

G.

Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen
im KTB-Feldlabor

K. D. Homann

KTB Report	89-2	G1-G30	11 Abb.	Hannover 1989
------------	------	--------	---------	---------------

G) Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen im KTB-Feldlabor

K.D. Homann *

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	<u>Seite:</u>
G.1 Einleitung und Problemstellung	G 2
G.2 Dekrepatations-ICP Methode zur Analyse von Flüssigkeitseinschlüssen	G 3
G.3 Probenauswahl und Probenaufbereitung	G 8
G.4 Ergebnisse der Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen im Teufenbereich 0 bis 2500 m (VB1, VB1a)	G 14
G.5 Diskussion	G 20
G.6 Zusammenfassung und Vorausblick	G 27
G.7 Literaturverzeichnis	G 29

* Anschrift des Verfassers: KTB-Feldlabor
D-8486 Windischeschenbach

G.1 Einleitung und Problemstellung

In den Aufgabenbereich der Geochemie-Gruppe des KTB-Feldlabors fällt auch eine erste Untersuchung von Flüssigkeitseinschlüssen in Mineralphasen der erbohrten Gesteine.

Während der Vorbohrung wurde eine Methode zur chemischen Analyse von Flüssigkeitseinschlüssen auf ihre Anwendbarkeit im Routinebetrieb getestet. Das Ziel dieser Untersuchungen bestand darin, Änderungen im Flüssigkeitseinschlußchemismus der durchteuften Gesteine bereits frühzeitig zu erkennen. Für die nachgeschalteten Arbeitsgruppen, die sich mit einer detaillierten Untersuchung von Fluid-Einschlüssen befassen, soll sichergestellt werden, daß auch während der Hauptbohrung interessante Horizonte für Fluid-Untersuchungen gekernt werden.

Die zur Zeit üblichen Untersuchungsmethoden für Fluid-Einschlüsse wie Mikrothermometrie und Kryometrie erlauben zwar einerseits eine Abschätzung der Temperatur (T_h -Messung)* und der ungefähren Zusammensetzung (T_{Eis} -Messung)** sowie die Bestimmung der Salinität (T_{mEis} -Messung)*** der eingeschlossenen Fluid-Reste, andererseits jedoch sind diese Untersuchungen sehr sowohl in Bezug auf die Herstellung beidseitig polierter Dünnschliffe als auch für die Messung selbst sehr zeitaufwendig.

Betrachtet man die heute gängigen Analyseverfahren zur quantitativen bzw. semiquantitativen Bestimmung der Einschlußzusammensetzung wie crushing- and leaching-Experimente, Raman Spektrometrie, Instrumentelle Neutronenaktivierungs-Analyse und Dekrepatations-ICP-Analyse (Beschreibung der einzelnen Methoden s. ROEDDER, 1984), so erscheint nur die zuletzt genannte Methode als Routine-Untersuchungsverfahren für Flüssigkeitseinschlüsse geeignet.

Bei der Dekrepatations-ICP Methode werden Flüssigkeitseinschlüsse durch thermische Energiezufuhr zum Platzen (Dekrepatieren) gebracht. Die freigesetzten Lösungströpfchen verdampfen, die Kondensate werden in einem Argonstrom ins Plasma des ICP-AES eingeleitet.

Im Vergleich zur Neutronenaktivierung und crushing- and leaching-Experimenten ist die Dekrepatations-ICP-Analyse relativ einfach und schnell durchzuführen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode besteht darin, daß für einen Analysenvor-

* T_h = Homogenisierungstemperatur
** T_{Eis} = Eutektische Schmelztemperatur des Eises
*** T_{mEis} = Schmelztemperatur des Eises

gang nur sehr wenig Probensubstanz benötigt wird. Bereits etwa 500 mg von Mineralseparaten (zumeist Quarz), die Flüssigkeitseinschlüsse enthalten, sind ausreichend. Weiterhin ist die Gefahr der Kontamination der Dekrepiationsanalyse durch feste Partikel sehr gering (s. hierzu auch CHRYSSOULIS, 1983).

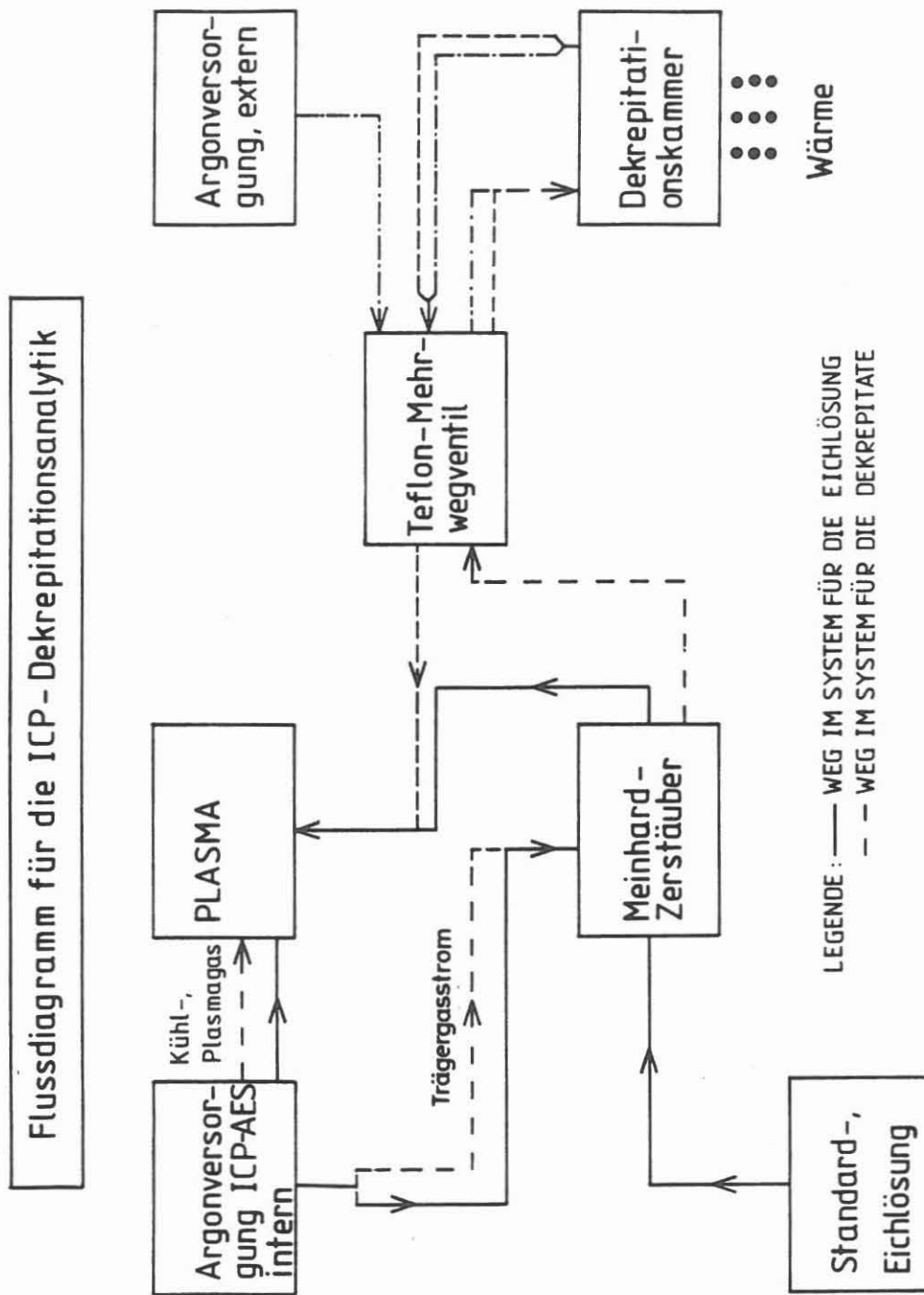
G.2 Dekrepiations-ICP Methode zur Analyse von Flüssigkeitseinschlüssen

Die Methode der Dekrepiations-ICP Analyse von Flüssigkeitseinschlüssen wurde am Imperial College in London entwickelt (THOMPSON et al., 1980; ALDERTON et al., 1982; RANKIN et al., 1982). Das Grundprinzip der Messung besteht darin, daß ein schnelles Aufheizen von Kristallen, die Fluid-Einschlüsse enthalten, zur Dekrepiation der Wirtsminerale führt. Der plötzliche Anstieg des internen Flüssigkeitsdrucks bei thermischer Energiezufuhr ist ursächlich für das Zerbersten des Wirtsminerals. Der als feines Spray freigesetzte Inhalt der Fluid-Einschlüsse verdampft und wird als Feststoff in einem Argonstrom in das Plasma des ICP-AES eingeleitet.

In Abb. G.2.1 ist das Meßprinzip schematisch dargestellt. Bei der Dekrepiationsanalyse wird ein Meinhardt-Zerstäuber zur Erzeugung eines konstanten Argonstromes (Trägergasstrom) verwendet. Der Argonstrom verläßt den Meinhardt-Zerstäuber und wird über ein Mehrwegventil in die Dekrepiationskammer geführt. Die Dekrepiationskammer besteht aus einem Quarz-Reagenzglas, in welches die Probensubstanz (zumeist Quarzseparate) eingefüllt wird. Die Dekrepiationskammer wird in einen elektrischen Ofen eingebracht und mittels eines Thermoelementes und eines Ein/Aus-Reglers auf die Dekrepiationstemperatur eingestellt (für Routine-Messungen 650°C). Mit dem Trägergasstrom werden die Dekrepiate aus der Dekrepiationskammer über das Mehrwegventil direkt in das Plasma geführt. Eine externe Argonversorgung der Dekrepiationskammer über das Mehrwegventil ermöglicht ein rasches Wechseln der Proben nach einem Meßvorgang.

Der elektrische Ofen und das Teflon-Mehrweg-Ventil wurden am Geochemischen Institut der Universität Göttingen nach dem Vorbild der entsprechenden Anlagen des Imperial College in London angefertigt.

Abb. G.2.1 Flußdiagramm für die Dekrepiationsanalytik.



Für die Dekrepitationsanalyse muß ein Atomemissionsspektrometer verwendet werden, das für simultane Messungen ausgelegt ist, da das Zerplatzen der Fluid-Einschlüsse nur über einen relativ kurzen Zeitraum (10er Sekundenbereich) stattfindet. Alle Elemente müssen daher gleichzeitig gemessen werden. Das KTB-Feldlabor ist mit einem Emissionsspektrometer der Fa. ARL (3580, Vacuum) ausgerüstet, welches sowohl die simultane Analyse von 10 Elementen (Na, Ca, K, Li, Si, Al, P, S, Zn und Sc) als auch die sequentielle Analyse beliebiger Elemente im Wellenlängenbereich von ca. 170 bis 800 nm erlaubt.

