

**FLÜSSIGKEITSEINSCHLUSSUNTERSUCHUNGEN AN AUSGEWÄHLTEN  
PROBEN DES NIEDERÖSTERREICHISCHEN MOLDANUBIKUMS**

von

**Christine Jaweckl<sup>+</sup>**

(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  $\text{CO}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2 \pm \text{H}_2\text{O}$ . 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  $\text{CO}_2$ -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  $700^\circ$  und 4-5 kbar angegeben (LINNER, mündl. Mitt.). Die Bunte Serie ( $700-770^\circ$ , 7-9 kbar) und die Gföhler Einheit ( $750^\circ$ , 8,5-9 kbar) haben ähnliche Metamorphosebedingungen erfahren, unterscheiden sich jedoch im Deformationsgrad (PETRAKAKIS, 1986 und PETRAKAKIS & RICHTER, 1991). Die metamor-

---

<sup>+</sup> 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.

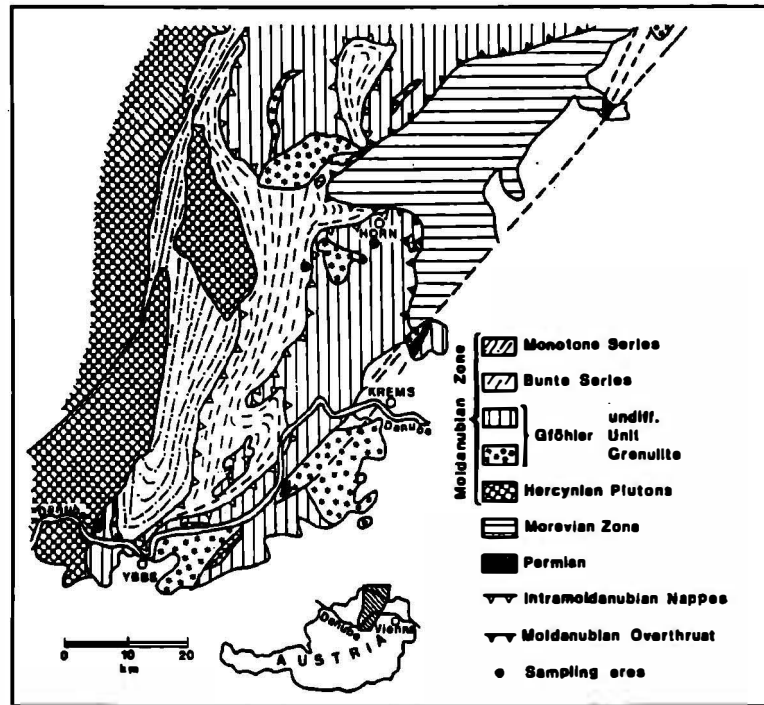


Abb. 1: Geologische Karte des Niederösterreichischen Moldanubikums nach FUCHS & SCHARBERT, 1979 (aus PETRAKAKIS, 1986) mit eingetragenen Probenpunkten.

## 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 dünnstufmikroskopische 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.

## **Methodik<sup>1</sup>**

Zur Flüssigkeitseinschlußuntersuchung wurden doppelt polierte Dickschliffe (150 bis 350  $\mu\text{m}$ ) verwendet. Die Messungen erfolgten an einem "Linkam"- und einem "Chaix-meca"-Heiz-Kühltisch mit einem Meßbereich von  $-196^\circ$  bis  $600^\circ\text{C}$ . Es wurden Schmelz- und Homogenisierungstemperaturen von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  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:  $\text{CO}_2$ -dominierte Einschlüsse ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$ ), Typ 2: gering salinare wäßrige Einschlüsse ( $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ ), Typ 3:  $\text{N}_2$ -dominierte Einschlüsse ( $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{N}_2$ ).

