTZ (1987), die übrigen nach HOLLOWAY (1981) berechnet. Für die Darstellung wurden die Isochoren jener Flüssigkeitseinschlüsse verwendet, die dem Maximum und/oder dem höchsten und dem niedrigsten Wert im Histogramm entsprechen.

Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen

Im Allgemeinen sind die Einschlüsse klein, mäßig häufig bis selten, relativ stark von Transpositionsphänomenen betroffen und treten in "Trails" und "Clustern" auf (unter "Trails" versteht man Einschlußzüge, "Cluster" sind Einschlußgruppen). Es wurden drei Einschlußtypen identifiziert. Typ 1: CO_2 -dominierte Einschlüsse ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ und CO_2), Typ 2: gering salinare wäßrige Einschlüsse ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$), Typ 3: N_2 -dominierte Einschlüsse ($\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ und N_2).

Die Flüssigkeitseinschlüsse haben ein typisch sekundäres Auftreten (ROEDDER, 1984), ihre Gestalt reicht von idealer negativer Kristallform bis zu vollkommen unregelmäßigen Umrissen, wobei letztere auf Im- bzw. Explosion (Dekrepitation) infolge von Druckunterschieden in Einschluß und Gestein zurückgehen (TOURET, 1977; STERNER & BODNAR, 1989). Die Größe beträgt zwischen 1 und 10 μm , manchmal bis 15

¹ VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

T_m	Schmelztemperatur in $^\circ\text{C}$
T_h	Homogenisierungstemperatur in $^\circ\text{C}$ (zur flüssigen Phase), T_h^v (zur Gasphase), T_h^c (kritisch)
FG	Füllungsgrad (Vol% H_2O flüssig in wäßrigen, in $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ - und in $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen), $\text{FG} = 1 - V_{\text{CO}_2} / V_{\text{TOT}}$
d	Dichte in g/cm^3
d_{TOT}	Gesamtdichte
V_{TOT}	Gesamtvolumen in cm^3
V_{CO_2}	Volumen des CO_2 -Anteiles
X_i	Molenbruch der Komponente i

μm . Die CO_2 -Homogenisierung erfolgt meist, die H_2O -Homogenisierung immer zur flüssigen Phase. N_2 homogenisiert zur Gasphase.

Probe 89-GR-13

Mikroskopische Beschreibung:

Die Probe 89-GR-13 ist ein Granulit aus dem Dunkelsteiner Wald, der aus Granat, Orthopyroxen, Klinopyroxen, Plagioklas, Quarz, Biotit und Akzessorien besteht und eine granoblastische Textur aufweist. Die Granate sind resorbiert und von einem polygranularen Ring aus Plagioklas umgeben.

Granat enthält Relikte von kleinen, jetzt leeren Flüssigkeitseinschlüssen mit kubischer negativer Kristallform, die häufig in Clustern auftreten. In wenigen dieser Relikte wurden Carbonatkristalle identifiziert. Es wird vermutet, daß diese Bildungen ehemalige CO_2 -Flüssigkeitseinschlüsse sind, aus denen das Fluid entweder entwichen ist und/oder bei denen das CO_2 mit der Hohlraumwand reagiert hat um Carbonat zu bilden. Bereichsweise treten in Granaten gehäuft wurmartige Einschlüsse auf, die auf späte, verheilte Risse zurückzuführen sind. Sie sind ebenfalls leer.

Meßbare Flüssigkeitseinschlüsse treten ausschließlich in Quarz, und zwar mäßig häufig in intragranularen Trails und Clustern auf. Die Typ 1-Einschlüsse sind bei Raumtemperatur ein- bis dreiphasig. Sie haben entweder eine nahezu ideale, negative Kristallform oder unregelmäßige, sternförmige Umrisse, die auf Transpositionsphänomene zurückgehen. Die häufig auftretende bimodale Größenverteilung ist ebenfalls ein Hinweis dafür. In wasserführenden Einschlüssen bildet H_2O meist einen dünnen, optisch schwer erkennbaren Saum um das CO_2 . Das Vorhandensein einer CO_2 -Gasblase bei Raumtemperatur zeigt geringe Dichte an. Wasserfreie Einschlüsse treten gemeinsam mit wasserführenden in Trails auf und sind genetisch mit ihnen verknüpft. Typ 2-Einschlüsse: Die wäßrigen Einschlüsse sind bei Raumtemperatur meist zweiphasig, und treten in intragranularen Trails auf. Viele Einschlüsse haben eine regelmäßige Form; sehr unregelmäßige Umrisse weisen auf Transpositionsphänomene hin. Typ 3-Einschlüsse: N_2 -dominierte Flüssigkeitseinschlüsse sind selten und treten in Trails gemeinsam mit H_2O -Einschlüsse auf.

Mikrothermometrie:

Schmelz- und Homogenisierungstemperaturen sind in den Histogrammen (Abb. 2) dargestellt. Aus Tab. 1 sind die Einschlußtypen, die mikrothermometrischen Daten, die Zusammensetzung, die berechnete Dichte und der Füllungsgrad ersichtlich. Typ 1: T_m für CO_2 reicht von $-56,6^\circ$ (Tripelpunkt) bis $-62,3^\circ$. Die Schmelzpunkterniedrigung konnte auf verschiedene Gehalte von CH_4 zurückgeführt werden. Raman-spektroskopische Messungen (BURKE & LUSTENHOUWER, 1987) ergaben bis zu 29 mol% CH_4 . Diese CH_4 -Gehalte wurden als Reaktionsprodukt im geschlossenen System C-O-H interpretiert (v.d. KERKHOF et al., 1991). Es konnte kein Zusammenhang zwischen T_m -Erniedrigung und H_2O -Gehalten festgestellt werden.

In den meisten Flüssigkeitseinschlüssen homogenisiert das CO_2 zur flüssigen Phase. Der Streubereich für T_h liegt zwischen $-4,9^\circ$ und $+28,6^\circ$, wobei die meisten Temperaturen über $+15^\circ$ liegen. In sehr wenigen Fällen wurde Homogenisierung zur

Gasphase festgestellt. Die starke Streuung von T_h wird auf Transpositionsphänomene zurückgeführt.