Die Kombination von 2 Spektrometerkammern zur simultanen und sequentiellen Analyse hat sich sowohl für die kontinuierliche Spülanalytik (s. Kap. C.2) als auch für die Dekrepitationsanalyse bewährt.

Die Auswahl der jeweiligen Wellenlängenpositionen für die 10 feststehenden Photoröhren in der simultanen Meßeinrichtung erfolgte in Zusammenarbeit mit A.H. Rankin (Imperial College, London).

Bei der Auswahl der 10 Elemente wurden folgende Gesichtspunkte zugrunde gelegt:

- Die Elemente Na, Ca und K sind wichtig zur Charakterisierung des Chemismus der Fluid-Einschlüsse, da diese Elemente die Hauptkationen in den meisten natürlichen Wässern darstellen. Des weiteren läßt sich über das relative Verhältnis der Elemente Na/K oder Na/Ca/K Geothermometrie in Bezug auf die Gleichgewichtseinstellung der betrachteten hydrothermalen Lösung im System Or-Ab-KCl-NaCl-H₂O durchführen (Geothermometer für natürliche Wässer siehe: ORVILL, 1963; ELLIS et al., 1967; HEMELEY, 1967; WHITE, 1968; FOURNIER et al., 1973; LAGACHE et al., 1977; BENJAMIN et al., 1983). Die berechneten Equilibrierungstemperaturen sind nach LAGACHE et al. (1977) im Temperaturbereich zwischen 300 - 600°C vom Druck und dem Gesamt-Chloridgehalt (zwischen 0.2 - 2 kbar, 0.05 - 14 mol/kg H₂O) unabhängig. Die berechnete Equilibrierungstemperatur der hydrothermalen Lösung stellt also eine weitaus verlässlichere Temperaturabschätzung dar als die mit Mikrothermometrie gemessene Homogenisierungstemperatur, die u.a. vom Druck abhängig ist.
- Für die Gehalte des Elements Li in natürlichen Wässern existieren ebenfalls Geothermometer in der Literatur.
- Das Element Zn wurde in die simultane Meßeinrichtung des ICP-AES mit aufgenommen, um Fluid-Systeme zu charakterisieren, die möglicherweise an Lagerstättenbildungen beteiligt waren.

- Die Elemente Al, P, S, Si und Sc wurden ausgewählt, um ein Maß für die jeweilige Kontamination der Dekrepiationsanalysen durch die möglicherweise im Argonstrom mitgerissenen Feststoffe wie Feldspat, Apatit, Quarz etc. zu erhalten. Bei gleichzeitig hohen S- und Zn-Gehalten in den Dekrepiataten muß eine Sublimation von Sulfiden in Betracht gezogen werden, die allerdings erst bei Temperaturen $> 800^{\circ}\text{C}$ möglich ist.

In Tabelle G.2.1 sind die zur simultanen Analyse ausgewählten Spektrallinien der oben genannten 10 Elemente aufgeführt.

Tab. G.2.1 Wellenlänge der ausgewählten Spektrallinien

Element	Wellenlänge (Å)	mögliche spektrale Interferenzen nach HEINRICHS et al. (1985) und WINGE et al. (1985)
Ca	3933.66	Sc, Ti, V
Al	3961.53	Co, Ti, Ce, Sm, Ca, V
P	1782.83	I
S	1807.31	-
Na	5895.92	Fe, Ti, V
Zn	2138.55	Cu, V, Al, Fe, Ni, Ti
Li	6707.84	V, Ti
Sc	3613.80	Ce, Mo, Tb, Th, Dy, Zr, Cr, Cu, Fe
Si	2516.12	Yb, Mo, Hf, Cr, V, Fe, Mn
K	7664.91	Ti

Es wurden möglichst interferenzfreie und intensitätsstarke Spektrallinien bei der Auswahl bevorzugt.

Zusätzlich zu den 10 Elementen kann mit dem sequentiellen Meßkanal ein 11. Element beliebiger Wahl simultan mitgemessen werden.

Bei der Dekrepatationsanalyse wird der mittlere Chemismus aller im Quarz auftretenden Einschlüsse bestimmt. Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung einzelner Fluid-Generationen ist nur dann möglich, wenn sich die Einschlüsse deutlich in ihren Homogenisierungs- bzw. ihren Dekrepatationstemperaturen unterscheiden.

Für den Meßvorgang werden jeweils 500 mg Quarzseparate in das Quarzreagenzglas eingefüllt und bei 650°C im elektrischen Ofen zur Dekrepatation gebracht.

Bei der Dekrepatationsmessung werden die Intensitäten (in mV) der jeweiligen Spektrallinien von den simultan messenden Photoröhren über eine Meßzeit von 45 sec integriert (d.h. aufsummiert = Bruttoimpulsrate). Während der Meßzeit von 45 sec, bei der die Dekrepatation der Quarze bei 650°C vollständig abläuft, kann keine Untergrundmessung durchgeführt werden. Die Untergrundmessung wird im Anschluß an die Dekrepatationsmessung mit einem leeren Quarzreagenzglas unter denselben Meßbedingungen durchgeführt (Blindwert = Impulsrate des Untergrundes, in mV). Aus der Differenz der Bruttoimpulsrate bei der Dekrepatationsmessung und der Impulsrate des Untergrundes berechnet sich die Nettoimpulsrate der Dekrepatationsanalysen. Die Eichung der Dekrepatationsanalysen erfolgt jeweils zu Beginn und am Ende einer Meßserie durch die Zerstäubung von Eichlösungen bekannter Zusammensetzung.

Die Dekrepatationsanalysen werden im allgemeinen in der Maßeinheit äquivalent ppm angegeben. Der absoluten Größe des Meßwertes für ein einzelnes Element kommt nur untergeordnete Bedeutung zu. Aussagekräftig sind vielmehr die Elementverhältnisse, da das Ausmaß der Dekrepatation - d.h. die Menge der freigesetzten Lösungsströpfchen - auch bei Wiederholungsmessungen an verschiedenen Teilmengen derselben Probe unterschiedlich sein kann.

Abb. G.2.2 zeigt die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen, die an einer Quarzlinse aus dem Bereich des "Eckergneises" (Harz) durchgeführt wurden. Teilmengen von Quarz-Separaten dieser Probe wurden sowohl am Imperial College in London (dargestellt durch "X"), als auch im KTB-Feldlabor (dargestellt durch ".") auf ihre Flüssigkeitseinschlußzusammensetzung untersucht. Die darstellenden Punkte der beiden Meßserien stimmen gut überein. Für die K/Na-Verhältnisse wird eine Reproduzierbarkeit von 10%, für die Ca/Na-Verhältnisse von 5% relativer Standardabweichung erzielt.

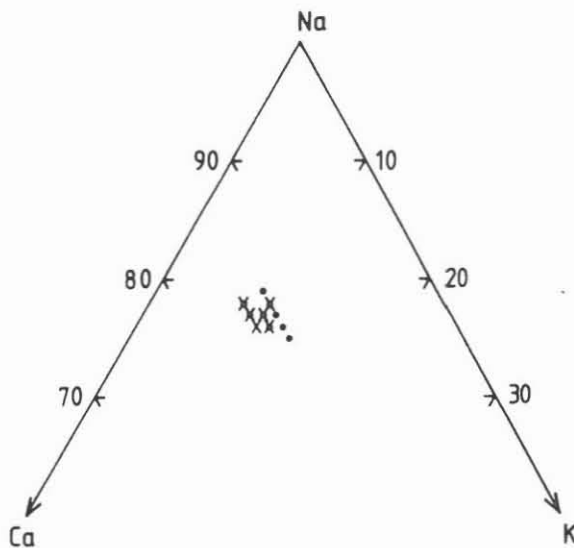


Abb. G.2.2 Ergebnisse von Flüssigkeitseinschlußanalysen mit dem Dekrepatationsverfahren bei Wiederholungsmessungen an verschiedenen Teilmengen einer Quarzprobe (Eckergneis, Harz). Dargestellt sind die Gewichtsverhältnisse der Hauptkationengehalte der Elemente Na, Ca und K.

X = Analyse am Imperial College in London
.= Analyse im KTB-Feldlabor

G.3 Probenauswahl und Probenaufbereitung

In der Tabelle G.3.1 sind die für die Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen ausgewählten Proben zusammengefaßt. Die Abbildungen G.3.1 und G.3.2 stellen die Probennahmepunkte im geologischen Profil dar.

Von dem erbohrten Kernmaterial wurden vornehmlich Quarze aus Quarzgängen (bzw. Quarzlinzen) ab einer Mächtigkeit von 3 cm und Quarze aus Quarz-Feldspat-Mobilisaten beprobt.