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  $\mu\text{m}$ , manchmal bis 15

---

### <sup>1</sup> 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% $\text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{g}/\text{cm}^3$                                                                                                                                                                                 |
| $d_{\text{TOT}}$  | Gesamtdichte                                                                                                                                                                                                     |
| $V_{\text{TOT}}$  | Gesamtvolumen in $\text{cm}^3$                                                                                                                                                                                   |
| $V_{\text{CO}_2}$ | Volumen des $\text{CO}_2$ -Anteiles                                                                                                                                                                              |
| $X_i$             | Molenbruch der Komponente i                                                                                                                                                                                      |

$\mu\text{m}$ . Die  $\text{CO}_2$ -Homogenisierung erfolgt meist, die  $\text{H}_2\text{O}$ -Homogenisierung immer zur flüssigen Phase.  $\text{N}_2$  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  $\text{CO}_2$ -Flüssigkeitseinschlüsse sind, aus denen das Fluid entweder entwichen ist und/oder bei denen das  $\text{CO}_2$  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  $\text{H}_2\text{O}$  meist einen dünnen, optisch schwer erkennbaren Saum um das  $\text{CO}_2$ . Das Vorhandensein einer  $\text{CO}_2$ -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:  $\text{N}_2$ -dominierte Flüssigkeitseinschlüsse sind selten und treten in Trails gemeinsam mit  $\text{H}_2\text{O}$ -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  $\text{CO}_2$  reicht von  $-56,6^\circ$  (Tripelpunkt) bis  $-62,3^\circ$ . Die Schmelzpunkterniedrigung konnte auf verschiedene Gehalte von  $\text{CH}_4$  zurückgeführt werden. Raman-spektroskopische Messungen (BURKE & LUSTENHOUWER, 1987) ergaben bis zu 29 mol%  $\text{CH}_4$ . Diese  $\text{CH}_4$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalten festgestellt werden.

In den meisten Flüssigkeitseinschlüssen homogenisiert das  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  um und über  $0^\circ$  zeigen eine relativ geringe Dichte an. Die Gesamtdichte eines  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlusses ist von der Homogenisierungstemperatur des  $\text{CO}_2$  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  $\text{H}_2\text{O}$ -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  $300^\circ$ . Typ 3:  $\text{N}_2$  homogenisiert zur Gasphase bei Temperaturen um den kritischen Punkt ( $-147^\circ$ ).

#### 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)  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ -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"  $\text{H}_2\text{O}$ -Fluid ist mit der Mineralogie und dem Metamorphosegrad nicht vereinbar.

$\text{H}_2\text{O}$ -Verlust: Wie oben erwähnt, treten  $\text{H}_2\text{O}$ -führende und  $\text{H}_2\text{O}$ -freie Typ 1 Flüssigkeitseinschlüsse meist nebeneinander in Trails auf, wobei der  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalt stark variieren kann ( $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0$  bis  $0,9$ ). Deshalb wird vermutet, daß  $\text{H}_2\text{O}$  bevorzugt aus gemischten  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -Einschlüssen entwichen ist. Die Entstehung von reinen  $\text{CO}_2$ -Einschlüssen infolge des  $\text{H}_2\text{O}$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalte und hohe  $\text{CO}_2$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ -Verlust und nachfolgender Dichte Re-equilibrierung von ursprünglich  $\text{H}_2\text{O}$ -reicheren Einschlüssen hervorgehen. Infolgedessen wird das in den Typ 1A Flüssigkeitseinschlüssen vorhandene Fluid als Relikt eines älteren Fluids angesehen.