Homogenisierungstemperaturen von CO_2 um und über 0° zeigen eine relativ geringe Dichte an. Die Gesamtdichte eines $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlusses ist von der Homogenisierungstemperatur des CO_2 und von der Zusammensetzung, v.a. vom Wassergehalt abhängig. Es hat sich gezeigt, daß sich drei spezifische Flüssigkeitseinschlüsse hinsichtlich der Gesamtdichte deutlich von den übrigen Typ 1 Einschlüssen unterscheiden. Sie sind durch die niedrigsten T_h -Werte ($-4,0$ bis $-4,9$) und durch hohe H_2O -Gehalte charakterisiert. Dies hat zur Unterteilung in Typ 1A (drei dichtere Flüssigkeitseinschlüsse) und Typ 1B (übrige $\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$ -Flüssigkeitseinschlüsse) geführt. So beträgt die Gesamtdichte der 1A-Einschlüsse $0,95$ - $0,97 \text{ g/cm}^3$, die der 1B-Einschlüsse $0,51$ - $0,85 \text{ g/cm}^3$. Typ 2: Die Schmelzpunkterniedrigung reicht bis $-5,6^\circ$, was einer Salinität bis $8,7 \text{ Gew\% NaCl}_{\text{eq}}$ entspricht. Homogenisierung erfolgt zwischen 155 und 300° . Typ 3: N_2 homogenisiert zur Gasphase bei Temperaturen um den kritischen Punkt (-147°).

Interpretation:

Relative Chronologie: Aufgrund der Tatsache, daß Typ 1 und Typ 2 Einschlüsse immer in getrennten Trails auftreten, muß angenommen werden, daß die Fluide verschiedene Alter haben. Da keine textuellen Hinweise über die relative Chronologie vorhanden sind, wie isolierte, primäre Flüssigkeitseinschlüsse oder Ersatz eines älteren Fluids durch ein jüngeres unter Beibehaltung der charakteristischen primären Umrisse, kamen geologische und petrologische Überlegungen zum Tragen. Folgende Argumente unterstützen ein relativ älteres $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Fluid: (1) CO_2 ist die dominierende fluide Phase unter granulitfaziellen Bedingungen ("carbonic metamorphism", siehe z.B. TOURET, 1971; TOURET & DIETVORST, 1983; NEWTON, 1986). Es gibt in der hier beschriebenen Probe Hinweise auf ein syngranulitfazielles CO_2 -reiches Fluid in Form der reliktschen Einschlüsse in Granat (s.o.). (2) Das granulitfazielle Gestein ist, bis auf sehr wenig Biotit, ausschließlich aus OH-freien Mineralen zusammengesetzt. Ein "relativ altes" H_2O -Fluid ist mit der Mineralogie und dem Metamorphosegrad nicht vereinbar.

H_2O -Verlust: Wie oben erwähnt, treten H_2O -führende und H_2O -freie Typ 1 Flüssigkeitseinschlüsse meist nebeneinander in Trails auf, wobei der H_2O -Gehalt stark variieren kann ($X_{\text{H}_2\text{O}} = 0$ bis $0,9$). Deshalb wird vermutet, daß H_2O bevorzugt aus gemischten $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen entwichen ist. Die Entstehung von reinen CO_2 -Einschlüssen infolge des H_2O -Verlustes aus ursprünglich gemischten $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen ist bekannt (HOLLISTER, 1990) und wird auf intrakristalline Dislokationen aufgrund von Deformation zurückgeführt (BAKKER & JANSEN, 1990). In der beschriebenen Probe sind die drei Typ 1A-Einschlüsse durch hohe H_2O -Gehalte und hohe CO_2 -Dichte (was eine hohe Gesamtdichte ergibt) gekennzeichnet, während die übrigen $\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüsse eine deutlich niedrigere Gesamtdichte aufweisen. Es wird angenommen, daß die 1A Einschlüsse das relativ älteste Fluid darstellen und die geringer dichten 1B Einschlüsse aus einem H_2O -Verlust und nachfolgender Dichte Re-equilibrierung von ursprünglich H_2O -reicheren Einschlüssen hervorgehen. Infolgedessen wird das in den Typ 1A Flüssigkeitseinschlüssen vorhandene Fluid als Relikt eines älteren Fluids angesehen.

