

Fluideinschluss-Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz

Autor(en): **Mullis, Josef**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **80 (1987)**

Heft 2: **Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"**

PDF erstellt am: **17.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-166014>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eclogae geol. Helv.	Vol. 80	Nr. 2	Seiten 553–568	Basel, August 1987
---------------------	---------	-------	----------------	--------------------

Fluideinschluss-Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz

Von JOSEF MULLIS¹⁾

ABSTRACT

Fluid inclusions studied in quartz and calcite from 6 Nagra-boreholes and the oil exploration well Pfaffnau in Northern Switzerland were used to evaluate the evolution of fluid composition and trapping conditions. The studied boreholes covered representative sections of the Tertiary, Mesozoic and Permo-Carboniferous sedimentary rocks in addition to the underlying crystalline basement.

Two fluid groups were identified, one containing salt-poor NaCl-(KCl) fluids of Upper Carboniferous age, and a second group containing salt-rich to salt-poor CaCl₂-NaCl-(MgCl₂) fluids trapped between Permian and Tertiary times.

The inclusions of the first group were trapped at relatively high temperatures (~ 100° to ~ 350 °C, rarely up to 400 °C) and low pressures (probably below 1 kbar). Their widespread occurrence along healed fractures in rock forming minerals of the crystalline basement and in detrital quartz grains of the Permo-Carboniferous and Triassic sandstones imply a tectonic/thermic event on a regional scale during late Variscan orogeny.

The second group of fluids comprises early salt-rich and late salt-poor inclusions. The inclusions were trapped between ~ 30° and ~ 140 °C and are detected preferentially in fissure minerals and porefilling cements. The widespread occurrence of the salt-poor fluids along healed fractures inside the host minerals imply major tectonic events especially during Tertiary times. These tectonic events are probably responsible for increased fluid migration and possibly also for brine dilution.

The two fluid groups display a considerable similarity with the high-temperature/low-saliniferous Variscan fluid system and the low-temperature/high-saliniferous post-Variscan fluid system of the Black forest and Oberpfalz.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Grund- und Deckgebirge der 6 Nagra-Bohrungen und in der Erdölbohrung Pfaffnau 1 in der Nordschweiz wurden zwei Einschlussgruppen gefunden.

Die erste Gruppe enthält relativ salzarme NaCl-(KCl)-haltige Fluids, die im Oberkarbon bei Temperaturen zwischen ~ 100° und ~ 350 °C (selten bis 400 °C) und niederen Drücken (vermutlich < 1 kbar) eingeschlossen wurden. Das weitverbreitete Vorkommen dieser Einschlüsse entlang verheilte Risse in gesteinsbildenden Mineralen des kristallinen Grundgebirges und in detritischen Quarzkörnern des Permokarbons und der Trias deuten auf ein thermisch-tektonisches Ereignis hin, das während der ausklingenden variszischen Orogenese stattfand und von grösserer regionaler Ausdehnung war.

Die zweite Einschlussgruppe ist durch CaCl₂-NaCl-(MgCl₂)-haltige Fluids charakterisiert und umfasst frühe salzreiche und späte salzärmere Einschlüsse. Diese wurden bei Temperaturen zwischen ~ 30° und ~ 140 °C in der Zeit vom Perm bis zum Tertiär ins Wirtmineral eingebaut. Ihr häufiges Vorkommen entlang verheilte Risse in Kluftmineralen und in porenfüllenden Zementen zeugt von bedeutenden tektonischen Ereignissen vor allem im Tertiär, in deren Gefolge die Wegsamkeit der Fluids sehr wahrscheinlich erhöht und die frühen salzreichen Fluids möglicherweise verdünnt wurden.

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

Die beiden Fluidgruppen zeigen eine grosse Ähnlichkeit mit dem variszischen hochtemperierten/niedersalinären sowie dem post-variszischen niedertemperierten/hochsalinären Fluidsystem, welche im Schwarzwald und in der Oberrheinpfalz gefunden wurden.