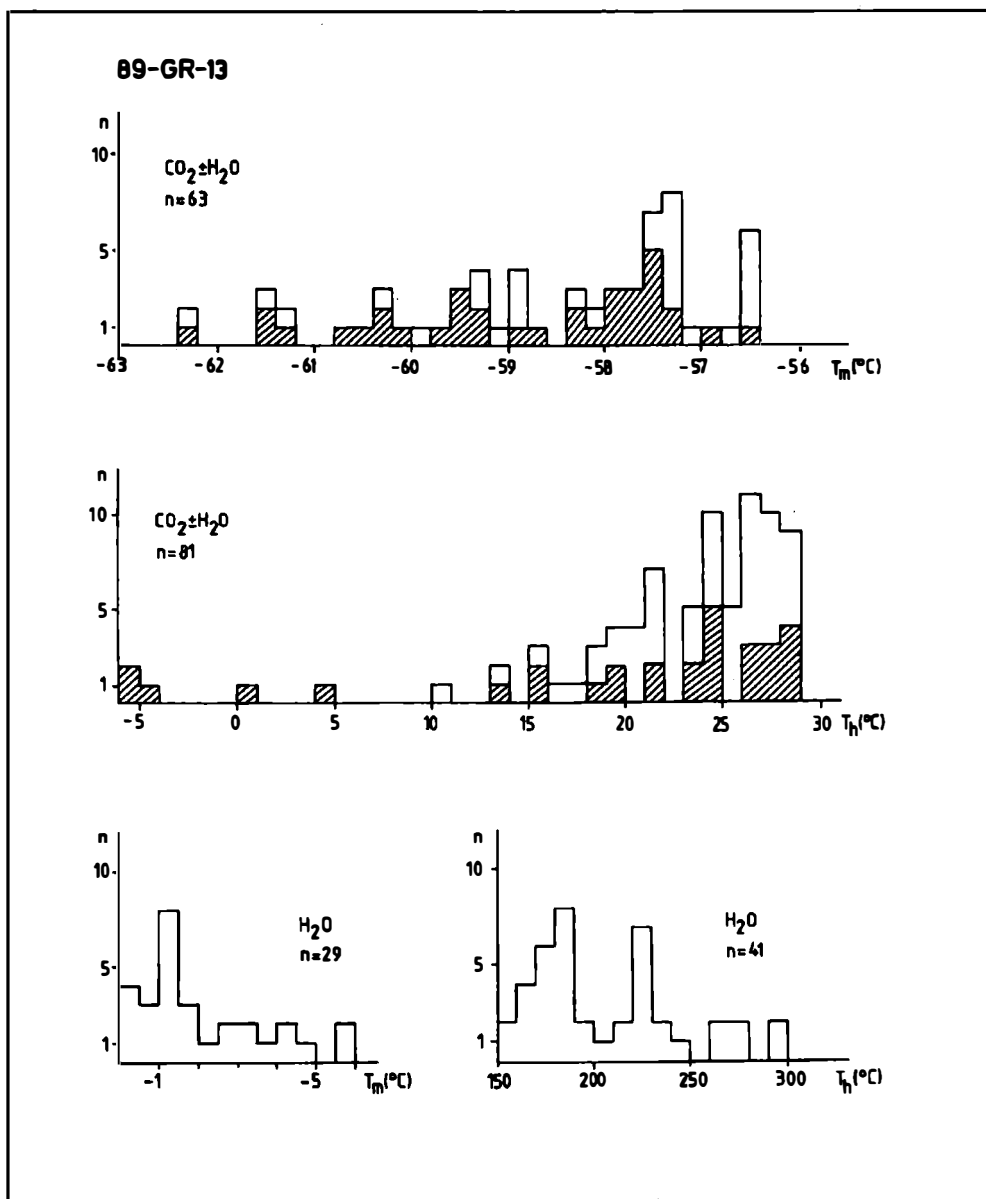
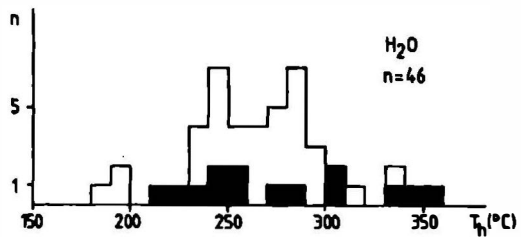
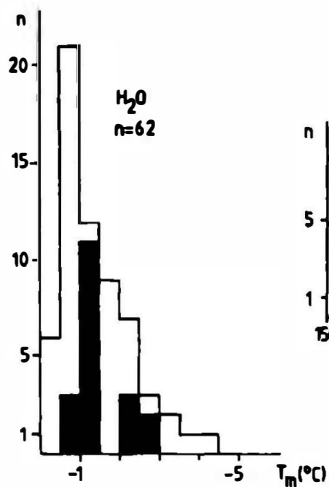
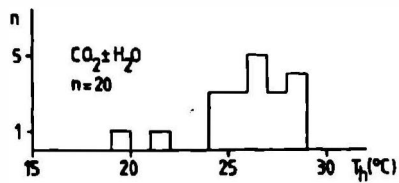
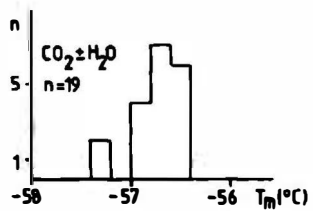
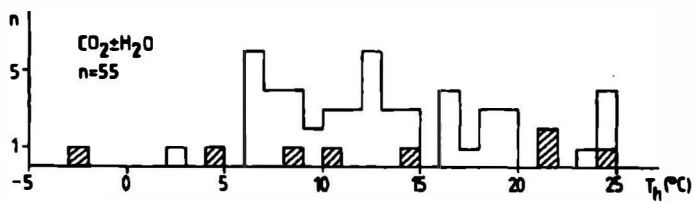
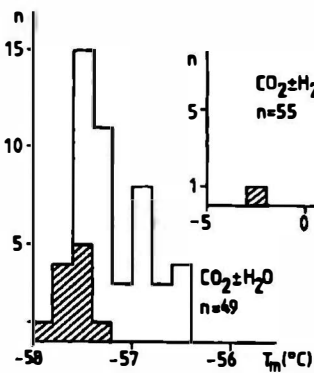