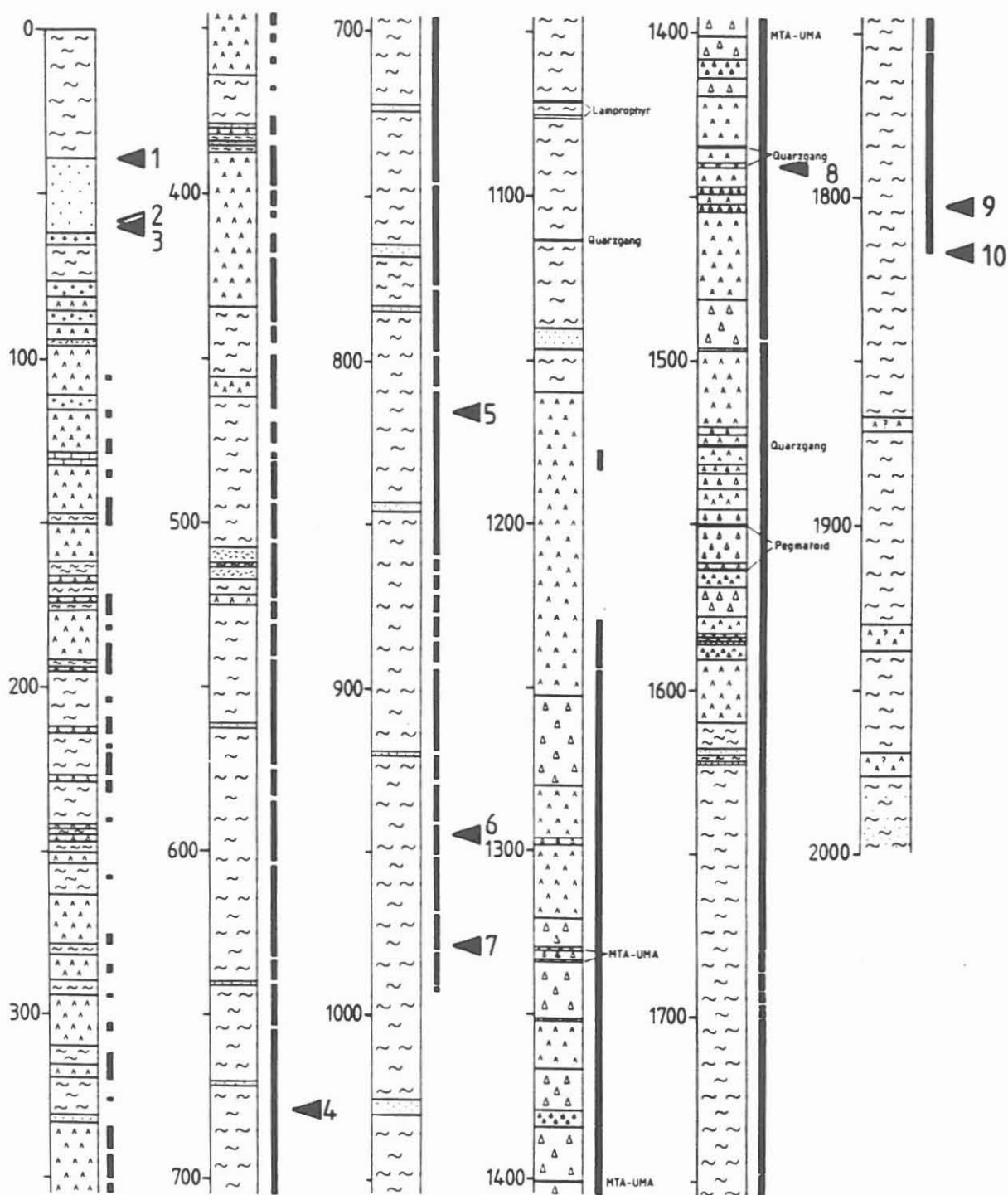
Quarze eignen sich im allgemeinen besonders gut für Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen. Im Dünnschliff ist Quarz transparent. Einschlußbahnen können somit in verschiedenen Ebenen beobachtet werden. In Gesteinen wie z.B. Graniten befindet sich die Hauptmenge der fluiden Einschlüsse im Quarz. In Feldspäten und Glimmermineralen werden nur sehr selten Flüssigkeitseinschlüsse angetroffen. Dies beruht auf der temperaturabhängigen Löslichkeit des Quarzes. Bei der Überprägung von Gesteinen mit thermalen Lösungen wird vor allem der Quarz bei höheren Temperaturen "angelöst", und "verheilt" beim Abkühlen des Systems wieder. Bei diesem Vorgang können "Reste" der Lösungen als Flüssigkeitseinschlüsse im Quarz eingeschlossen werden.

Tab. G.3.1: Zusammenstellung des Probenmaterials, das für Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen ausgewählt wurde

Probennummer	KM/Sekt.	Teufe (m)	Probentyp	Probenart	Begleitstein	kurze Beschreibung des Begleitgesteins
1 (VB1)	-	39	Cuttings		Paragneis	
2	-	58	Cuttings		Paragneis	
3	-	60	Cuttings		Paragneis	
4	134A1bT	678.9	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-BIO-PLG-Gneis
5	174A1x	814.9	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-PLG-Gneis
6	234U1u	943.5	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. BIO-PLG-Gneis
61	245D3o	974.0	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-Gneis
7	246B2d	977.7	Kernmaterial	Mobilisat (Qz-Fspt)	Paragneis	GNT-führ. SIL-MUS-BIO-Gneis
8	299A1T	1439.6	Kernmaterial	Quarzgang	Amphibolit	GNT-HBL-PLG-Amphibolit
9	405C1k	1802.1	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-führ. SIL-MUS-BIO-Gneis
10	408E1vT	1816.2	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-Gneis
11 (VB1a)	461A1b	2021.1	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	alterierter GNT-SIL-BIO-Gneis
12	468G1t	2051.2	Kernmaterial	Quarzgang	Lamprophyr	
13	471F1t	2063.3	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-führ. MUS-SIL-BIO-Gneis
14	476D1j	2081.2	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-führ. MUS-SIL-BIO-Gneis
15	483B	2115.2	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. SIL-MUS-BIO-Gneis Quarz und Graphit
16	523A1d	2221.3	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	vergr. GNT-BIO-Gneis (Sulfide und Graphit)
17	576	2380	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	SIL-BIO-Gneis

Tab. G.3.1 Fortsetzung:

Proben- nummer	KM/Sekt.	Teufe (m)	Probentyp	Probenart	Begleitge- stein	kurze Beschreibung des Begleitgesteins
18	596A1b	2441.4	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. Sil-BIO-Gneis Graphit und Pyrit
19	596B1e	2442.1	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-Gneis Graphit und Pyrit
20	601H8a	2469.1	Kernmaterial	Quarzgang +HBL Blas	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-Gneis
21	606A1a	2483.0	Kernmaterial	Quarzgang	HBL-Gneis	GNT-HBL-BIO-Gneis
21	653C2g	2721	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-SIL-BIO-Gneis
21	654A1h	2722	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	SIL-BIO-Gneis
21	655C1f	2728	Kernmaterial	Quarzlin.	Paragneis	GNT-Führ. SIL-BIO-Gneis
22	674A1oT	2785.0	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-Gneis
23	683E1p	2808.5	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-Gneis (st. hydrotherm. Gangvererzung D1n)
24	704A1b	2872.5	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-ärmer SIL-BIO-Gneis (st. hydrotherm. überprägt, Pyrit)
25	713A1aK	2911.1	Kernmaterial	Mobilisat	HBL-Gneis	GNT-führ. BIO-HBL-Gneis
26	722E2m	2938.8	Kernmaterial	Quarzgang	HBL-Gneis	AMP bis BIO-HBL-Gneis
27	754C1k	3081.7	Kernmaterial	Mobilisat	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-MUS-Gneis
28	785A2	3214.0	Kernmaterial	Quarzgang	Paragneis	GNT-führ. SIL-BIO-MUS-Gneis
29	788B1l	3227.9	Kernmaterial	Quarzgang	Aplit	Amphibolit nahe Lamprophyr
30	880A1b	3598.2	Kernmaterial	Quarzgang m GNT PYR	Aplit	feink. GNT-Amphibolit
31	882	3601.2	Kernmaterial	Quarzgang	Aplit	



Lithologie:

- | | | |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Amphibolit | Kataklastit (KEL) | Metagabbro |
| Oligoklasische Einschaltungen | Lamprophyr | Meta-Ultramafit (MTA-UMA) |
| Breitgneis | Marmor | Quarzgang |

Kerngewinn

KTB Oberptatz VB	
Geologisches Profil	
0m - 1998.3m	
Geogr. NTB Feinbohr	Lith. & Huber
19 10 88	B 6

Abb. G.3.1 Probennahmepunkte für die Dekreptionsanalytik im geologischen Profil der KTB-Vorbohrung 0 - 2000 m (VB1).

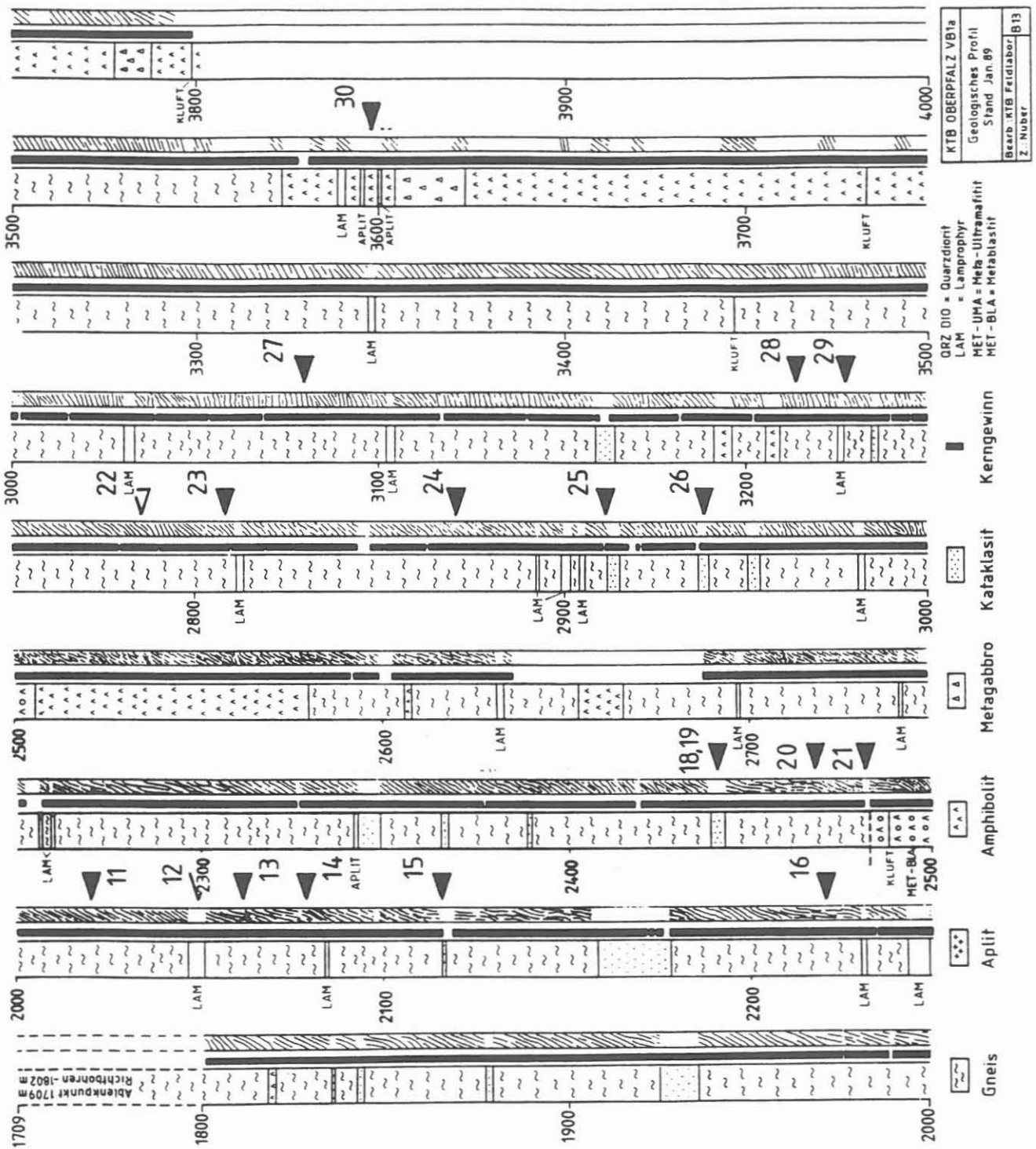


Abb. G.3.2 Probennahmepunkte für die Dekrepiationsanalytik am geologischen Profil der KTB-Vorbohrung 1700 - 3800 m (VB1a).