1. Einleitung

In den Tiefenbohrungen der Nagra in der Nordschweiz (Fig. 1) wurden, sofern vorhanden, das tertiäre, mesozoische und permokarbonische Deckgebirge sowie das darunterliegende kristalline Grundgebirge erbohrt. Darin wurden Klüfte, hydrothermale Umwandlungen und vereinzelte Vererzungen beobachtet (PETERS et al. 1987). Um Zusammensetzung, Verbreitung und Bildungsbedingungen der beteiligten Fluids in Erfahrung zu bringen, wurden Untersuchungen an Fluideinschlüssen in gesteinsbildenden Mineralen und Kluftmineralen sowie Quarz- und Calcizementen vorgenommen. Zum Vergleich wurden auch einige Fluideinschlüsse aus dem Buntsandstein der Erdölbohrung Pfaffnau 1 untersucht.

Die geologischen Untersuchungsergebnisse der abgeteufte 6 Nagra-Bohrungen sind in den technischen Berichten zu den Bohrungen Böttstein (PETERS et al. 1987), Kaisten (PETERS et al. 1987a), Leuggern (PETERS et al. 1987b), Weiach (MATTER et al. 1987a), Riniken (MATTER et al. 1987b) und Schafisheim (MATTER et al. 1987c) enthalten.