Abb. 2: Histogramme der Flüssigkeitseinschlüsse in Quarz der verschiedenen Proben.  
 schraffiert: CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O; schwarz: H<sub>2</sub>O in Amphibolit.

### 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 H<sub>2</sub>O-Verlust, zu Transpositionsphänomenen und Dichte Re-equilibrirung in den CO<sub>2</sub> ± H<sub>2</sub>O Einschlässen, was den sehr flachen Verlauf der 1B Isochoren zur Folge hat.

Die wäßrigen und Stickstoff-führenden Einschlässe 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 CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O-Flüssigkeitseinschlüssen aus einem homogenen Fluid bei ca. 500°C (1A Einschlässe). Dieses Fluid kann aus einer Überarbeitung von älteren CO<sub>2</sub>-führenden Einschlässen im Gestein stammen ("reworking", ANDERSEN et al., 1989), oder erst zum Zeitpunkt der Einschlußbildung eingedrungen sein.

(II) Dekrepiration, H<sub>2</sub>O-Verlust und Dichte Re-equilibrirung des 1A Fluids.

(III) Bildung von H<sub>2</sub>O-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-porphyroblastische 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 CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub>O 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.

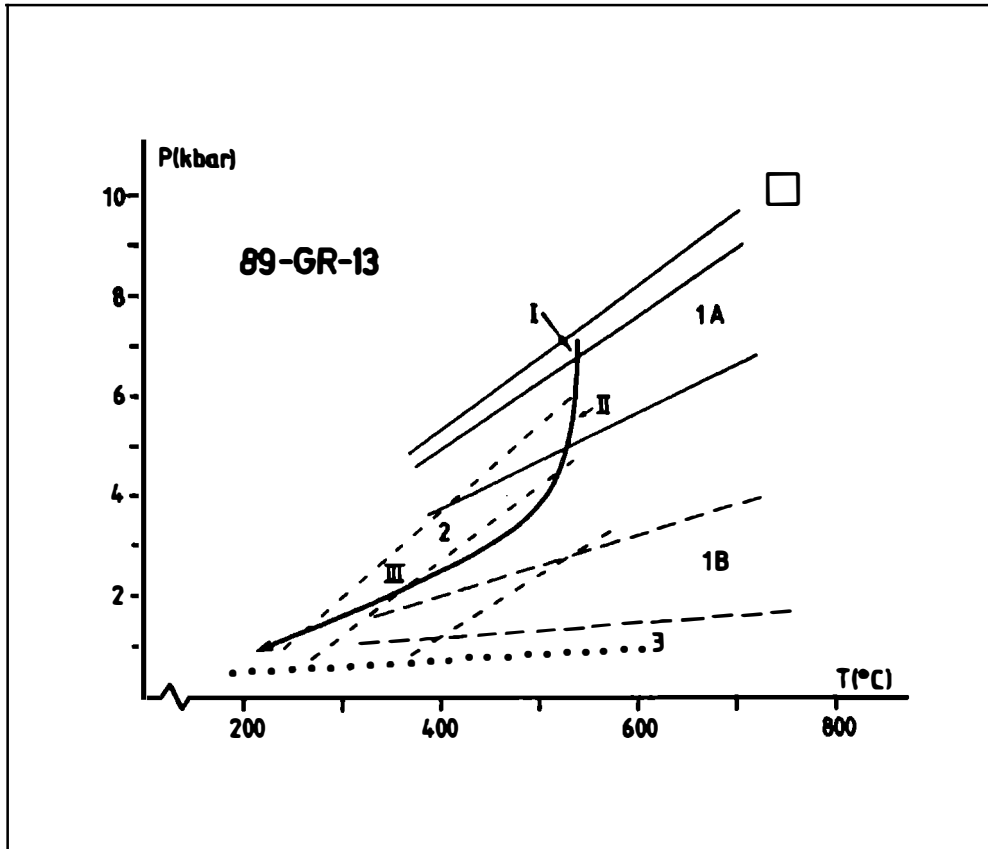


Abb. 3: Isochoren der Probe 89-GR-13. 1A, 1B, 2 und 3 entsprechen den Isochoren dieser Einschlüßtypen. I, II und III sind Stadien der Fluidentwicklung (s. Text). Der Pfeil stellt ein Teil des P/T-Pfades dar. P/T-Box von PETRAKAKIS (mündl. Mitt.).

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  $\text{CO}_2$ -Einschlüsse besitzen, was als  $\text{H}_2\text{O}$ -Verlust interpretiert werden kann (s.o. Probe 89-GR-13).

Die Typ 2 Flüssigkeitseinschlüsse haben eine geringe Salinität (bis 7,4 Gew%  $\text{NaCl}_{\text{eq}}$ ). Die Streuung von  $T_m$  und  $T_h$  für  $\text{H}_2\text{O}$ -Einschlüsse aus dem Amphibolit und aus dem Quarzgang ist gleich. In den Typ 3 homogenisiert  $\text{N}_2$  zur Gasphase bei Temperaturen um  $-150^\circ$  oder kritisch ( $-147^\circ$ ), was eine sehr geringe Dichte bedeutet. Das Auftreten von reinen  $\text{N}_2$ - und  $\text{H}_2\text{O}$ -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.