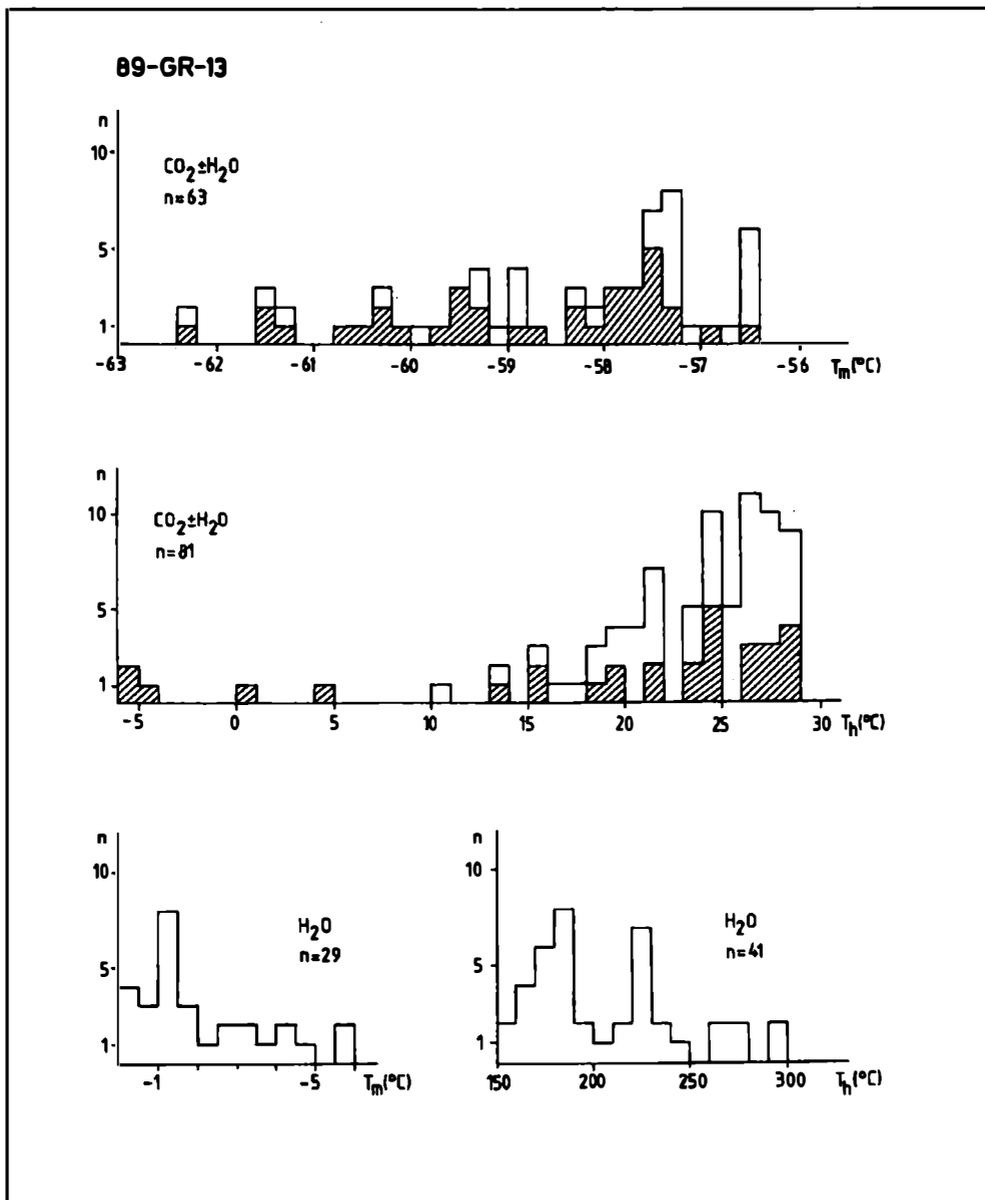
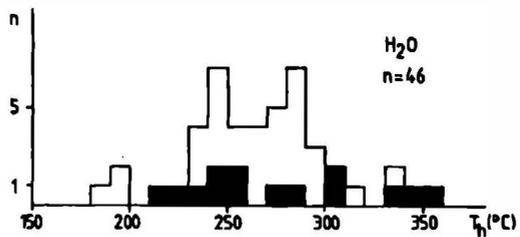
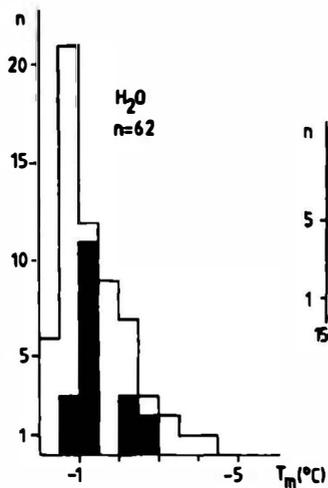
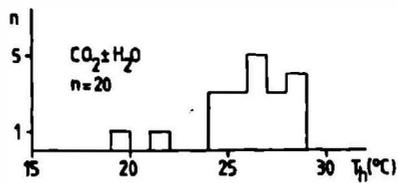
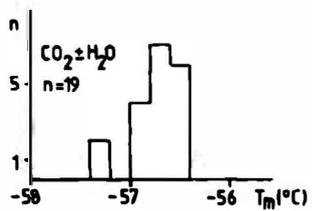
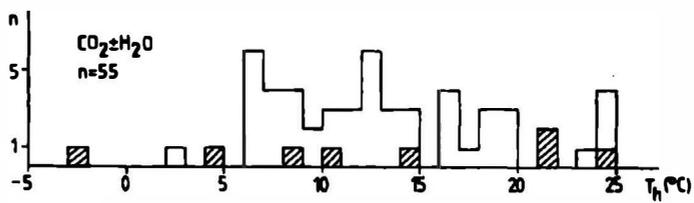
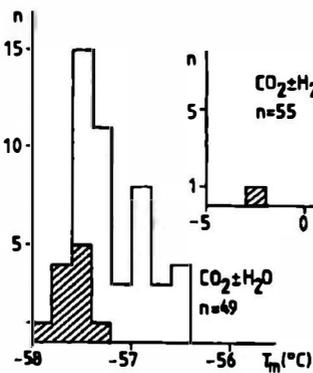


Abb. 2: Histogramme der Flüssigkeitseinschlüsse in Quarz der verschiedenen Proben.
 schraffiert: CO₂+H₂O; schwarz: H₂O in Amphibolit.

BS-DO-12



GE-HO-21A



Isochoren: Von ausgewählten Flüssigkeitseinschlüssen wurden Isochoren berechnet und gezeichnet (Abb. 3). Die P/T-Bedingungen des Metamorphosehöhepunktes wurden von PETRAKAKIS (mündl. Mitt.) für diese Probe bei 750° und 10 kbar ermittelt. Es können vier Gruppen von Isochoren beschrieben werden, die den Einschlußtypen 1A, 1B, 2 und 3 entsprechen. Die Isochoren der Typ 1A Einschlüsse schneiden die P/T-Box, was ein Hinweis auf ein synmetamorphes Fluid sein könnte. Aus petrologischen Überlegungen (s.o.) ist jedoch ein Typ 1A Fluid mit $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5-0,8$ nicht kompatibel mit synmetamorphen Bedingungen (PETRAKAKIS, mündl. Mitt.). Aus diesem Grund wird angenommen, daß das 1A Fluid zu einem späteren Zeitpunkt im Laufe des P/T-Pfades anwesend war und als homogenes Fluid eingeschlossen wurde. Eine Temperatur um 500° erscheint wahrscheinlich, da ein zweiter Metamorphoseakt mit umfassender Rekristallisation bei 500° für die verschiedenen Einheiten des Moldanubikums beschrieben wird (PETRAKAKIS, 1986 und mündl. Mitt.; KUSCHNIG, 1986; HÖGELSBERGER, 1989). Durch P/T-Abfall während des Aufstieges kam es zu umfassenden H₂O-Verlust, zu Transpositionsphänomenen und Dichte Re-equilibrierung in den CO₂ ± H₂O Einschlüssen, was den sehr flachen Verlauf der 1B Isochoren zur Folge hat.