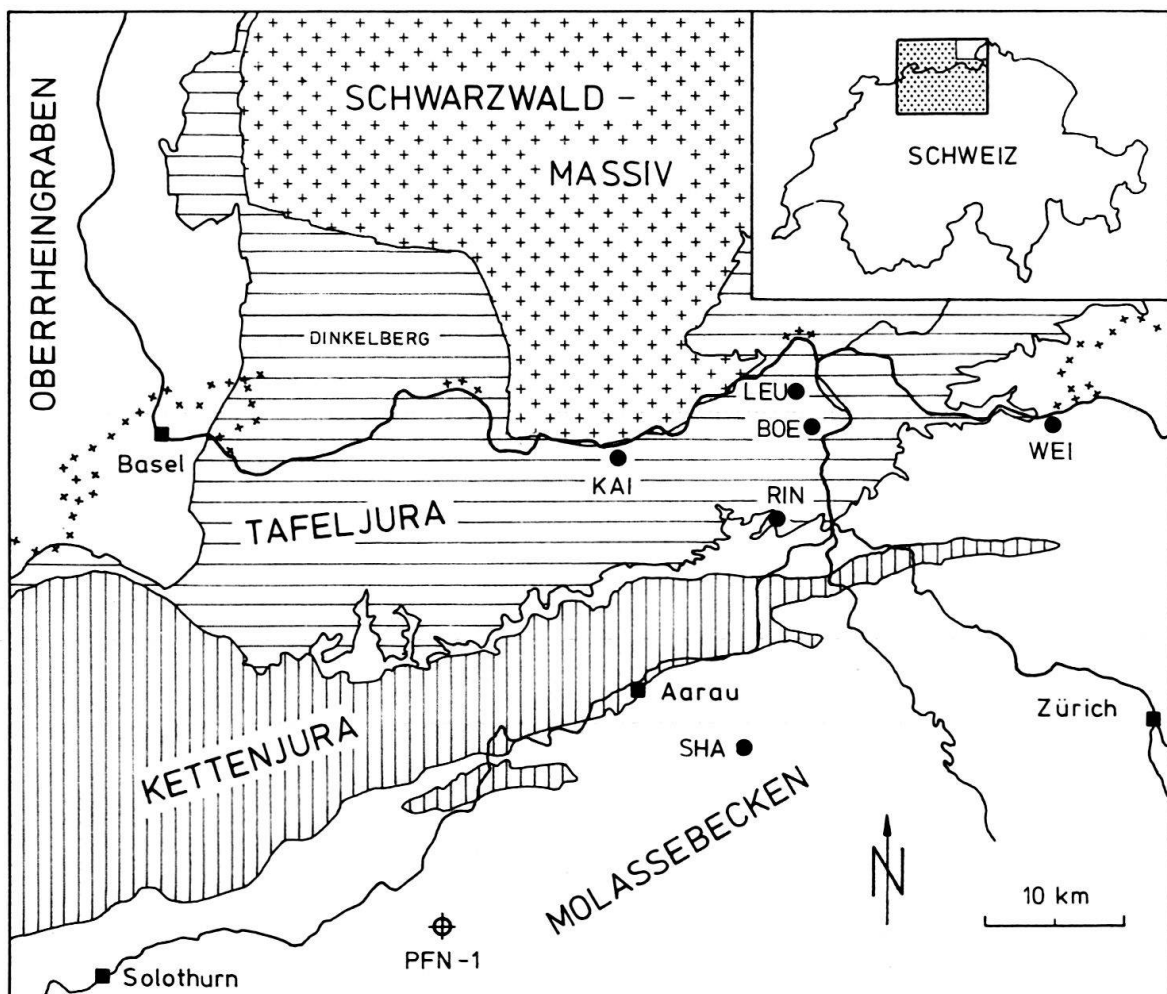


Fig. 1. Tektonische Übersichtsskizze mit den abgeteufte Nagra-Bohrungen Böttstein (BOE), Kaisten (KAI), Leuggern (LEU), Weiach (WEI), Riniken (RIN), Schafisheim (SHA) und der Erdölbohrung Pfaffnau 1 (PFN 1).

Die ausführlichen Resultate und Diskussionen der Fluideinschlussuntersuchungen sind ebenfalls in den technischen Berichten der Nagra-Bohrungen enthalten. Ferner wurden die Untersuchungsergebnisse der Bohrungen Böttstein und Weiach in einer gesonderten Arbeit zusammengefasst (MULLIS & STALDER 1987).

2. Methoden

Die Untersuchungen der Fluideinschlüsse wurden mit der Methode der Mikrothermometrie durchgeführt. Die verwendete Anlage besteht aus einem Durchlichtmikroskop, das mit einer Heiz- und Kühlanlage des Typs CHAIX-MECA ausgerüstet ist. Mit ihr werden die Phasenübergänge innerhalb der Fluideinschlüsse im Temperaturbereich zwischen -180° und 600°C beobachtet und gemessen. Bei langsamem Erwärmen wurden die Temperaturen des ersten Schmelzens ($T_{1.S}$), des Schmelzens des Eises (TS_{Eis}), der Dissoziation der Hydrate (TD_{Hy}) und der Homogenisation der Einschlüsse (TH) gemessen. Nähere Beschreibungen dieser Methode finden sich in POTY et al. (1976), ROEDDER (1984), und SHEPHERD et. al. (1985). Zur Ermittlung eingeschlossener Gase wurden auch Untersuchungen an ausgewählten Fluideinschlüssen mit der Raman-Mikrosonde durchgeführt. Diese Methode ist in DHAMELIN COURT et al. (1979) ausführlich beschrieben.

3. Resultate

Bei den meisten Fluideinschlüssen handelt es sich um sekundäre Einschlüsse, die entlang verheilter Bruchflächen im Wirtmineral angelegt sind (vgl. Figur 3, Einschlussverbände A–D in Probe 1932.10 m von Schafisheim). Die Fluideinschlüsse aller Bohrungen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Diese sind in Figur 2 im ternären Phasendiagramm des Systems $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ und in Figur 5 in TS/TH-Diagrammen schematisch dargestellt.