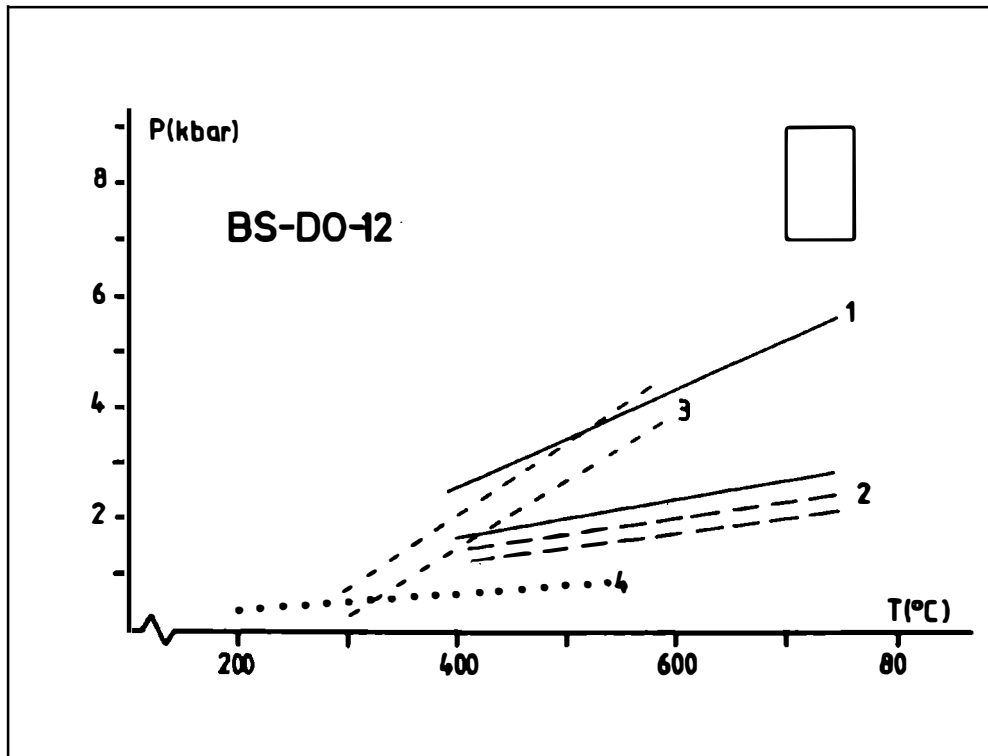


Abb. 4: Isochoren der Probe BS-DO-12. 1  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , 2  $\text{CO}_2$ , 3  $\text{H}_2\text{O}$ , 4  $\text{N}_2$ . P/T-Box aus PETRAKAKIS (1986).

| EINSCHLUSS                                           | PARAMETER                             | 89-GR-13     |                                                           | BS-DO-12                                                  | GE-HO-21A                                                 |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Typ 1 (CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O)            | T <sub>m</sub> (CO <sub>2</sub> )     | 1A           | 1B                                                        |                                                           |                                                           |
|                                                      | max                                   | -57.0- -57.3 | -56.6- -62.3                                              | -56.6- -57.2                                              | -56.6- -57.9                                              |
|                                                      | T <sub>h</sub> (CO <sub>2</sub> )     |              |                                                           | -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 <sub>CO2</sub>                      | 0.2-0.5      | 26-27                                                     | 26-27                                                     | 6 und 12                                                  |
|                                                      | X <sub>CH4</sub>                      | 0            | 0.1-0.69                                                  | 0.23-0.75                                                 | 0.35-0.72                                                 |
|                                                      | X <sub>H2O</sub>                      | 0.5-0.8      | 0.0-0.14                                                  |                                                           |                                                           |
|                                                      | d <sub>TOT</sub> (CO <sub>2</sub> )   |              | 0.31-0.9                                                  | 0.25-0.77                                                 | 0.28-0.65                                                 |
| d <sub>TOT</sub> (CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> O+NaCl)                        | T <sub>m</sub>                        |              | 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 <sub>h</sub>                        |              | 155-300                                                   | 180-360                                                   | 170-420                                                   |
|                                                      | max                                   |              | 180-190                                                   | 240 und 280                                               |                                                           |
|                                                      | d <sub>TOT</sub>                      |              | 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 <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O)             | T <sub>h</sub> (N <sub>2</sub> )      |              | T <sub>h</sub> <sup>v</sup> , T <sub>h</sub> <sup>c</sup> | T <sub>h</sub> <sup>v</sup> , T <sub>h</sub> <sup>c</sup> | T <sub>h</sub> <sup>v</sup> , T <sub>h</sub> <sup>c</sup> |
|                                                      | FG (N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O) |              | 0.1-0.4                                                   | 0.1-0.7                                                   | 0.1-0.5                                                   |