Die wäßrigen und Stickstoff-führenden Einschlüsse sind vermutlich in einem späteren Stadium der Gesteinsentwicklung gebildet worden.

P/T-Pfad: Aufgrund der Flüssigkeitseinschlußuntersuchung an dieser Probe konnte ein "Teilstück" des P/T-Pfades ermittelt werden (Abb. 3).

Die Entwicklungsgeschichte der fluiden Phase kann wie folgt zusammengefaßt werden:

(I) Bildung von CO₂ + H₂O-Flüssigkeitseinschlüssen aus einem homogenen Fluid bei ca. 500°C (1A Einschlüsse). Dieses Fluid kann aus einer Überarbeitung von älteren CO₂-führenden Einschlüssen im Gestein stammen ("reworking", ANDERSEN et al., 1989), oder erst zum Zeitpunkt der Einschlußbildung eingedrungen sein.

(II) Dekrepitation, H₂O-Verlust und Dichte Re-equilibrierung des 1A Fluids.

(III) Bildung von H₂O-Flüssigkeitseinschlüssen.

Probe BS-DO-12

Mikroskopische Beschreibung:

Die Probe BS-DO-12 ist ein Granatamphibolit aus der Bunten Serie im Kamptal am Ostende des Thurnberger Stausees. Das Gestein besteht aus kurzsäuligen Amphibolen, Granat, Biotit, Quarz, Plagioklas und Akzessorien und hat eine nematoblastisch-phrophyroblastische Textur. Tripelpunkte zwischen Amphibol und Plagioklas zeigen einen guten Rekristallisationsgrad der Matrix an, während die resorbierten Granate textuell relictisch sind. Die Probe wird von einem ca. 6mm breiten Quarzgang durchschlagen.

Flüssigkeitseinschlüsse wurden ausschließlich in Quarz beobachtet. Im Amphibolit treten Typ 1 und Typ 2 auf, im Quarzgang Typ 2 und Typ 3.

Amphibolit: In den wenigen flüssigkeitseinschlußführenden Quarzen kommen CO₂, CO₂ + H₂O und H₂O in schlecht definierten Trails und Clustern meist gemeinsam vor.

In gemischten Einschlüssen bildet H_2O meist nur einen dünnen Film um das CO_2 , das bei Raumtemperatur ein- und zweiphasig sein kann.

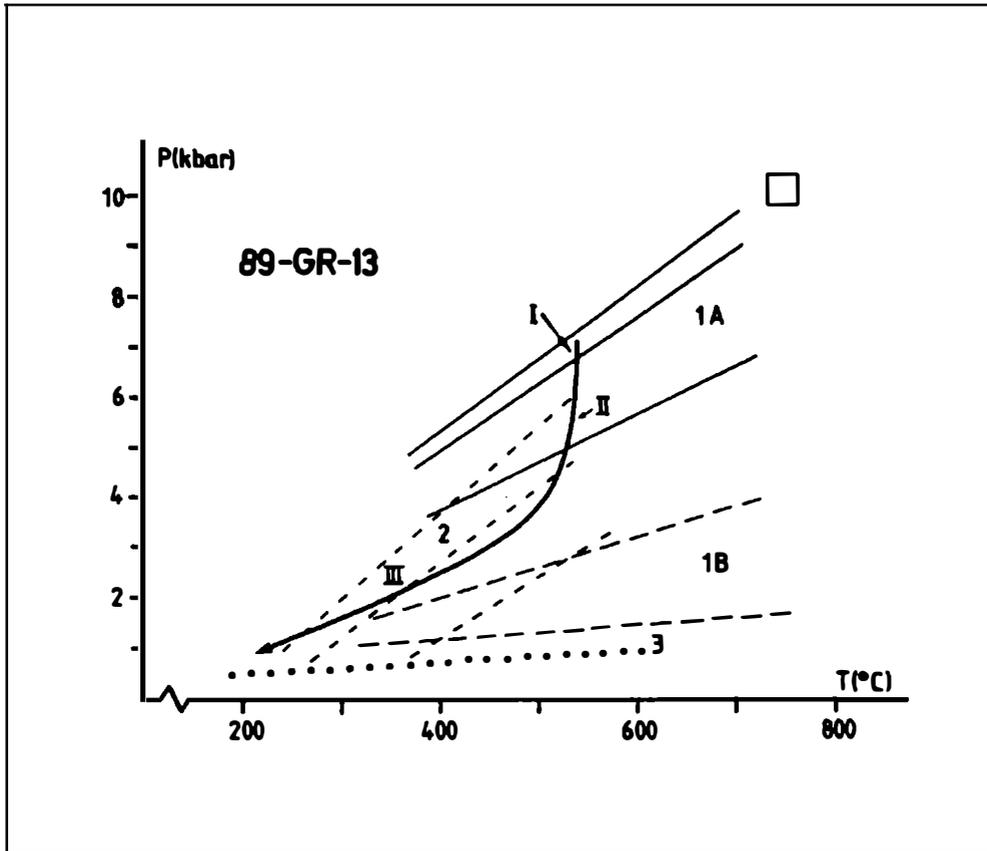


Abb. 3: Isochoren der Probe 89-GR-13. 1A, 1B, 2 und 3 entsprechen den Isochoren dieser Einschlußtypen. I, II und III sind Stadien der Fluidentwicklung (s. Text). Der Pfeil stellt ein Teil des P/T-Pfades dar. P/T-Box von PETRAKAKIS (mündl. Mitt.).

Quarzgang: Im Quarzgang sind wäßrige Flüssigkeitseinschlüsse sehr häufig. Sie bilden breite, intergranulare Trails und sind durch einen relativ konstanten Füllungsgrad innerhalb eines Trails gekennzeichnet. Stellenweise gibt es vollkommen dekrepitierte Einschlüsse. Einige benachbarte Quarze enthalten zahlreiche N_2 -Einschlüsse, die in Haufen getrennt von den wäßrigen Einschlüssen auftreten. In einem einzelnen Quarz wurden $N_2 + H_2O$ -Einschlüsse beobachtet, die zusammen mit reinen H_2O - und N_2 -Einschlüssen vorkommen.