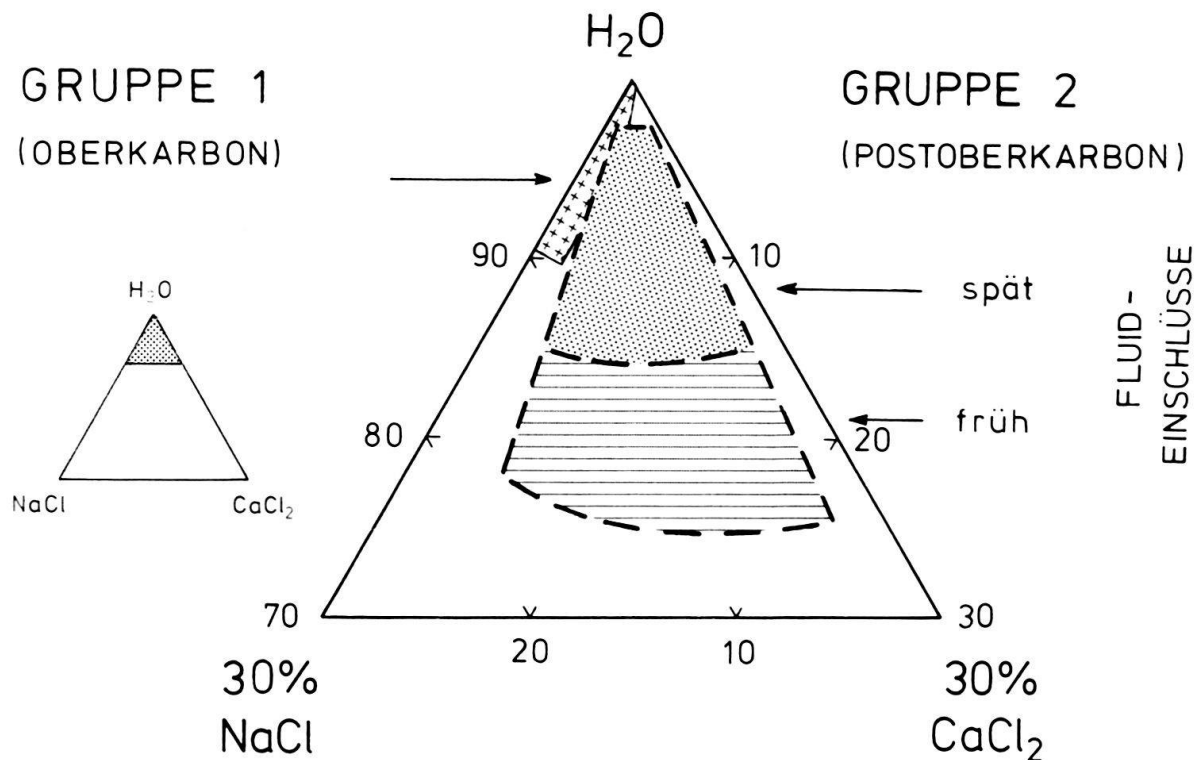


Fig. 2. Darstellung der Salzzusammensetzung und -gehalte beider Fluidgruppen im Konzentrationsdreieck des ternären Systems $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$.

1. Gruppe: NaCl-(KCl-)haltige, relativ salzarme Einschlüsse. Sie sind fast ausschliesslich nur in gesteinsbildenden Mineralen des Kristallins und in detritischen Mineralen der Sedimentgesteine vertreten.

2. Gruppe: CaCl_2 -NaCl-(MgCl_2 -)haltige, salzreiche bis salzarme Einschlüsse. Sie sind in Kluftmineralen sowie in porenfüllenden Zementen eingeschlossen. Vereinzelt lassen sie sich auch in gesteinsbildenden und detritischen Mineralen nachweisen. Innerhalb dieser Einschlussgruppe können frühe, salzreiche Einschlusspopulationen und späte, salzärmere Populationen voneinander unterschieden werden.

1. Gruppe: NaCl-(KCl-)haltige, relativ salzarme Einschlüsse

Aufgrund textueller Beziehungen zwischen verschiedenartigen Einschlussverbänden und mit Hilfe morphologisch unterschiedlich verheilter Einschlussformen können mehrere Einschlussgenerationen voneinander unterschieden werden. Manche Einschlussverbände weisen bei Zimmertemperatur stark variierende Gas/Flüssigkeits-Verhältnisse auf. Es wurde daher darauf geachtet, nur Einschlussverbände mit konstantem Gas/Flüssigkeits-Verhältnis zu messen und für P/T-Abschätzungen zu verwenden.

Die Temperatur des *ersten Schmelzens* liegt bei dieser Einschlussgruppe allgemein zwischen -20° und -30°C . Da die Eutektika der Systeme $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ und $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{KCl}$ -20.8°C bzw. -22.9°C betragen (POTTER et al. 1978 bzw. SCHÄFER & LAX 1962), kann gefolgert werden, dass die Zusammensetzung der gelösten Salze neben etwas KCl im wesentlichen aus NaCl besteht. Die vereinzelt bei tieferen Werten gelegenen eutektischen Temperaturen weisen jedoch auf die Gegenwart zusätzlicher Kationen in den wässrigen Lösungen hin, welche bis jetzt noch nicht näher charakterisiert werden konnten.