Von einer Beprobung der Gesteinsquarze der bei der KTB-Vorbohrung durchteuften Wechselfolge von Metasedimenten mußte abgesehen werden, da die Quarze in diesen Gesteinen zu klein sind und die Mineralseparation sehr zeitaufwändig wäre.

Aus Tabelle G.3.1 wird ersichtlich, daß Quarzgänge hauptsächlich in den Paragneisen der ZEV auftreten. Nur untergeordnet sind Quarzgänge in Amphiboliten (Probe 8), Hornblende-Gneisen (Probe 26) und Lamprophyren (Proben 12 und 29) anzutreffen. Quarz-Feldspat-Mobilisate wurden ebenso am häufigsten in Paragneisen beobachtet.

Von dem beprobten Gesteinsmaterial (zumeist Plugs=Minibohrkerne, Endstücke oder sog. Roller etc.) wurden Dünnschliffe mit einer Schichtstärke von etwa 70 µm zur mikroskopischen Bestandsaufnahme der auftretenden Flüssigkeitseinschlüsse angefertigt. Das Probenmaterial wurde anschließend gebrochen und in Korngrößenfraktionen kleiner 1mm, 1mm bis 2mm und größer 2mm gesiebt. Aus der Korngrößenfraktion 1mm bis 2mm wurden per Hand etwa 1 g Quarze separiert, die möglichst frei von festen Einschlüssen waren.

Die Quarzseparate wurden anschließend zur Entfernung von Calcitmineralisation mit verdünnter Salzsäure behandelt. Nach einer weiteren Säurebehandlung mit Königswasser wurden die Quarzseparate mit bidestilliertem Wasser mehrfach gereinigt. Im Ultraschallbad lassen sich bei diesem abschließenden Reinigungsschritt auch feinere Staubteilchen bzw. Mineralbruchstücke entfernen. Nach dem Trocknen der Quarze bei 70° C im Trockenschrank wurden die Separate einer optischen Endkontrolle unter dem Binokular unterworfen.

G.4 Ergebnisse der Flüssigkeitseinschlußuntersuchung im Tiefenbereich 0 bis 2500 m (VB1, VB1a).

Einschlußpetrographie:

Die Dünnschliffuntersuchung zeigte, daß sowohl in Quarzen aus Quarzgängen als auch aus Quarz-Feldspat-Mobilisaten hauptsächlich wäßrige ein- bzw. zweiphasige (Flüssigkeit, Dampfblase) Flüssigkeitseinschlüsse vorkommen (siehe Abb. G.4.1 bis G.4.4). Nach der Art des Auftretens sind die Einschlüsse als hauptsächlich sekundär anzusehen. Für die Definition der Begriffe "primäre, sekundäre, pseudosekundäre Einschlüsse" sei auf ROEDDER (1984) verwiesen. Sekundäre Einschlußbahnen bilden sich erst im Anschluß an die Kristallisation des Wirtsminerals bei der Zirkulation hydrothermalen Lösungen auf Korngrenzen bzw. kleinen Rissen in den Quarzen. Typisch für sekundäre Einschlüsse ist, daß unterschiedliche Einschlußbahnen ungestört in ihrer Fortpflanzungsrichtung über die Korngrenzen benachbarter Mineralkörner hinweg beobachtet werden können (s. Abb. G.4.1 und G.4.2). Die sekundären Einschlüsse in den Quarzen der KTB-Vorbohrung sind also genetisch jünger als die Kristallisation der Quarze (bzw. die Bildung der Quarzgänge), die beim "Einfangen" der hydrothermalen Lösungsreste bereits abgeschlossen war.

Die fluiden Einschlüsse in den Proben der KTB-Vorbohrung sind im allgemeinen relativ klein ($< 15 \mu\text{m}$). Sehr häufig sind Einschlußbahnen, bei denen aufgrund der geringen Größe der Einschlüsse ($< 1 \mu\text{m}$) keine Aussage gemacht werden kann, ob die Einschlüsse wäßrig einphasig oder wäßrig zweiphasig auftreten. Die relative Größe der in den zweiphasig wäßrigen Einschlüssen auftretenden "Gas- bzw. Dampfblase", die beim Abkühlen - durch Volumenverminderung - der im Quarz eingeschlossenen thermalen Lösung entstand, ist ein Maß für die ursprüngliche Temperatur der hydrothermalen Lösung. In den Quarzen der KTB-Vorbohrung wurden nur selten Blasenvolumina größer als 3 Vol. % - bezogen auf das Gesamtvolumen der Flüssigkeitseinschlüsse - beobachtet. Fluide Einschlüsse z.B. der Granite des Harzes (HOMANN, 1989) weisen Blasenvolumina zwischen 1 bis 2 Vol. % und "Einfangstemperaturen" von im Mittel 150°C auf. Fluideinschlüsse in den Gesteinsquarzen der Granite des mittleren Schwarzwaldes (Triberger Granit) haben Blasenvolumina zwischen 10 und 25 Vol. % und "Einfangstemperaturen" von etwa 250 bis 400°C (HOMANN, 1989). Aus dem Vergleich der Blasenvolumina dieser unterschiedlichen Lokalisationen läßt sich abschätzen, daß die fluiden Einschlüsse in Quarzen der KTB-Vorbohrung etwa zwischen 150 und 300°C homogenisieren sollten.¹⁾ Die Abschätzung der "Einfangstemperaturen" ist vergleichbar mit den durch Mikrothermometrie tatsächlich gemessenen Homogenisierungstemperaturen in den Quarzen der KTB-Vorbohrung durch die Fluid-Arbeitsgruppen in Göttingen (BEHR et al.) und in Karlsruhe (ALTHAUS et al.) (siehe hierzu Kap. G.5).

1) Mikrothermometrische u. kryometrische Messungen können im KTB-Feldlabor nicht durchgeführt werden.

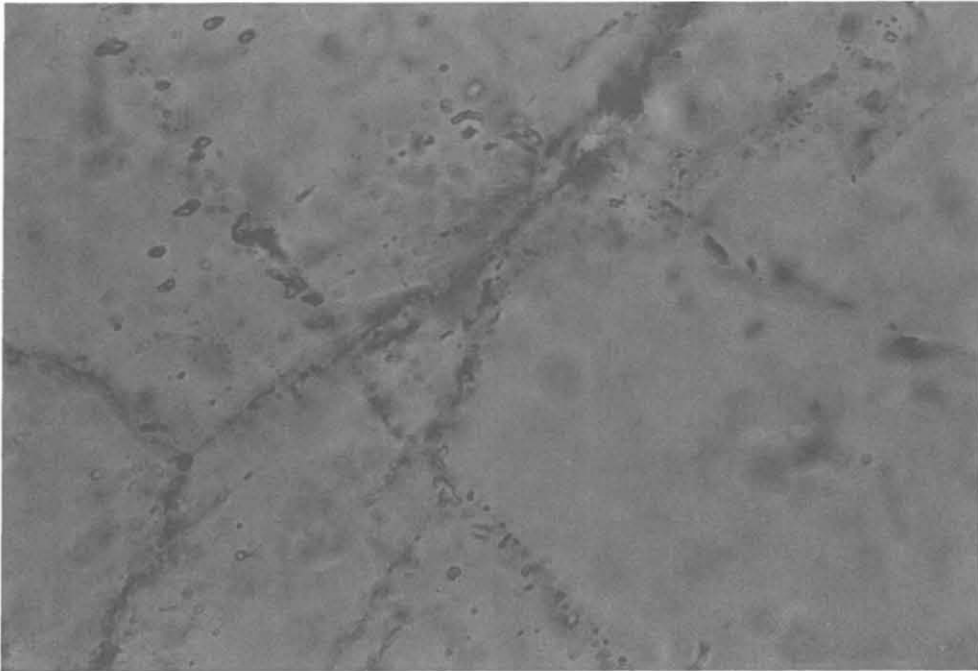


Abb. G.4.1 Sekundäre ein- bis zweiphasige Flüssigkeitseinschlußbahnen, die über die Korngrenzen zweier benachbarter Quarze hinaus beobachtet werden können. Quarzgang (KM 234 C1u, Teufe 944 m) Vergrößerung; (1 : 500) ohne Nicols.

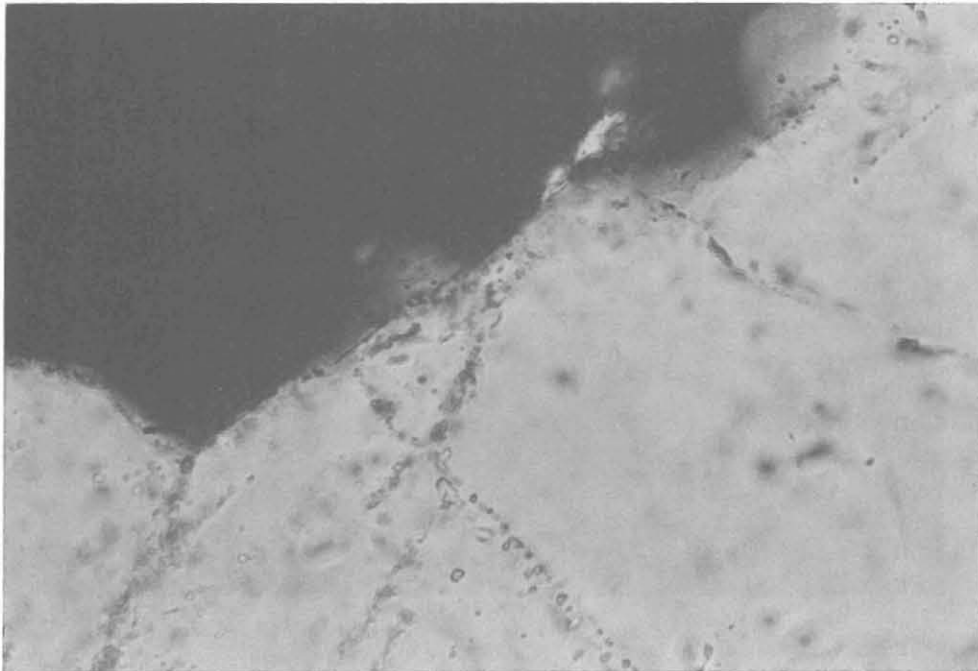


Abb. G.4.2 Bildauschnitt siehe Abb. G.4.1 mit gekreuzten Nicols, um die Korngrenze sichtbar zu machen.