Tab. 1.: Flüssigkeits einschlußdaten aufgeschlüsselt nach Probennummer und Einschlußtyp. T<sub>m</sub>(CO<sub>2</sub>), T<sub>h</sub>(CO<sub>2</sub>): T<sub>m</sub> bzw. T<sub>h</sub> des CO<sub>2</sub>; "max": Maximum im Histogramm; X<sub>CO2</sub>, X<sub>CH4</sub>, X<sub>H2O</sub>: Molenbrüche in CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O-Einschlüssen; d<sub>TOT</sub>(CO<sub>2</sub>), d<sub>TOT</sub>(CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O): Gesamtdichte der CO<sub>2</sub>- bzw. der CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O-Einschlüsse; Salinität in Gew% NaCl<sub>eq</sub>.

### Isochoren:

Die Isochoren sind in Abb. 4 dargestellt. Einige gut definierte Trails von  $\text{CO}_2$ - 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  $\text{H}_2\text{O}$ -Verlust oder Ersatz durch eine spätere wäßrige fluide Phase bezüglich der Dichte und des Inhaltes verändert wurde. Auf ein altes,  $\text{CO}_2$ -führendes Fluid weisen auch zahlreiche, winzige Carbonatkristalle in Granat hin. Der Quarzgang, der den Amphibolit durchschlägt, ist einem jüngeren Ereignis zuzuordnen: die wäßrigen und  $\text{N}_2$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ - und  $\text{N}_2$ -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.  $\text{CO}_2$ -Einschlüsse sind bei weitem die häufigsten, gemischte Einschlüsse kommen nur gemeinsam mit diesen vor. Das  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{N}_2$ - und/oder  $\text{H}_2\text{O}$ -Flüssigkeitseinschlüssen. Ebenso wurden Quarze gefunden, in denen reine  $\text{N}_2$ -Trails reine  $\text{H}_2\text{O}$ -Trails kreuzen. Der Füllungsgrad der  $\text{H}_2\text{O}$ -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  $\text{CO}_2$  ist auf geringe Mengen an  $\text{CH}_4$  und/oder  $\text{N}_2$  zurückzuführen. Es zeigt sich, daß die Schmelzpunkterniedrigung des  $\text{CO}_2$  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  $\text{H}_2\text{O}$ -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  $\text{CO}_2$  ( $-56,6^\circ$ ) 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  $\text{CO}_2$  Einschlüsse (ca.  $15^\circ$ ), 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%  $\text{NaCl}_{\text{aq}}$ ),  $T_h$ -Messungen liegen um  $170^\circ$  ( $0,93\text{-}0,96\text{g}/\text{cm}^3$ ), bei  $300^\circ$  ( $0,76\text{g}/\text{cm}^3$ ) und zwischen  $380^\circ$  und  $420^\circ$  ( $0,48\text{-}0,6\text{g}/\text{cm}^3$ ). Diese Streuung entspricht den unterschiedlichen Füllungsgraden und ist vermutlich auf Transpositionsphänomene zurückzuführen. **Typ 3:**  $\text{N}_2$ -Einschlüsse homogenisieren zur Gasphase bei Temperaturen um den kritischen Punkt. Ihre geringe Dichte ist nicht unbedingt ein Hinweis auf späte Einschlußbildung, da  $\text{N}_2$ -Einschlüsse stark zur Re-equilibrierung neigen.