Das *Eis schmilzt* in den allermeisten Proben zwischen -6° und 0°C . Durch Umwandlung der gemessenen Schmelztemperaturen in NaCl-Äquivalente lassen sich nach SCHÄFER & LAX (1960) die approximativen Salzgehalte ermitteln. Diese liegen allgemein zwischen 0 und 9 Gew. % NaCl-Äquivalenten und nehmen innerhalb der untersuchten Entnahmestellen bei allen Bohrungen von der ersten bis zur letzten Einschlussgeneration ab (vgl. TH der Proben 1566.24 m und 1932.10 m der Bohrung Schafisheim in Figur 3).

Bei den frühesten Einschlussverbänden kann bisweilen die *Dissoziation* eines *Gashydrates* zwischen 0° und 14°C beobachtet werden, was auf das Vorhandensein von geringen Mengen CO_2 und CH_4 (< 3 Gew. %) hindeutet.

Die *Einschlüsse* selber *homogenisierten* zwischen $\sim 100^\circ$ und $\sim 350^\circ\text{C}$ (selten bis 400°C) in eine flüssige und eine gasförmige Phase. Bisweilen kommen gasreiche und wasserreiche Einschlüsse mit konstantem Gas/Flüssigkeits-Verhältnis und ähnlichen Homogenisationstemperaturen im gleichen Wirtmineral vor. Das bedeutet, dass manche dieser Einschlüsse im Zusammenhang mit einem Siedeprozess ins Wirtmineral einge-

Fig. 3. Projektion der Mittelwerte der Schmelz- (TS_{Eis}) und Homogenisationstemperaturen (TH) für jede Einschlussgeneration aus jeder Entnahmestelle der Bohrung Schafisheim ins TS/TH Diagramm. Entnahmestellen: 578.28 m, 582.12 m, 1329.20 m, 1484.36 m, 1485.75 m, 1566.24 m, 1932.10 m, 1960.77 m. L: Homogenisation in flüssige Phase; G: Homogenisation in Gasphase.

Am Beispiel der Probe 1932.10 m (Aplit) ist die Einschliessungsabfolge der Fluids anhand der tektonisch angelegten Einschlussbahnen A bis D im Gesteins- und Kluftquarz aufgezeigt. Einige der mikrothermometrisch ermittelten Einschlussdaten sind in Tabelle 1 enthalten. Diskussion siehe Text.