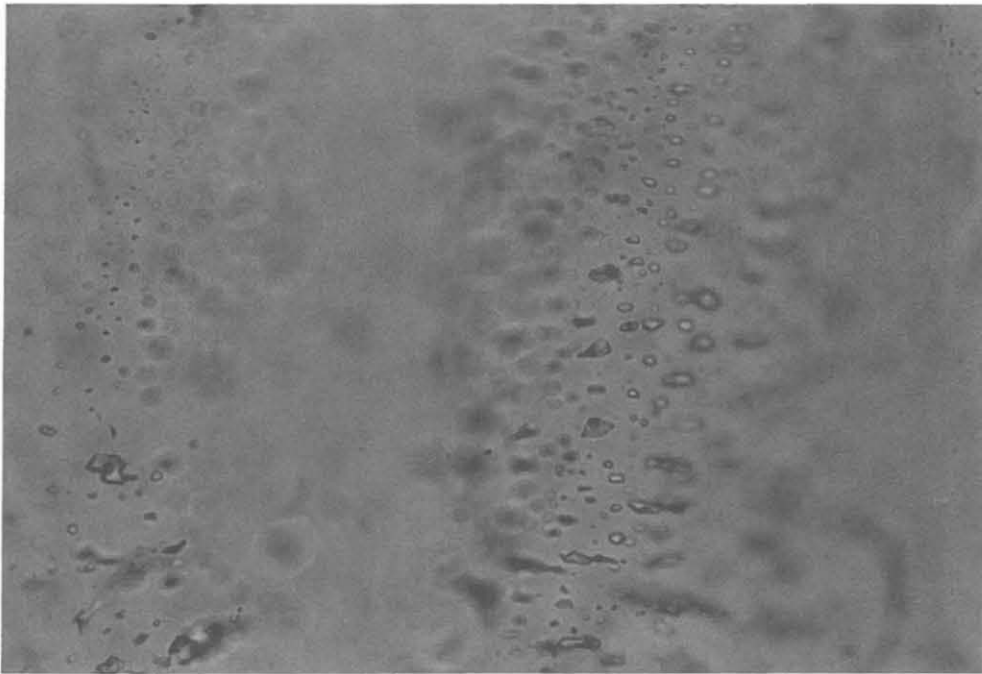


Abb G.4.3 Planare Ebene sekundärer ein- bis zweiphasiger Flüssigkeitseinschlüsse. Quarz aus Quarzgang (KM 234 Clu, Teufe 944 m); Vergrößerung: (1 : 500).

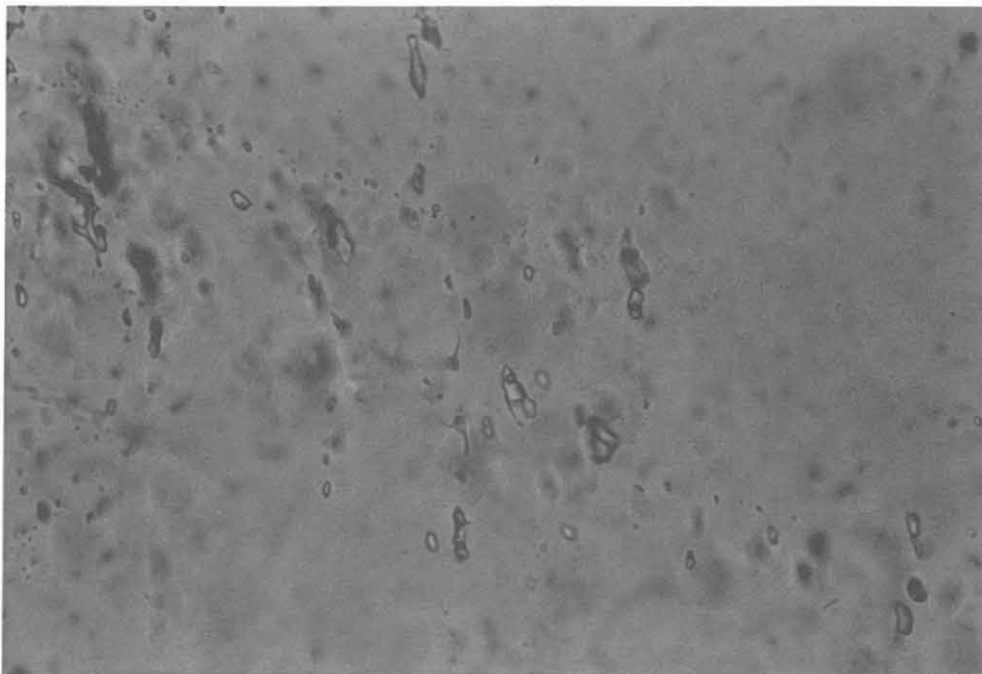


Abb. G.4.4 Mehrere größere Fluideinschlüsse die z.T. durch "necking down" sekundär verändert wurden. Perlschnurartig aneinandergereihte ein- bis zweiphasige Einschlüsse 1 μm . Quarz aus Quarzgang (KM 234 Clu, Teufe 944 m); Vergrößerung (1 : 500).

Dekrepiationsanalysen:

Dekrepiationsmessungen wurden an allen in Tab. G.3.1 zusammengestellten Proben durchgeführt. Die Hauptkationengehalte (in äquivalent ppm) der Fluideinschlüsse aus Quarzen der KTB-Vorbohrung sind in Tab. G.4.1 zusammengestellt.

Während bei den ersten Messungen¹⁾ die absoluten Gehalte des Elementes K in den Dekrepiaten unter der Nachweisgrenze des ICP-AES lagen, konnten bei nachfolgenden Meßserien durch Modifizieren der Durchflußrate des Trägergasstromes (s. Kap. G.2) erhöhte Nettoimpulsraten bei der Dekrepiationsanalyse erzielt werden.

Die Ergebnisse der Dekrepiationsanalysen an fluiden Einschlüssen in Quarzen aus Quarzgängen und Quarz-Feldspat-Mobilisaten sind in Abb. G.4.5 dargestellt. Die Na-Vormacht in den Einschlüssen der Quarze wird besonders deutlich in der in Abb. G.4.5 gewählten Dreiecksdarstellung der Hauptkationengehalte der Elemente Na, Ca und K.

Die K/Na-Verhältnisse der Fluideinschlüsse in den aus unterschiedlichen Teufen stammenden Quarzproben variieren zwischen 0.32 und 0.05 (Gewichtsverhältnisse). Eine deutliche Ausnahme bildet die Probe 12 aus Teufe 2051 m. Die K/Na-Verhältnisse der fluiden Einschlüsse dieser Probe liegen bei 0.75.

Die Ca/Na-Verhältnisse der fluiden Einschlüsse in den Quarzen der KTB-Vorbohrung weisen einen Variationsbereich von 0.01 bis 0.30 (Gewichtsverhältnisse) auf.

In Abb. G.4.5 ist weiterhin der darstellende Punkt der Dekrepiationsanalyse von Flüssigkeitseinschlüssen in Gesteinsquarzen des Falkenberger Granites aufgeführt.

1) Proben 5, 8, 9, 10, 16, 20 und 21 in Tab. G.4.1

Tabelle G.4.1 Ergebnisse der Flüssigkeitseinschlußanalysen (Dekrepatations-ICP-Methode) ausgewählter Proben der KTB-Vorbohrung. Probennummern s. Tab. G.3.1; alle Angaben in äquivalent ppm (Erläuterungen s. Text).

Probennummer	Teufe (m)	äquivalent ppm			K/Na	Ca/Na	Gewichtsverhältnisse			Probenart
		Na	Ca	K			Na:	Ca:	K	
4	679	5.2	0.14	0.52	0.10	0.03	89	2	9	Quarzungang Paragneis
4		4.6	0.14	0.58	0.13	0.03	86	3	11	
5	815	2.4	0.2	-	-	0.08	92	8	-	Quarzungang Paragneis
5		2.2	0.2	-	-	0.09	92	8	-	
6	944	2.5	0.2	0.1	0.04	0.08	89	7	7	Quarzungang Paragneis
6		2.5	0.3	0.14	0.06	0.12	85	10	5	
61	974	0.73	0.04	0.23	0.32	0.06	73	4	23	Mobilisat Paragneis
7	978	0.75	0.04	0.23	0.31	0.05	74	4	23	Mobilisat Paragneis
8	1440	17.2	0.32	-	-	0.02	98	2	-	Quarzungang Amphibol.
9	1802	1.0	0.08	-	-	0.08	93	7	-	Mobilisat Paragneis
9		0.6	0.05	-	-	0.08	92	8	-	
10	1816	0.9	0.15	-	-	0.17	86	14	-	Quarzungang Paragneis
11	2021	1.5	0.01	0.20	0.13	0.01	88	1	11	Mobilisat Paragneis
12	2051	1.4	0.28	1.04	0.74	0.20	52	10	38	Quarzungang Lamproph.
16	2221	0.7	0.02	-	-	0.03	97	3	-	Mobilisat Paragneis
16		0.6	0.02	-	-	0.03	97	3	-	
20	2469	0.5	0.1	-	-	0.20	83	17	-	Quarzungang Paragneis
20		0.3	0.1	-	-	0.33	75	25	-	
21	2483	0.6	0.1	-	-	0.17	86	14	-	Quarzungang HBL-Gneis
22	2785	1.2	0.05	0.15	0.13	0.04	86	4	11	Quarzungang Paragneis
22		2.0	0.08	0.23	0.12	0.04	87	3	10	
24	2873	2.0	0.59	0.44	0.22	0.30	66	19	15	Quarzungang Paragneis
26	2939	28.5	1.31	2.7	0.10	0.05	88	4	8	Quarzungang HBL-Gneis
28	3214	6.5	0.36	1.68	0.26	0.06	76	4	20	Quarzungang Paragneis
		4.5	0.27	1.45	0.32	0.06	72	4	23	
		5.6	0.30	1.39	0.25	0.05	77	4	19	
29	3228	10.1	0.59	1.90	0.19	0.06	80	5	15	Quarzungang Amphibol.
Probennummer	Teufe (m)	äquivalent ppm			K/Na	Ca/Na	Gewichtsverhältnisse			Probenart
		Na	Ca	K			Na:	Ca:	K	
Granit-Falkenberg		1.7	0.06	0.61	0.36	0.04	72	3	26	-