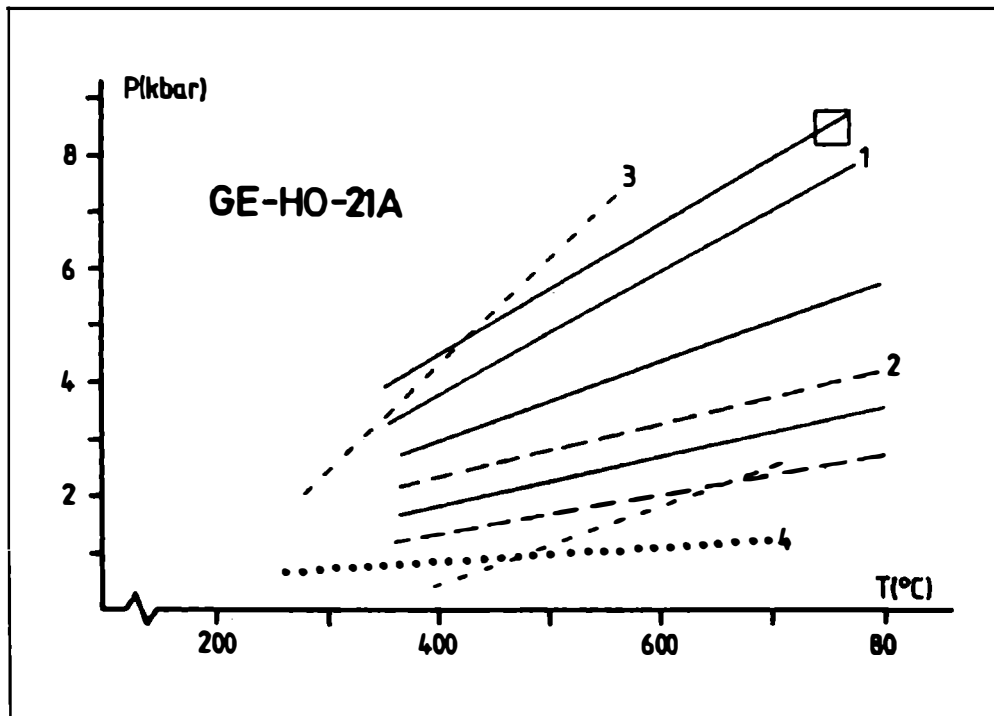


Abb. 5: Isochoren der Probe GE-HO-21A. Ziffern wie in Abb. 4. P/T-Box aus PETRAKAKIS & RICHTER (1991).

### 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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ -Verlust) re-equilibrirt. Das durch die meisten Einschlüsse dokumentierte  $\text{CO}_2$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ -freien Einschlüsse. Die wäßrigen und Stickstoff-führenden Einschlüsse stellen ein jüngerer Fluid dar, wobei die steile  $\text{H}_2\text{O}$ -Isochore ( $T_h = 170^\circ$ ) vermutlich auf Transposition zurückgeht. Die reinen  $\text{N}_2$ -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  $\text{CO}_2$  und darunter besonders die Häufigkeit von  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  in den Flüssigkeitseinschlüssen. Ebenfalls herauszuheben ist das Auftreten von  $\text{N}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{H}_2\text{O}$ -untersättigte Metamorphosebedingungen angenommen werden müssen. Das Auftreten von trockenen Granuliten spricht ebenfalls für eine erniedrigte Wasseraktivität im Moldanubikum während der Hauptmetamorphose. Dieses frühe,  $\text{CO}_2$ -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  $500^\circ$  bis  $600^\circ$  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  $\text{H}_2\text{O}$ -Verlust und/oder die Dichte Re-equilibrirung in den  $\text{CO}_2$ -dominierten Einschlüssen, sowie Remobilisierung des Fluids. Diese Vorgänge kommen in der starken Streuung von  $T_h$ ,  $X_{\text{H}_2\text{O}}$  und  $d_{\text{TOT}}$  zum Ausdruck.

Zu einem späteren Zeitpunkt war eine gering salinare, wäßrige fluide Phase mit gewissen Anteilen an Stickstoff anwesend. N<sub>2</sub> könnte aus dem Abbau von NH<sub>4</sub>-führenden Biotit und Feldspat stammen. Die N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O-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.
- HÖGELBERGER, 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 CO<sub>2</sub> in fluid inclusions in quartz by removal of H<sub>2</sub>O 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-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions. - *Chem. Geol.*, 64, 335-350.