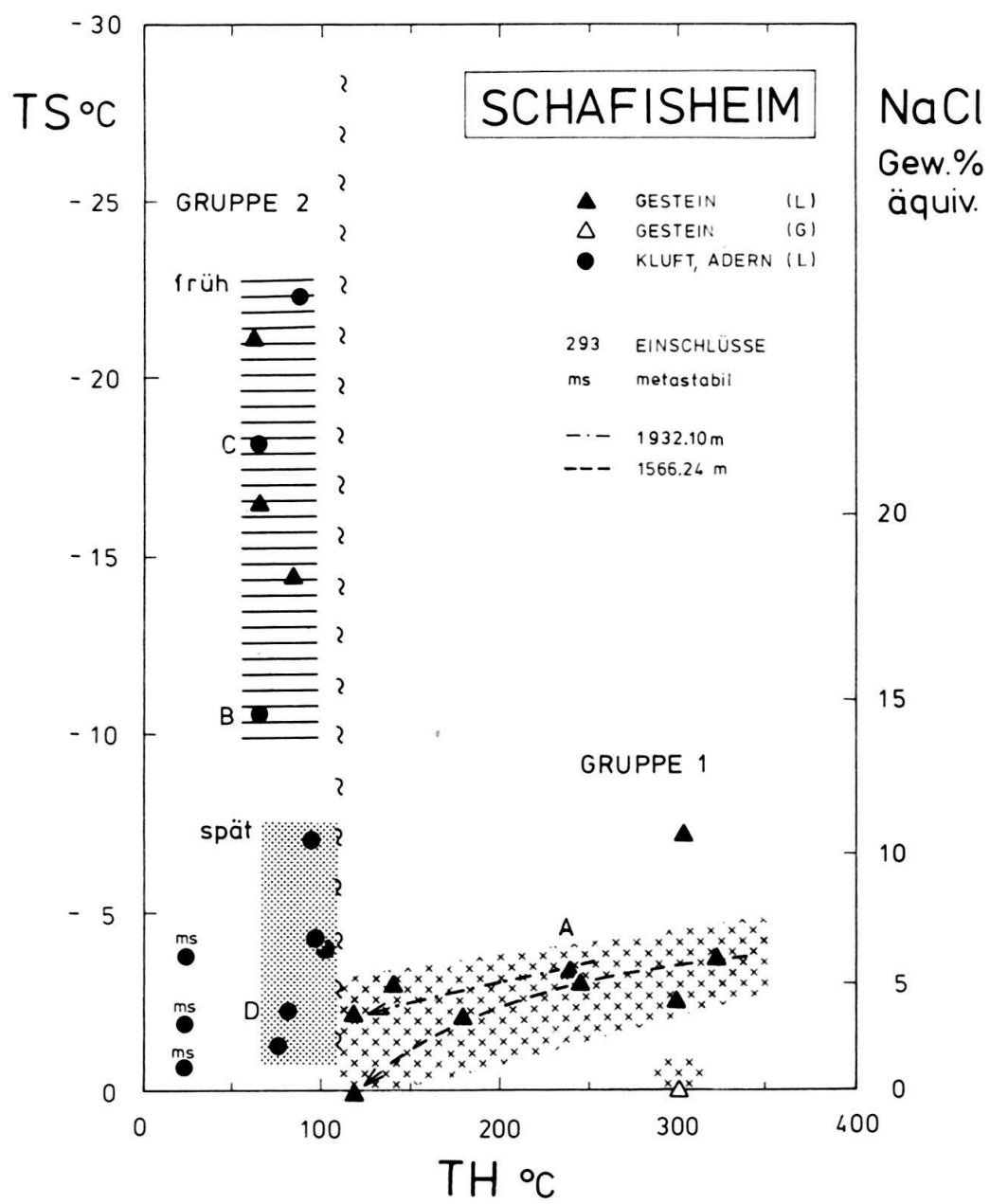
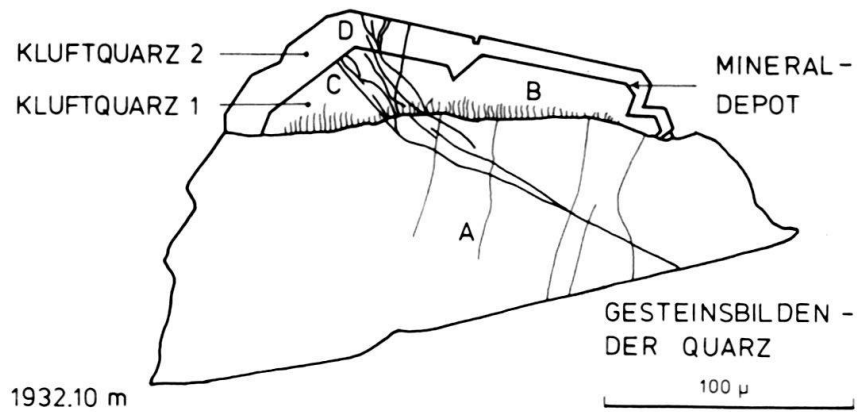


Tabelle 1: Mikrothermometrie-Daten der Bohrung Schafisheim. Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der jeweils ältesten Einschlussgenerationen.