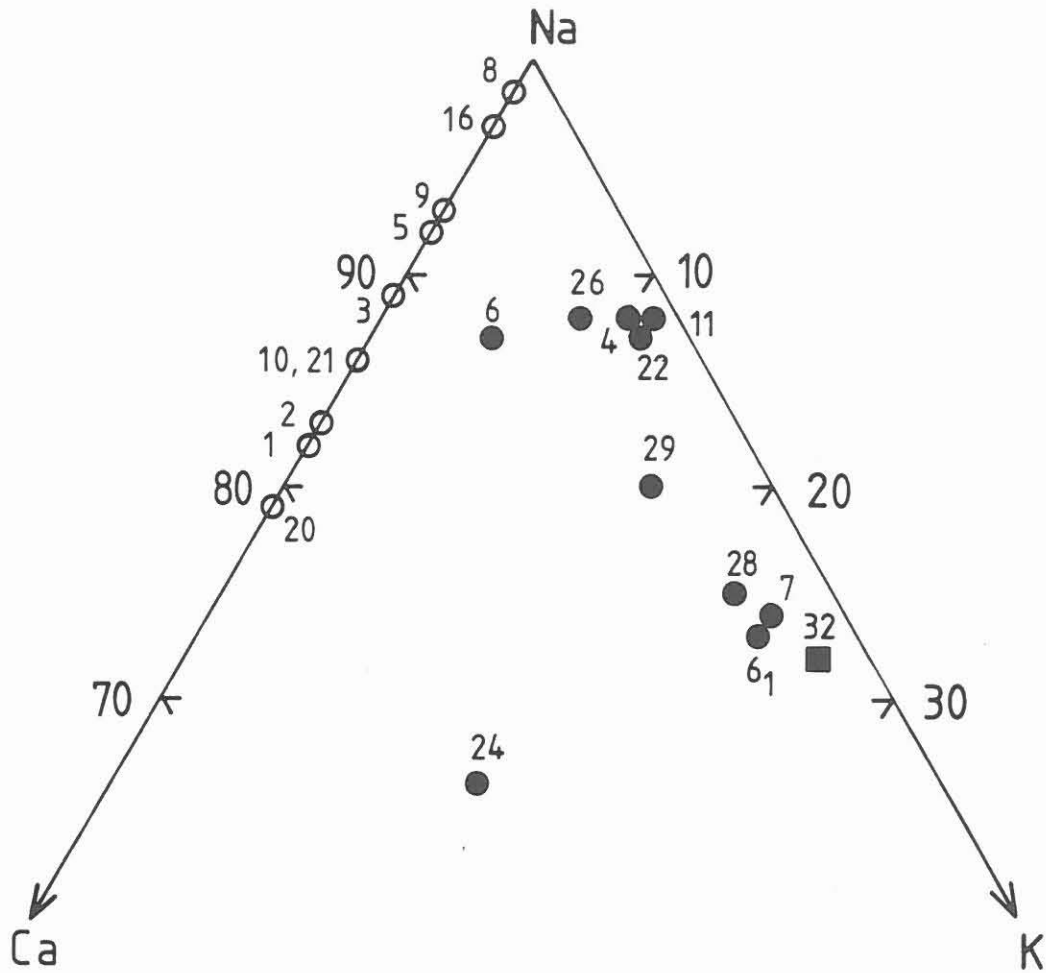


Abb. G.4.5 Kationenverhältnisse (Gewichtsverhältnisse) fluid-
 der Einschlüsse bestimmt an Quarzgängen und Quar-
 zen aus Quarz-Feldspat-Mobilisaten der KTB-Vor-
 boh rung mit der Dekre pita tions-ICP-Methode (KTB-
 Feldlabor). Offene Kreise: Messungen, bei denen
 die K-Konzentrationen unter der Nachweisgrenze
 des ICP-AES lagen; geschlossene Kreise: Messun-
 gen, bei denen die Elemente Na, Ca und K analy-
 tisch erfaßt wurden.

1) 39 m	7) 978 m	20) 2469 m	32) Granit
2) 58 m	8) 1440 m	21) 2483 m	Falken-
3) 60 m	9) 1802 m	22) 2785 m	berg
4) 679 m	10) 1816 m	24) 2873 m	
5) 815 m	11) 2021 m	26) 2939 m	
6) 944 m	12) 2051 m	28) 3214 m	
61) 974 m	16) 2221 m	29) 3228 m	

G.5 Diskussion

Im Folgenden soll veranschaulicht werden, daß durch die Ergebnisse der Dekrepitations-ICP-Analytik die Aktivität eines bzw. mehrerer spät- bis postmagmatischer hydrothermaler Zirkulationssysteme im Bereich der ZEV aufgezeigt werden kann. Durch die Einschlußanalysen kann ein kontinuierlicher temperaturabhängiger chemischer Entwicklungstrend der Fluide nachgewiesen werden, der das Resultat der Austauschreaktion einer bzw. mehrerer ursprünglich höher temperierter salinärer Fluidphasen mit den Mineralphasen der bereits weitgehend abgekühlten Granite darstellt.

Die Ergebnisse der Dekrepitationsanalysen werden im Zusammenhang mit den Ergebnissen der mikrothermometrischen und kryometrischen Untersuchungen der Fluid-Arbeitsgruppen in Göttingen (BEHR et al.) und Karlruhe (ALTHAUS et al.) diskutiert. Nur die Kombination der Ergebnisse der chemischen Analysen und der mikrothermischen bzw. kryometrischen Untersuchungen erlaubt Modellvorstellungen über die Entwicklung eines hydrothermalen Zirkulationssystems im Bereich der ZEV.

Die fluiden Einschlüsse aus Quarzen der KTB-Vorbohrung lassen sich anhand ihrer K/Na- und Ca/Na-Verhältnisse in vier Gruppen mit unterschiedlichem Chemismus unterteilen (s. Tab. G.5.1).

Tab. G.5.1 K/Na- und Ca/Na-Verhältnisse von Fluideinschlüssen in Quarzen der ZEV; Gruppeneinteilung von Proben mit vergleichbarem Fluidchemismus.

Probennummer	Teufe (m)	Gewichtsverhältnisse		
		K/Na	Ca/Na	
Granit Falkenberg		0.36	0.04	
61	974	0.32	0.06	Gruppe 1
7	978	0.31	0.05	
28	3214	0.28	0.06	
29	3228	0.19	0.06	Übergang zw. Gruppe 1 und Gruppe 2
4	679	0.12	0.03	Gruppe 2
11	2021	0.13	0.01	
22	2785	0.13	0.04	
26	2939	0.10	0.05	
6	944	0.05	0.10	
24	2873	0.22	0.30	Gruppe 3
12	2051	0.74	0.20	Gruppe 4

Fluideinschlüsse aus Quarzen der Gruppe 1 haben relativ hohe K/Na-Verhältnisse von im Mittel 0.30 und mittlere Ca/Na-Verhältnisse von 0.06.

Die in den Gesteinsquarzen des Falkenberger Granites eingeschlossenen Fluide haben einen mit der Gruppe 1 vergleichbaren Chemismus. In den Quarzen des Granites haben die Fluideinschlüsse K/Na-Verhältnisse von 0.36 und Ca/Na-Verhältnisse von 0.04. Damit drückt sich die enge genetische Beziehung der Fluide, die den Granitpluton überprägten, mit den in Quarzen aus Quarzgängen bzw. Quarz-Feldspat-Mobilisaten auftretenden Fluide der Gruppe 1 aus.

Die K/Na-Verhältnisse der Fluideinschlüsse in den Quarzen der KTB-Vorbohrung nehmen ausgehend von Einschlüssen der Gruppe 1 über die Probe 29 (Übergang zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2) bis zur Gruppe 2 kontinuierlich ab. Fluide Einschlüsse der Gruppe 2 haben die niedrigsten K/Na-Verhältnisse, abnehmend von etwa 0.13 bis 0.05, bei gleichzeitig ansteigenden Ca/Na-Verhältnissen zwischen 0.01 bis 0.10.

Durch die Dekrepitationsanalytik lassen sich noch zwei weitere Gruppen von Fluideinschlüssen chemisch charakterisieren, die bisher jedoch nur durch jeweils eine verlässliche Analyse repräsentiert werden. Fluideinschlüsse der Gruppe 3 (Probe 24) haben K/Na-Verhältnisse von 0.22 und die höchsten Ca/Na-Verhältnisse von 0.30 aller bisher untersuchten Proben. Fluideinschlüsse der Gruppe 4 (Probe 12) weisen sowohl sehr hohe K/Na-Verhältnisse von 0.75 als auch hohe Ca/Na-Verhältnisse von 0.2 auf.

Aus Tabelle G.5.1 wird ersichtlich, daß bis etwa 3000 m keine Teufenabhängigkeit in der Änderung des Fluidchemismus nachgewiesen werden kann. Des weiteren läßt sich ebenfalls keine Beziehung zwischen dem Fluidchemismus im Quarz und dem den Quarzgang umgebenden Gestein aufzeigen. Aus dieser Beobachtung läßt sich ableiten, daß die Quarzgänge als "Adern" für den Transport der hydrothermalen Lösungen von einem externen Equilibrierungsort - dem Granit - in die Metasedimente und untergeordnet in die Metabasite (nur wenige Quarzgänge) gedient haben.

Berechnung der tatsächlichen Überprägungstemperaturen:

Der Chemismus wäßriger fluider Phasen im Gleichgewicht mit dem Alkalifeldspatsystem $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ist nach experimentellen Untersuchungen (ORVILLE 1963; ELLIS u. MAHON 1967; HEMLEY 1967; FOURNIER 1984) abhängig von der Temperatur. Je höher die Temperatur des Systems, desto höher ist das K/Na-Verhältnis in der Lösung. Die Austauschreaktion zwischen fluider Phase und Alkalifeldspäten läßt sich vereinfacht folgenderweise beschreiben:



Berechnet man aus dem Fluidchemismus in den Quarzen mit dem K/Na-Geothermometer für natürliche Wässer die Equilibrierungstemperaturen mit dem Alkalifeldspatsystem, so wird deutlich (s. Abb. G.5.1), daß die hydrothermale Lösung die den Granit überprägt hat, die höchsten Temperaturen von mindestens 360° C aufwies. Analog zu den sinkenden K/Na-Verhältnissen der Einschlüsse in den Quarzen der KTB-Vorbohrung nimmt die Temperatur über die Einschlüsse der Gruppe 1 bis zu den Einschlüssen der Gruppe 2 kontinuierlich ab und erreicht minimale Werte zwischen 240 und 160° C.