Mikrothermometrie:

Die Ergebnisse der mikrothermometrischen Messungen sind in Abb. 2 und Tab. 1 angegeben. Die niedrige Gesamtdichte der Typ 1 Einschlüsse weist auf späte Re-equilibrierung hin. Weiters zeigt sich, daß die gemischten $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüsse eine etwas höhere Gesamtdichte als die reinen CO_2 -Einschlüsse besitzen, was als H_2O -Verlust interpretiert werden kann (s.o. Probe 89-GR-13).

Die Typ 2 Flüssigkeitseinschlüsse haben eine geringe Salinität (bis 7,4 Gew% NaCl_{eq}). Die Streuung von T_m und T_h für H_2O -Einschlüsse aus dem Amphibolit und aus dem Quarzgang ist gleich. In den Typ 3 homogenisiert N_2 zur Gasphase bei Temperaturen um -150° oder kritisch (-147°), was eine sehr geringe Dichte bedeutet. Das Auftreten von reinen N_2 - und H_2O -Einschlüssen gemeinsam mit gemischten $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen bedeutet entweder eine nachträgliche Entmischung der beiden Phasen oder die Einschlußbildung erfolgte unter unmischbaren Bedingungen.

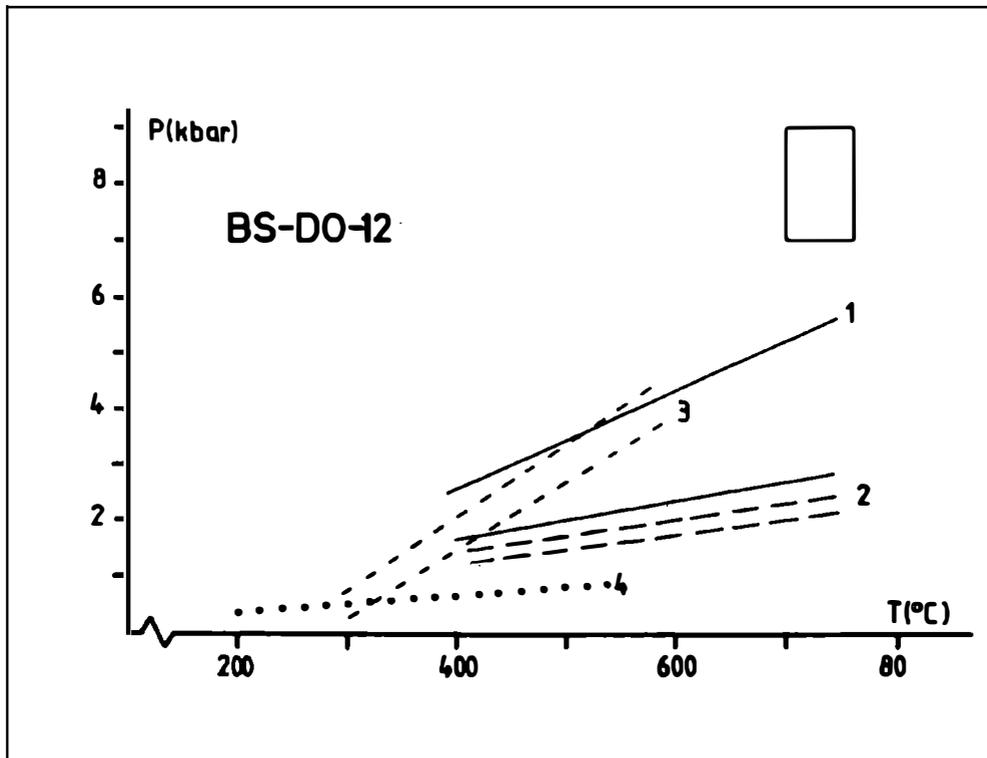


Abb. 4: Isochoren der Probe BS-DO-12. 1 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, 2 CO_2 , 3 H_2O , 4 N_2 . P/T-Box aus PETRAKAKIS (1986).

EINSCHLUSS	PARAMETER	89-GR-13		BS-DO-12	GE-HO-21A
Typ 1 (CO ₂ +H ₂ O)	T _m (CO ₂)	1A	1B		
	max	-57.0- -57.3	-56.6- -62.3	-56.6- -57.2	-56.6- -57.9
	T _h (CO ₂)			-56.6- -56.8	-57.4- -57.6
	max	-4.0- -4.9	0.5-28.6	19.4-28.1	-9.1- 24.8
	X _{CO₂}	0.2-0.5	26-27	26-27	6 und 12
	X _{CH₄}	0	0.1-0.69	0.23-0.75	0.35-0.72
	X _{H₂O}	0.5-0.8	0.0-0.14		
	d _{TOT} (CO ₂)		0.31-0.9	0.25-0.77	0.28-0.65
d _{TOT} (CO ₂ +H ₂ O)	0.95-0.97	0.52-0.66	0.65-0.78	0.71-0.89	
max		0.51-0.85	0.71-0.83	0.76-0.99	
FG (CO ₂ +H ₂ O)	0.3-0.6	0.69	0.69	0.89 und 0.85	
		0.1-0.7	0.1-0.5	0.1-0.4	
Typ 2 (H ₂ O+NaCl)	T _m		0- -5.6	0- -4.7	-2.3- -5.2
	max		-1- -1.5	-0.5- -1	
	Salinität		0-8.7	0-7.4	3.8-8.1
	T _h		155-300	180-360	170-420
	max		180-190	240 und 280	
	d _{TOT}		0.71-0.93	0.57-0.9	0.48-0.96
max		0.9	0.82 und 0.75		
FG		0.8-0.9	0.6-0.9	0.5-0.9	
Typ 3 (N ₂ +H ₂ O)	T _h (N ₂)		T _h ^v , T _h ^c	T _h ^v , T _h ^c	T _h ^v , T _h ^c
	FG (N ₂ +H ₂ O)		0.1-0.4	0.1-0.7	0.1-0.5

Tab. 1.: Flüssigkeits einschlußdaten aufgeschlüsselt nach Probennummer und Einschlußtyp. T_m(CO₂), T_h(CO₂): T_m bzw. T_h des CO₂; "max": Maximum im Histogramm; X_{CO₂}, X_{CH₄}, X_{H₂O}: Molenbrüche in CO₂+H₂O-Einschlüssen; d_{TOT}(CO₂), d_{TOT}(CO₂+H₂O): Gesamtdichte der CO₂- bzw. der CO₂+H₂O-Einschlüsse; Salinität in Gew% NaCl_{eq}.