BOHRUNG SCHAFISHEIM	GRUPPE 1			GRUPPE 2			GRUPPE 3		
				Frühe, salzreiche Einschlüsse			Späte, salzarme Einschlüsse		
Tiefe	NaCl (Gew.%)	TH (°C)	n _E WM	NaCl (Gew.%)	TH (°C)	n _E WM	NaCl (Gew.%)	TH (°C)	n _E WM
578.28 m Malm	?			n.b.			3.2 2.7, 3.7	ms	6 KCc
582.12 m Malm	n.b.			n.b.			6.3 5.9, 6.8	ms	4 KCc
1329.20 m Muschelkalk	n.b.			n.b.			10.5 9.3, 11.7	96 84, 109 L	46 KCc
1484.36 m Buntsandstein	10.8 9.3, 11.7	301 290, 307 L	11 DQ	n.b.			6.9 3.4, 10.5	98 90, 109 L	19 ACc
1485.75 m Buntsandstein	n.b.			n.b.			6.5 3.4, 9.3	103 90, 112 L	23 ACc
1566.24 m Granit	6.2 5.6, 6.8	322 312, 335 L	15 GQ	> 23.3	85 76, 96 L	11 KQ	?		
1932.10 m Aplit	5.7 (A) 5.4, 6.0	240 225, 260 L	10 GQ	14.7 (B) 11.7, 18.2 21.5 (C) 19.1, 22.7	64 58, 72 L 67 56, 76 L	13 KQ 14 KQ	4.0 (D) 0.8, 8.8	83 66, 95 L	9 KQ
1960.77 m Aplit	5.1 4.2, 5.7	246 221, 275 L	10 GQ	> 23.3	63 60, 66 L	4 GQ	2.4 0.8, 5.0	78 65, 95 L	17 KQ

NaCl (Gew.%) Salzgehalt in Gew. % äquivalent NaCl.

TH (°C) Homogenisationstemperatur der Einschlüsse in °C. L: Homogenisation in flüssige Phase; ms: metastabil.

n_E Anzahl gemessene Einschlüsse.

WM

Wirtmineral:

GQ: gesteinsbildender Quarz;

DQ: detritischer Quarz;

KQ: Kluftquarz;

KCc: Kluftcalcit;

ACc: Adercalcit.

A–D Einschlussgeneration A–D in Probe 1932.10 m, dargestellt in Figur 3.

n.b. Nicht beobachtet.

geschlossen wurden. Diese Annahme wird zusätzlich durch das Auftreten von Einschlussverbänden mit heterogener Gasfüllung erhärtet, bei denen statische und dynamische Rekristallisation der Wirtminerale (MULLIS 1987) oder «necking down» im Zweiphasengebiet eher unwahrscheinlich ist. Daraus geht hervor, dass die TH der Einschlussverbände mit homogenem Gas/Flüssigkeits-Verhältnis als minimale und bisweilen als approximative Bildungstemperatur der Einschlüsse interpretiert werden dürfen. Diese liegen bei den frühen Einschlusspopulationen zwischen ~ 300° und ~ 350°C (seltener bis 400°C) und nehmen unter retrograden Bedingungen in den späten Einschlussverbänden

bis gegen 100°C ab (vgl. TH der Proben 1566.24 m und 1932.10 m der Bohrung Schafisheim in Figur 3).

2. Gruppe: CaCl_2 - NaCl -(MgCl_2 -)haltige salzreiche bis salzarme Einschlüsse

Mehrere Einschlusspopulationen können bisweilen in zoniert auskristallisierten Kluftquarzen und Quarzzementen angetroffen werden. Durch textuelle Zuordnung solcher Einschlussverbände zu den vorgefundenen Quarzgenerationen gelang es, die relative Altersabfolge der Einschlussgenerationen festzulegen. Ein Beispiel ist in Figur 3 vorgestellt (Bohrung Schafisheim, Probe 1932.10 m). Dort wurde die Fluidgeneration B während des Kristallwachstums der ersten Kluftquarzgeneration eingeschlossen. Danach, jedoch vor Wachstumsbeginn der zweiten Quarzgeneration, wurde die Fluidgeneration C in den Wirtkristall eingebaut. Nach Ausfällung der zweiten Quarzgeneration erfolgte schliesslich die Einschliessung der Fluidgeneration D.