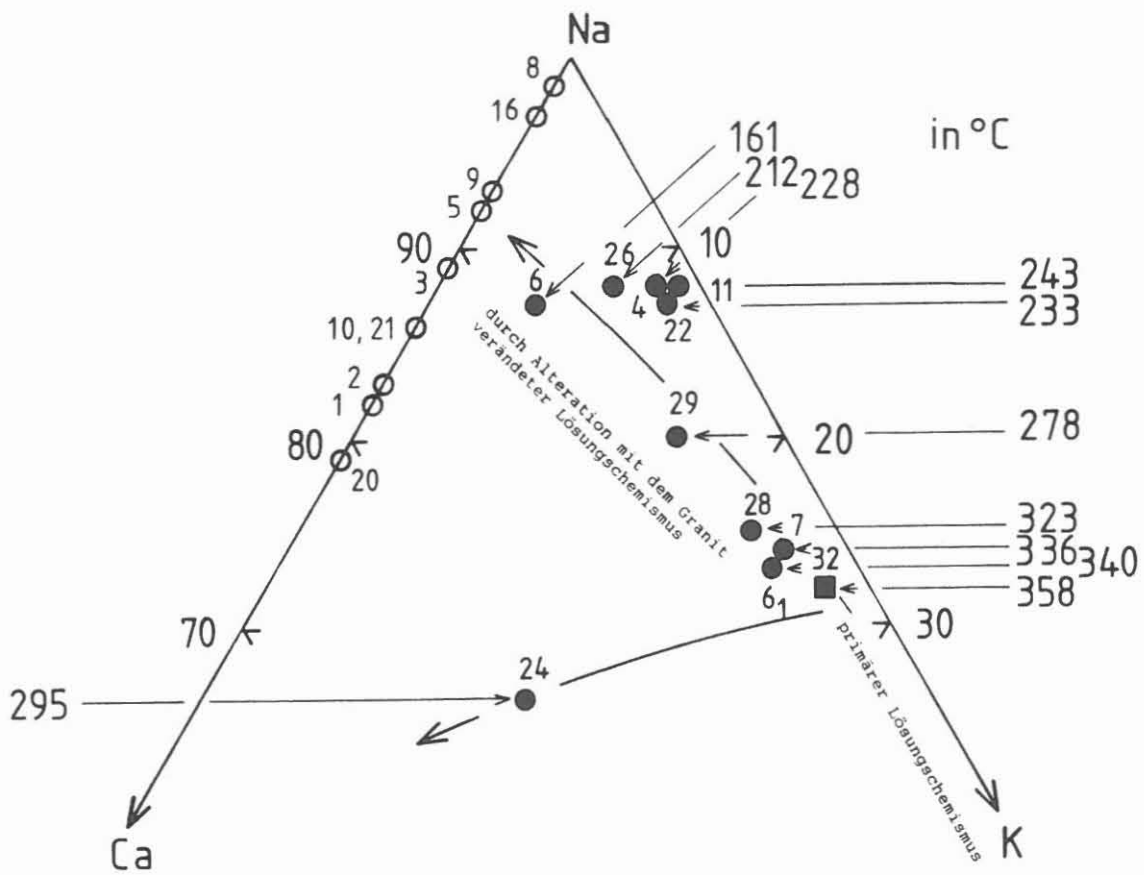


Abb. G.5.1 Dreiecksdarstellung der Hauptkationen Na, Ca und K in fluiden Einschlüssen aus Quarzen der KTB-Vorbohrung und des Falkenberger Granites (Signaturen s. G.4.5). Berechnete Gleichgewichtstemperaturen (K/Na-Geothermometer, Fournier 1984) auf das Alkalifeldspatsystem $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$.

Nimmt man eine Austauschreaktion der ursprünglich heißen hydrothermalen Lösung mit den Mineralen des bereits abgekühlten Granitplutons (thermisches und chemisches Ungleichgewicht zw. Lösung und Granit) nach der Reaktionsgleichung $Ab + K^+ = Or + Na^+$ an, so läßt sich die kontinuierliche chemische Entwicklung der Fluide durch eine Abgabe des K^+ aus der Lösung an das Gestein und eine Na^+ -Zufuhr vom Granit in die Lösung erklären.

Diese Reaktion läuft so lange ab, bis die hydrothermale Lösung im thermischen und chemischen Gleichgewicht mit den Mineralen des Granites ist. Die Gleichgewichtstemperatur läßt sich bei etwa $160^\circ C$ eingrenzen (s. Abb. G.5.1). Diese Temperatur entspricht dann auch der wahren maximalen "Gebirgstemperatur".

Einzelne chemische Entwicklungsstadien der hydrothermalen Lösung bei der Überprägung des Granites können dabei in Quarzgängen bzw. in Quarzen aus Quarz-Feldspat-Mobilisaten beim Austreten der Alterationslösungen aus dem Granit in die Metasedimente bzw. Metabasite der ZEV als Fluideinschlüsse "konserviert" worden sein.

Druck- bzw. Teufenabschätzung der Überprägung:

Aus dem Vergleich der berechneten wahren Equilibrierungstemperaturen mit den von den Fluid-Arbeitsgruppen in Göttingen und Karlsruhe gemessenen Einfangtemperaturen (Homogenisierungstemperaturen), die vom Druck abhängig sind, läßt sich der bei der Überprägung herrschende Druck berechnen. In der Tabelle G.5.2 sind die mikrothermometrischen und kryometrischen Eigenschaften der in Quarzen auftretenden Fluideinschlüsse zusammengefaßt.

Nach Walther und Reutel (freundl. pers. Mitteilung) lassen sich mindestens 3 Gruppen salinärer wäßriger fluider Einschlüsse unterscheiden. Am häufigsten treten wäßrige Fluideinschlüsse mit einer mittleren Salinität von etwa 5 äquivalent Gew.% NaCl auf (Gruppe A). Es lassen sich darüberhinaus noch zwei weitere höher salinare Gruppen wäßriger Fluideinschlüsse eingrenzen (Gruppen B und C).

Tab. G.5.2 Mikrothermometrische und kryometrische Eigenschaften (Reutel, Walther freundl. pers. Mitteilung) von wäßrigen salinaren Flüssigkeitseinschlüssen in Quarzen der KTB-Vorbohrung.

	T _{m_{eis}} in °C	T _{e_{eis}} in °C	Th _M in °C	Berechnete* Salinität äq. Gew.% NaCl
Gruppe A am häufigsten	-3	-21 (z.T. auch -10)	200	4.94
Gruppe B	-7	-38	200	10.94
Gruppe C	-28	-46 (bis z.T. -51)	200 (≤ 70 bis z.T. 330)	27.91

Variationsbereich der Homogenisierungstemperatur aller Gruppen ≈ 100° C - 300° C.

* nach Potter et al., 1978

Für die Gruppe B wurde eine mittlere Salinität von ≈ 11 äq. Gew.% NaCl ermittelt. Die mittlere Salinität der Gruppe C beträgt ≈ 28 äq. Gew.% NaCl. Die Einschlüsse der Gruppen B und C treten in ihrer Häufigkeit hinter den Einschlüssen der Gruppe A zurück. Aus den eutektischen Schmelztemperaturen (Gefrierpunktserniedrigung) des Eises in den Einschlüssen der Gruppen B und C wird ersichtlich, daß die Fluide neben NaCl weitere 2-wertige Metallchloride wie z.B. CaCl₂ enthalten müssen. Die Einschlüsse der Gruppen B und C werden als genetisch jünger als die Einschlüsse der Gruppe A angesehen. Der Variationsbereich der Homogenisierungstemperaturen beträgt etwa 100° C - 300° C. Die mittlere Homogenisierungstemperatur aller drei Gruppen beträgt etwa 200° C. Die mittlere berechnete Equilibrierungstemperatur (vom Druck unabhängig, s. Kap. G.2) beträgt 280° C. Aus der Differenz von 80° C beider Temperaturen läßt sich nach Potter (1977) abschätzen, daß der bei der Überprägung herrschende Druck etwa 100 MPa (= 1 Kb) betrug. Dies entspricht einer Teufe von ca. 4 km.

Berechnung der absoluten Elementgehalte in der hydrothermalen Lösung:

Aus den Dekrepitationsanalysen können die absoluten Elementgehalte in den Flüssigkeitseinschlüssen berechnet werden, wenn die Salinität der Fluide bekannt ist. Die mittlere Salinität der am häufigsten auftretenden Flüssigkeitseinschlüsse (Gruppe A in Tab. G.5.2) beträgt 5 äq. Gew.% NaCl.

Tabelle G.5.3 faßt die berechneten Absolutgehalte in den Flüssigkeitseinschlüssen der Gesteinsquarze des Falkenberger Granites und aus Quarzen der KTB-Vorbohrung zusammen.

Tab. G.5.3 Aus der Dekrepitationsanalyse und einer mittleren Salinität der häufigsten Einschlüsse von 5 äq. Gew.% NaCl berechnete absolute Elementgehalte (in ppm) der hydrothermalen Lösung.

	Teufe (m)	Na (ppm)	Ca (ppm)	K (ppm)	
Granit		13920	490	4990	
Falkenberg					
61	974	14160	780	4460	
7	978	14270	760	4380	Gruppe 1
28	3214	14770	820	3820	
					Übergang zw.
29	3228	15560	910	2930	Gruppe 1 u. Gruppe 2
4	679	17170	490	1920	
11	2021	17020	110	2270	
22	2785	16720	680	2010	Gruppe 2
26	2939	17010	780	1610	
6	94	16910	1685	810	
24	2873	12810	3780	2820	Gruppe 3
12	2051	9990	2000	7420	Gruppe 4

Aus Tabelle G.5.3 wird deutlich, daß die heiße hydrothermale Lösung, die den bereits auf Temperaturen des Nebengesteines abgekühlten Granitpluton ($\leq 160^\circ \text{C}$) überprägte, K-Gehalte von etwa 5000 ppm aufwies. Bei der Abkühlung des Granitplutons, der durch die Überprägung mit den heißen salinaren Wässern kurzfristig aufgeheizt wurde, verarmte die primäre Lösung zunehmend an K^+ und reicherte Na^+ an. Der Chemismus der Einschlüsse der Gruppe 2 zeigt, daß bei der Plagioklaszersetzung im Granit auch Ca^{2+} an die Lösung abgegeben wurde. Die Ca-Gehalte steigen von etwa 500 ppm auf 1700 ppm an.

Auch in Probe 24 (Teufe 2873 m) der Gruppe 3 wurden hohe Ca-Gehalte ermittelt. In dieser Probe ist offenbar ein höherer Anteil Ca-reicher höher salinärer Alterationsfluide enthalten.

Probe 12 der Gruppe 4 repräsentiert aufgrund ihres Einschlußchemismus und der daraus berechneten hohen Equilibrierungstemperatur von 420°C möglicherweise einen älteren Überprägungsvorgang, der noch mit der Abkühlungsphase der erstarrenden Granitschmelze in Verbindung gebracht werden könnte.

Modell für die Entwicklung eines hydrothermalen Zirkulationssystems in der ZEV:

In Abbildung G.5.2 sind in einem Temperatur/Teufendiagramm die einzelnen Entwicklungsstadien eines hydrothermalen Zirkulationssystems in der ZEV dargestellt.