Isochoren:

Die Isochoren sind in Abb. 4 dargestellt. Einige gut definierte Trails von CO_2 - und $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen in Amphibolit sind ein Hinweis darauf, daß ein homogenes $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Fluid das relativ älteste Fluid darstellt, das durch H_2O -Verlust oder Ersatz durch eine spätere wäßrige fluide Phase bezüglich der Dichte und des Inhaltes verändert wurde. Auf ein altes, CO_2 -führendes Fluid weisen auch zahlreiche, winzige Carbonatkristalle in Granat hin. Der Quarzgang, der den Amphibolit durchschlägt, ist einem jüngeren Ereignis zuzuordnen: die wäßrigen und N_2 -führenden Einschlüsse stellen das Fluid zur Zeit der Gangbildung dar, das vermutlich auch in das Nebengestein eingedrungen ist und dabei ältere Flüssigkeitseinschlüsse ersetzt hat.

Über den möglichen Verlauf eines P/T-Pfades lassen sich kaum Aussagen treffen, dazu fehlen petrologische Detailuntersuchungen. Wann die Bildung der $\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$ -Flüssigkeitseinschlüsse erfolgte bzw. der Wasserverlust und die Dichte Re-equilibrierung ist ungewiß, bis auf die Tatsache, daß sie älter als die H_2O - und N_2 -führenden Einschlüsse sind.

Probe GE-HO-21A

Mikroskopische Beschreibung:

Die Probe GE-HO-21A ist eine granatreiche Linse aus einem Amphibolit der Gföhler Einheit im Kamptal bei Rosenberg. Das Gestein besteht aus Granat, Amphibol, Quarz, Plagioklas, Biotit und Akzessorien und hat eine nematoblastisch-porphyroblastische Textur. Die Granate sind reliktsch in Bezug auf die gut rekristallisierte Matrix (Tripelpunkte).

Alle drei Einschlußtypen treten in Quarz auf, wobei auch zwei oder drei im selben Kristall beobachtet wurden. Typ 1 Einschlüsse haben meist eine regelmäßige, ideale negative Kristallform. CO_2 -Einschlüsse sind bei weitem die häufigsten, gemischte Einschlüsse kommen nur gemeinsam mit diesen vor. Das CO_2 ist bei Raumtemperatur immer einphasig. Typ 1 Einschlüsse in Granat: Typ 1 Einschlüsse wurden auch in einem Granat beobachtet. Dabei handelt es sich um einen Cluster aus drei gemischten Einschlüssen, während reine CO_2 Einschlüsse zahlreich im Granat verteilt auftreten. Typ 2 und Typ 3: Wäßrige Einschlüsse sind selten und kommen als Cluster und kurze Trails vor, die oft in der Nachbarschaft von $\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$ Einschlüssen liegen. Charakteristisch sind Trails aus $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ - und reinen N_2 - und/oder H_2O -Flüssigkeitseinschlüssen. Ebenso wurden Quarze gefunden, in denen reine N_2 -Trails reine H_2O -Trails kreuzen. Der Füllungsgrad der H_2O -Einschlüsse ist bimodal: es gibt Flüssigkeitseinschlüsse mit sehr kleiner Blase (FG=0,9) und solche mit großer Blase (FG=0,5-0,7).

Mikrothermometrie:

Typ 1: Die mikrothermometrischen Meßdaten sind aus Abb. 2 und Tab. 1 ersichtlich. Die Schmelzpunkterniedrigung des CO_2 ist auf geringe Mengen an CH_4 und/oder N_2 zurückzuführen. Es zeigt sich, daß die Schmelzpunkterniedrigung des CO_2 für die wasserführenden Einschlüsse größer als für die wasserfreien ist. Der Streubereich der Homogenisierungstemperaturen ist unabhängig vom Wassergehalt. Wie bei den beiden anderen Proben ist die Dichte der wasserführenden Einschlüsse größer als die der H_2O -freien. Typ 1 Einschlüsse in Granat: Wie bei den Einschlüssen in Quarz weisen die drei gemischten Einschlüsse eine geringe T_m -Erniedrigung um $-57,5^\circ$ auf,

während die wasserfreien beim Tripelpunkt von CO_2 ($-56,6^\circ$) schmelzen. Auffallend ist die deutlich niedrigere Homogenisierungstemperatur ($-9,1^\circ$ bis $8,8^\circ$) der gemischten Einschlüsse, was eine höhere Dichte bedeutet. Die Homogenisierungstemperatur der reinen CO_2 Einschlüsse (ca. 15°), sowie der Wassergehalt ($X_{\text{H}_2\text{O}}=0,28$ bis $0,65$) ist ähnlich wie für jene in Quarz. **Typ 2:** Von den wäßrigen Flüssigkeitseinschlüssen konnten nur sehr wenig T_m - und T_h -Daten gewonnen werden (jeweils ca. 10). Dies liegt an der Seltenheit und geringen Größe der Flüssigkeitseinschlüsse und daran, daß viele Einschlüsse vor der Homogenisierung dekrepitierten. T_m schwankt zwischen $-2,3^\circ$ und $-5,2^\circ$ (3,8-8,1 Gew% NaCl_{aq}), T_h -Messungen liegen um 170° ($0,93\text{-}0,96\text{g}/\text{cm}^3$), bei 300° ($0,76\text{g}/\text{cm}^3$) und zwischen 380° und 420° ($0,48\text{-}0,6\text{g}/\text{cm}^3$). Diese Streuung entspricht den unterschiedlichen Füllungsgraden und ist vermutlich auf Transpositionsphänomene zurückzuführen. **Typ 3:** N_2 -Einschlüsse homogenisieren zur Gasphase bei Temperaturen um den kritischen Punkt. Ihre geringe Dichte ist nicht unbedingt ein Hinweis auf späte Einschlüßbildung, da N_2 -Einschlüsse stark zur Re-equilibrierung neigen.

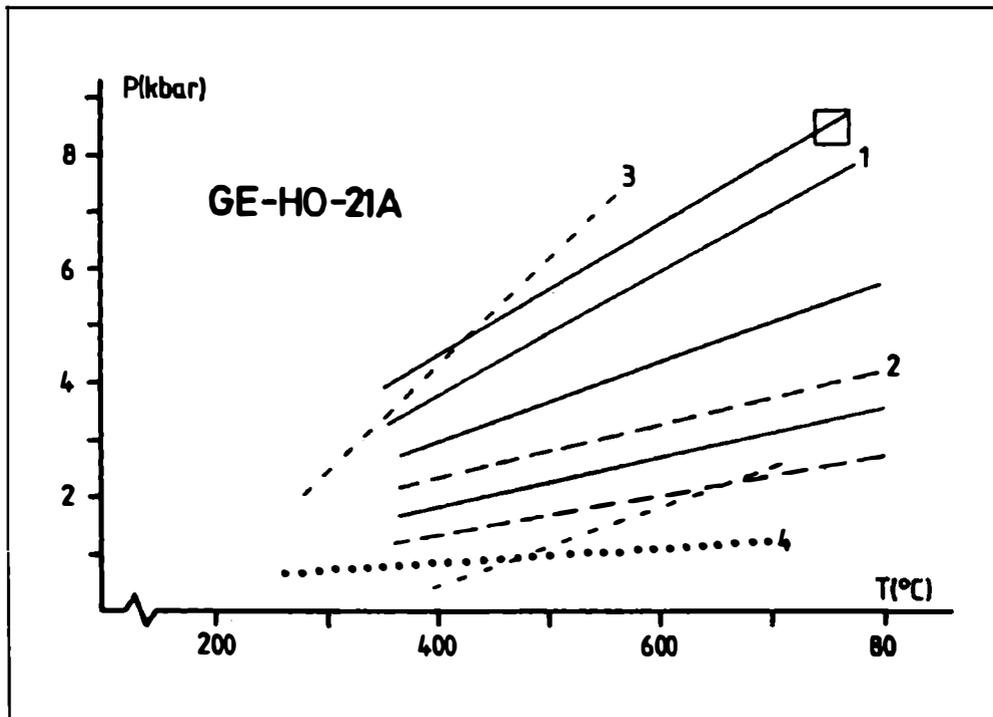


Abb. 5: Isochoren der Probe GE-HO-21A. Ziffern wie in Abb. 4. P/T-Box aus PETRAKAKIS & RICHTER (1991).

Isochoren:

Die Isochoren der Probe GE-HO-21A sind in Abb. 5 dargestellt. Es zeigt sich, daß die Isochoren der $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüsse deutlich steiler verlaufen als jene der reinen CO_2 -Einschlüsse. Die Isochore eines der gemischten Einschlüsse in Granat schneidet die P/T-Box. Das durch jenen Einschluß repräsentierte $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Fluid kann als syn-metamorph angesehen werden. Die übrigen gemischten, aber weniger dichten Einschlüsse in Granat und Quarz wurden infolge von Transpositionsphänomenen (wie H_2O -Verlust) re-equilibriert. Das durch die meisten Einschlüsse dokumentierte CO_2 -Fluid kann entweder aus den älteren gemischten Flüssigkeitseinschlüssen abstammen (durch Remobilisierung), oder im Laufe der späteren P/T-Entwicklung eingedrungen sein. Für letztere Möglichkeit sprechen die unterschiedlichen Schmelztemperaturen (und damit Zusammensetzungen) der gemischten und der H_2O -freien Einschlüsse. Die wäßrigen und Stickstoff-führenden Einschlüsse stellen ein jüngerer Fluid dar, wobei die steile H_2O -Isochore ($T_h = 170^\circ$) vermutlich auf Transposition zurückgeht. Die reinen N_2 -Einschlüsse können aus einer Entmischung eines ehemals homogenen $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Fluids hervorgehen.

Schlußfolgerungen

Die untersuchten Proben aus dem Niederösterreichischen Moldanubikum sind durch verschiedene charakteristische Fluidtypen gekennzeichnet. Auffallend ist die Dominanz von CO_2 und darunter besonders die Häufigkeit von $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ in den Flüssigkeitseinschlüssen. Ebenfalls herauszuheben ist das Auftreten von N_2 -führenden Einschlüssen. Typ 1 Flüssigkeitseinschlüsse in Granat (Probe GE-HO-21A), sowie Relikte solcher in Granaten der Proben 89-GR-13 und BS-DO-12 sind Hinweise darauf, daß eine CO_2 -reiche fluide Phase während der Granatbildung anwesend war. Dies kann am progredienten Ast oder am Höhepunkt der Metamorphose gewesen sein.

Aus seinen petrographischen Untersuchungen schließt PETRAKAKIS (1986), daß für Gesteine der südlichen Bunten Serie H_2O -untersättigte Metamorphosebedingungen angenommen werden müssen. Das Auftreten von trockenen Granuliten spricht ebenfalls für eine erniedrigte Wasseraktivität im Moldanubikum während der Hauptmetamorphose. Dieses frühe, CO_2 -reiche Fluid ist in Flüssigkeitseinschlüssen nicht erhalten. Nur die gemischten Typ 1 Einschlüsse in Granat der Probe GE-HO-21A könnten dieses Fluid repräsentieren. Die Typ 1 Einschlüsse in Quarz aller drei Proben sind am absteigenden Ast der Metamorphose gebildet worden. Dies ist durch ihr sekundäres Erscheinungsbild und durch die mittlere bis geringe Dichte der Einschlüsse dokumentiert. Für diesen Vorgang werden Temperaturen von 500° bis 600° angenommen. Das entspricht den Bedingungen, die HÖGELBERGER (1989), KUSCHNIG (1986) und PETRAKAKIS (1986 und mündl. Mitt.) für die zweite Metamorphose ermittelten. Während der Abkühlung und dem Druckabfall kam es zu umfassenden Transpositionsphänomenen. Dies bewirkte den H_2O -Verlust und/oder die Dichte Re-equilibration in den CO_2 -dominierten Einschlüssen, sowie Remobilisierung des Fluids. Diese Vorgänge kommen in der starken Streuung von T_h , $X_{\text{H}_2\text{O}}$ und d_{TOT} zum Ausdruck.