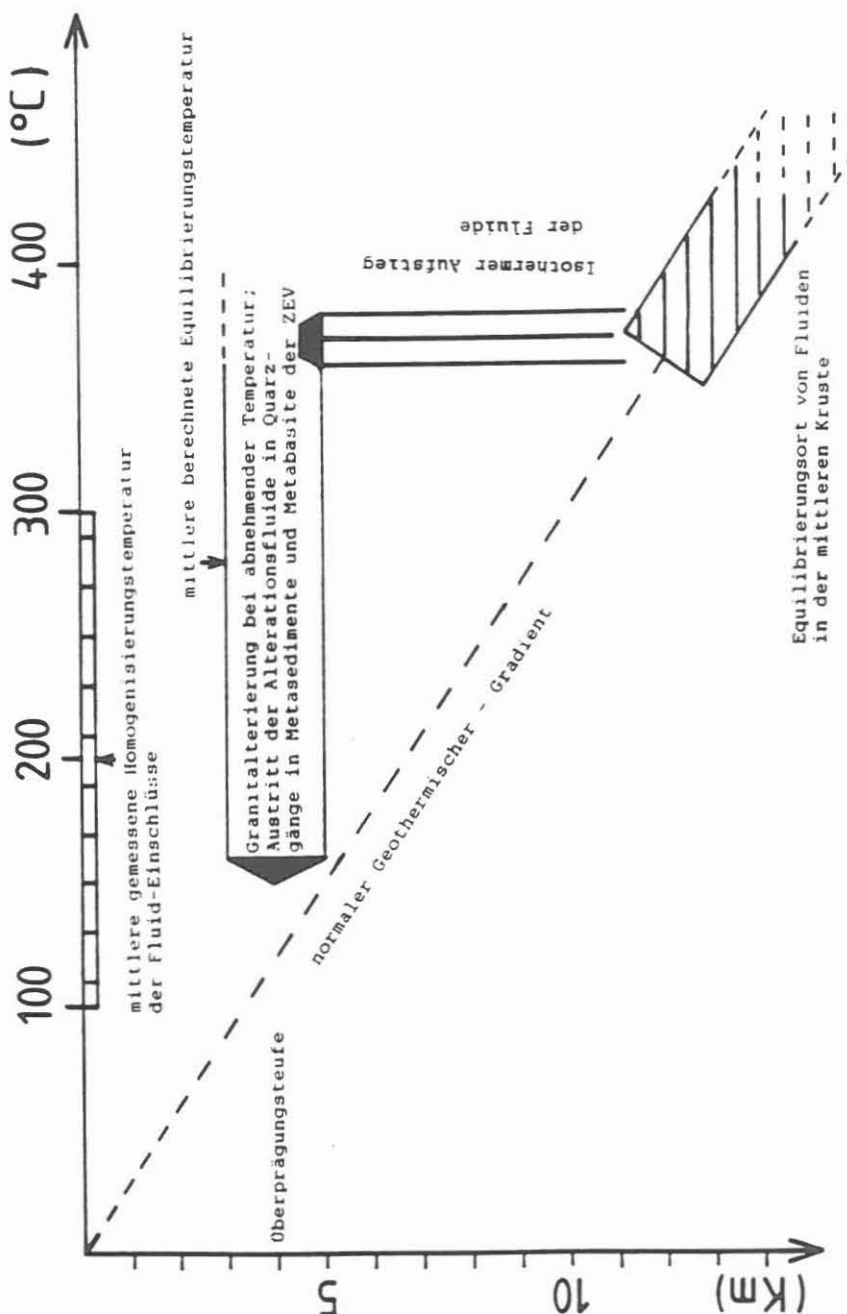


Abb.G.5.2 Tiefen/Temperatur-Diagramm als Modell für die Entwicklung eines hydrothermalen Zirkulationssystems im Bereich der ZEV.

Der Entstehungsort von hydrothermalen Lösungen mit Temperaturen größer als 360°C ist bei einem normalen geothermischen Gradienten in der mittleren Kruste bei etwa $\geq 12\text{ km}$ anzunehmen. Die heißen salinaren Formationswässer wurden zunehmend aufstiegsfähig. Beim isothermen Aufstieg auf tiefgreifenden Spaltensystemen, die zuvor bereits den aufsteigenden Granit-schmelzen gedient haben könnten, trafen die heißen Fluide in etwa 4 km Tiefe auf den bereits abgekühlten Pluton. Im Temperaturbereich zwischen etwa $\geq 360^{\circ}\text{C}$ und 160°C alterierten die im chemischen Ungleichgewicht mit dem Granit stehenden Fluide die Mineralphasen des Plutons. Die hydrothermale Lösung gibt dabei K^{+} an das Gestein ab und nimmt zunächst Na^{+} , bei fortschreitender Alteration auch Ca^{2+} aus dem Gestein auf. Aus der ursprünglich heißen niedrig salinaren hydrothermalen Lösung entwickelten sich im Porenraum der Granite zunehmend kälter werdende, höher salinare Alterationsfluide. Die unterschiedlichen chemischen Entwicklungsstadien der hydrothermalen Lösungen bei Alteration des Granites sind in den Flüssigkeitseinschlüssen in Quarzen aus Quarzgängen und Quarz-Feldspat-Mobilisaten beim Austritt der Fluide aus dem Pluton in Metasedimente und Metabasite "festgehalten" worden. Die aus dem Pluton austretenden und auf Quarzgängen transportierten z.T. noch sehr heißen Fluide sind dann für die Alterationserscheinungen, die in Metasedimenten und Metabasiten beobachtet werden können, verantwortlich. In den Gesteinsquarzen der Metasedimente und Metabasite können sich dabei zunehmend Ca^{2+} -reichere, höher salinare Fluide entwickelt haben.

G.6 Zusammenfassung und Vorausblick

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse von Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen mit dem ICP-Dekrepitationsverfahren (D-ICP-Verfahren) im KTB-Feldlabor vorgestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, daß das D-ICP-Verfahren für die schnelle Routineuntersuchung von Fluideinschlüssen geeignet ist. Im Hinblick auf kernlose Bohrstrecken bei der Hauptbohrung kann durch Dekrepitationsanalysen an Bohrklein sichergestellt werden, daß die für eingehende Fluiduntersuchungen interessanten Gesteinspartien erkannt und die Durchführung von Kernbohrarbeiten daraufhin eingeleitet werden können.

Anhand der Ergebnisse der Flüssigkeitsuntersuchungen im KTB-Feldlabor konnte der Chemismus der Fluideinschlüsse bestimmt werden. Aus dem Chemismus der Einschlüsse konnte eine vom Druck unabhängige Temperaturabschätzung der Überprägungsergebnisse durchgeführt werden. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der mikrothermometrischen und kryometrischen Untersuchungen der Fluid-Arbeitsgruppen in Göttingen und Karlsruhe wurde ein Modell für die Entwicklung eines hydrothermalen Zirkulationssystems in der ZEV vorgeschlagen werden, welches folgende Entwicklungsstadien aufwieß:

- isothermer Aufstieg heißer ($\geq 360^\circ \text{C}$) Na-K-betonter salinärer (5 äq. Gew.% NaCl) Fluide, die aus einer Tiefe von etwa ≥ 12 km stammten.
- Überprägung des bereits auf Temperaturen des Nebengesteins ($\leq 160^\circ \text{C}$) abgekühlten Falkenberger Granites in einer Tiefe von etwa 4 km.
- Entwicklung von Na- bzw. Na-Ca-betonten Alterationsfluiden im Granit in einem Temperaturgradienten zwischen $\geq 360^\circ \text{C}$ und $\leq 160^\circ \text{C}$ bei ansteigender Salinität der Fluide.
- Austritt der Fluide unterschiedlicher chemischer Entwicklungsstadien aus dem Pluton und Transport der austretenden Fluide auf Quarzgängen in Metasedimente und untergeordnet Metabasite.
- Alteration der Metasedimente und Metabasite durch die auf den Quarzgängen herbeigeführten z.T. noch sehr heißen salinaren Fluide.

G.7 Literaturverzeichnis

- ALDERTON, D.H.M., THOMPSON, M., RANKIN, A.H. and CHRYSSOULIS, S.L. (1982): Developments of the ICP-linked decantation technique for the analysis of fluid inclusions in quartz. In: R. Kreulen and J. Touret (Guest-Editors), Current Research on Fluid Inclusions. Chem. Geol., 37, 203-213.
- BENJAMIN, T., CHARLES, R. and VIDALE, R. (1983): Thermodynamic parameter and experimental data for the Na-K-Ca geothermometer. Journal of volcanology and geothermal research, 15, 176-186.
- CHRYSSOULIS, S.L. (1983): Study of the effects of feldspar and mica contamination upon the analysis of fluid inclusions by the decantation-ICP method. Chem. Geol., 40, 323-335.
- ELLIS, A.J. and MAHON, W.A.J. (1967): Natural hydrothermal systems and experimental hot water rock interactions (Pt. II). Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 31, 519-538.
- FOURNIER, R.O. (1984): Chemical geothermometer for geothermal exploration. In: HENLEY, R.W., TRUESDELL, A.H., BARTON, P.B. and WITHNEY, J.A. (eds.): Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. - Reviews in economic geology. Vol. 1 (Society of Economic Geologists).
- FOURNIER, R.O., TRUESDELL, A.H. (1973): An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 37, 1255-1275.
- HEINRICHS, H., KÖNIG, N., SCHULTZ, R. (1985): Atom-Absorptions- und Emissionsspektroskopische Bestimmungsmethoden für Haupt- und Spurenelemente in Probelösungen aus Waldökosystem-Untersuchungen. Im Selbstverlag des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben der Universität Göttingen.
- HEMELEY, J.J. (1967): Aqueous Na/K ratios in the system $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$. Geol. soc. America Ann. Mtgs., New Orleans, La., Programm, 94-95.
- HOMANN, K.D. (1989): Genese der Granite des Harzes und des mittleren Schwarzwaldes und deren subsequeunte hydrothermale Überprägung. Dissertation (in prep.). Göttingen.
- LAGACHE, M. and WEISBROD, A. (1977): The system: Two alkali-feldspars-KCl-NaCl- H_2O at moderate to high temperatures and low pressures. Contrib: Mineral. Petrol. 62, 77-101.

- POTTER, R.W. (1977): Pressure corrections for fluid inclusion homogenization temperatures based on volumetric properties of the system NaCl-H₂O. U.S. Geol. Survey J. Res., 5, 603-607.
- POTTER, R.W., CLYNNE, M.A. and BROWN, D.L. (1978): Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. Econ. Geol., 73, 284-285.
- RANKIN, A.H., ALDERTON, D.H.M., THOMPSON, M. and GOULTER (1982): Determination of uranium: carbon ratios in fluid inclusion decrepitates by inductively coupled plasma emission spectroscopy. Min. Mag., Vol. 46, 179-186.
- ROEDDER, E. (1984): Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol 12. Mineral. Soc. of Am.
- THOMPSON, M., RANKIN, A.H., WALTON, S.J., HALLA, C. and FOO, B.N. (1980): The analysis of fluid inclusion decrepitate by inductively-coupled plasma atomic emission spectroscopy an exploratory study. Chem. Geol., 30: 121-133.
- WHITE, D.E. (1968): Environments of Generation of some base-metal ore deposits. Economic Geology, Vol 63, Nr 4, 301-335.
- WINGE, R.K., FASSEL, V.A., PETERSON, V.J. and FLOYD, M.A. (1985): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, An Atlas of Spectral Information. Physical Sciences Data 20.