Zu einem späteren Zeitpunkt war eine gering salinare, wäßrige fluide Phase mit gewissen Anteilen an Stickstoff anwesend. N₂ könnte aus dem Abbau von NH₄-führenden Biotit und Feldspat stammen. Die N₂+H₂O-Einschlüsse sind zum Teil als mischbares Fluid eingeschlossen worden (über 400 °C; ANDERSEN et al., 1989).

Danksagung

Herrn Prof. J. Touret (Freie Universität, Amsterdam) danke ich herzlich für seine Unterweisung in die Methode der Flüssigkeitseinschlußuntersuchung, für die Überlassung der Laboreinrichtung, für seine Hilfe und sein Interesse an meiner Arbeit. Herr Prof. W. Richter betreut die Dissertation, in deren Rahmen die vorliegenden Untersuchungen durchgeführt wurden, und Herr Dr. K. Petrakakis überließ mir thermobarometrische Daten. Belden Herren danke ich herzlich dafür, sowie für ihr Interesse und Ihre Diskussionsbereitschaft. Herr Dr. E. Burke (Freie Universität, Amsterdam) führte die Raman-spektroskopischen Messungen (Mikrodil 28) mit finanzieller Unterstützung der "WACOM" (research group for analytical chemistry of minerals and rocks) durch, welche vom "ZWO" (Netherlands Organisation for the Advancement of Pure Research) subventioniert wird. Ihm gebührt Dank, wie auch Herrn Dr. M. Götzinger, der das "Erste Österreichische Fluid-Info-Treffen" organisierte. Dem Fonds zur Förderung von wissenschaftlicher Forschung (FWF) bin ich für die Finanzierung (Projekt S4709-GEO) zu Dank verpflichtet.

Literatur

- ANDERSEN, T., BURKE, E.A.J., AUSTRHEIM, H. (1989): Nitrogen-bearing, aqueous fluid inclusions in some eclogites from the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, **103**, 153-165.
- BAKKER, J., JANSEN, J.B.H. (1990): Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. - *Nature*, **345**, 58-60.
- BURKE, E.A.J., LUSTENHOUWER, W.J. (1987): Advantages of the application of a multichannel laser Raman microprobe (Microdil-28) in the analyses of fluid inclusions. - *Chem. Geol.*, **61**, 11-17.
- FUCHS, G. (1976): Zur Entwicklung der Böhmisches Masse. - *Jb. Geol. B.-A.*, **119**, 45-61.
- FUCHS, G., MATURA, A. (1976): Zur Geologie des Kristallins der Südlichen Böhmisches Masse. - *Jb. Geol. B.-A.*, **119**, 1-43.
- FUCHS, G., SCHARBERT, H.G. (1979): Kleinere Granulitvorkommen im Niederösterreichischen Moldanubikum und ihre Bedeutung für die Granulitgenese. - *Verh. Geol. B.-A.*, **2**, 29-49.
- HÖGELSBERGER, H. (1989): Die Marmore und Kalksilikatgesteine der Bunten Serie - Petrologische Untersuchungen und geologische Konsequenzen. - *Jb. Geol. B.-A.*, **132**, 1, 213-230.
- HOLLOWAY, J.R. (1981): Compositions and volumes of supercritical fluids in the earth's crust. In: Hollister, L.S., Crawford, M.L. (eds.): Short course in fluid inclusions: Applications to petrology. - *Mineralogical Association of Canada*, **6**, 13-36.
- HOLLISTER, L.S. (1990): Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal plastic deformation. - *J. Struct. Geol.*, **12**, 7, 895-901.
- KERKHOF V.D., A.M., TOURET, J.L.R., MAIJER, C., JANSEN, J.B.H. (1991): Retrograde methane-dominated fluid inclusions from high-temperature

- granulites of Rogaland, southwestern Norway. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2533-2544.
- KUSCHNIG, G. (1986): *Geochemie und Petrologie der Amphibolite der Bunten Serie*. - Unveröff. Diss. Inst. f. Petrologie, Univ. Wien.
- NEWTON, R.C. (1986): Fluids of granulite facies metamorphism. - In: WALTHER J.V., WOOD, B.J. (Eds.): *Fluid rock interaction during metamorphism*. - Springer Verlag, 36-59.
- PETRAKAKIS, K. (1986): Metamorphism of high-grade gneisses from the Moldanubian zone, Austria, with particular reference to the garnets. - *J. Met. Geol.*, 4, 323-344.
- PETRAKAKIS, K., RICHTER, W. (1991): Metamorphosebedingungen in der Gföhler Einheit. - *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, 1, 167-180.
- ROEDDER, E. (1984): Fluid inclusions. - *Reviews in Mineralogy*, 12, 646p.
- STERNER, S.M., BODNAR, R.J. (1989): Synthetic fluid inclusions- VII. Re-equilibration of fluid inclusions in quartz during laboratory-simulated metamorphic burial and uplift. - *J. Met. Geol.* 7, 2, 243-260.
- TOURET, J.L.R. (1971): Le facies granulite en Norvege meridionale. - *Lithos*, 4, I 239-249, II 423-436.
- TOURET, J.L.R. (1977): The significance of fluid inclusions in metamorphic rocks. - In: FRASER, D.C. (ed.): *Thermodynamics in Geology*. - D.Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 203-227.
- TOURET, J.L.R., Dietvorst, P. (1983): Fluid inclusions in high grade anatectic metamorphites. - *J. Geol. Soc. London*, 140, 635-649.
- ZHANG, Y.-G., FRANTZ, J.D. (1987): Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid inclusions. - *Chem. Geol.*, 64, 335-350.