Die Mittelwerte des *eutektischen Schmelzens* liegen bei der zweiten Einschlussgruppe zwischen -75° und -39°C , wobei sie sich in den meisten Proben unterhalb -50°C befinden. Demzufolge sind beträchtliche Mengen anderer Salze als NaCl in der wässrigen Lösung zu erwarten. Dies wird aus der eutektischen Temperatur einiger Chloridlösungen ersichtlich:

$\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$	-20.8°C (POTTER et al. 1978)
$\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$	-49.8°C (SCHÄFER & LAX 1962)
$\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$	-52.0°C (SCHÄFER & LAX 1962)
$\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{MgCl}_2$	-57°C (LUZHNAYA & VERESHTCHETINA 1946)
$\text{H}_2\text{O}-\text{LiCl}$	-74.8°C (BORISENKO 1978)

Da sich nun die Eutektika der meisten Nicht-Chloridlösungen oberhalb -10°C befinden, und da die eutektische Temperatur des quaternären Systems $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{MgCl}_2$ -57°C beträgt, kann gefolgert werden, dass NaCl, CaCl_2 und MgCl_2 den Hauptanteil der gelösten Salze innerhalb der zweiten Einschlussgruppe ausmachen. Die Gegenwart von CaCl_2 und MgCl_2 wird zusätzlich durch das Vorhandensein von *Salzhydraten* bestätigt, deren *Dissoziationstemperaturen* zwischen -42° und -21°C liegen. Die Fluids der zweiten Einschlussgruppe können demzufolge im ternären System $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ dargestellt werden (Figur 2), wobei die Chloride mit zweiwertigen Kationen als CaCl_2 -Äquivalente zu betrachten sind. Jede Beimischung von weiteren Kationen erniedrigt die eutektische Temperatur noch weiter; damit sind noch andere Kationen als Na^+ , Ca^{++} und Mg^{++} in den wässrigen Lösungen zu erwarten. Auch sind geringe Mengen an gelösten Sulfaten, Hydrogencarbonaten und Carbonaten in den untersuchten Fluideinschlüssen nicht auszuschliessen, doch konnten diese bei der Kleinheit der Einschlüsse mit der Methode der Mikrothermometrie nicht nachgewiesen werden. Ihr Anteil muss im Vergleich mit den Chloriden jedoch klein sein (vgl. Löslichkeitsdaten dieser Salze in SCHÄFER & LAX 1962).

Die *Schmelztemperaturen des Eises* liegen bei den frühen Einschlüssen aller Bohrungen unterhalb -10°C . Im Gegensatz dazu schmilzt das Eis in den späten salzärmeren Einschlüssen allgemein zwischen -10° und -2°C . Die entsprechenden Salzgehalte betragen für die frühen salzreichen Einschlüsse 14 bis > 23.3 Gew.% NaCl-Äquivalente, während sich diejenigen der späten salzärmeren Einschlüsse zwischen 3 und 14 Gew.% bewegen. In Probe 1932.10 m der Bohrung Schafisheim (Fig. 3 und Tab. 1) nimmt der

Salzgehalt innerhalb der frühen, salzreichen Einschlüsse von 14.7 Gew. % zunächst auf 21.5 Gew. % zu, um in den späten Einschlüssen bis auf 4 Gew. % äquivalent NaCl abzunehmen.

Die Mittelwerte der *Homogenisationstemperaturen* liegen bei den frühen salzreichen Einschlüssen zwischen 28° und 100°C, diejenigen der späten salzärmeren Einschlüsse zwischen 60° und ~120°C. Beim Übergang von den frühen salzreichen zu den späten salzärmeren Einschlüssen ist ein Trend zu einem leichten Temperaturanstieg zu erkennen.

Die Homogenisationstemperaturen der zweiten Einschlussgruppe können wegen der ungewissen Menge an gelösten Gasen (HANOR 1980) nicht unbesehen, wie häufig angenommen, als approximative Bildungstemperaturen interpretiert werden. Dieser Sachverhalt soll an einem modellhaft gewählten Beispiel in Figur 4 näher erläutert werden. Dort ist eine 20 Gew.-%ige Kochsalzlösung bei 100°C und 100 bar mit 0.04 Gew.-% Methan gesättigt und es stehen ein wasserreiches und ein methanreiches Fluid miteinander im Gleichgewicht. Die Homogenisationstemperatur von 100°C entspricht dann der

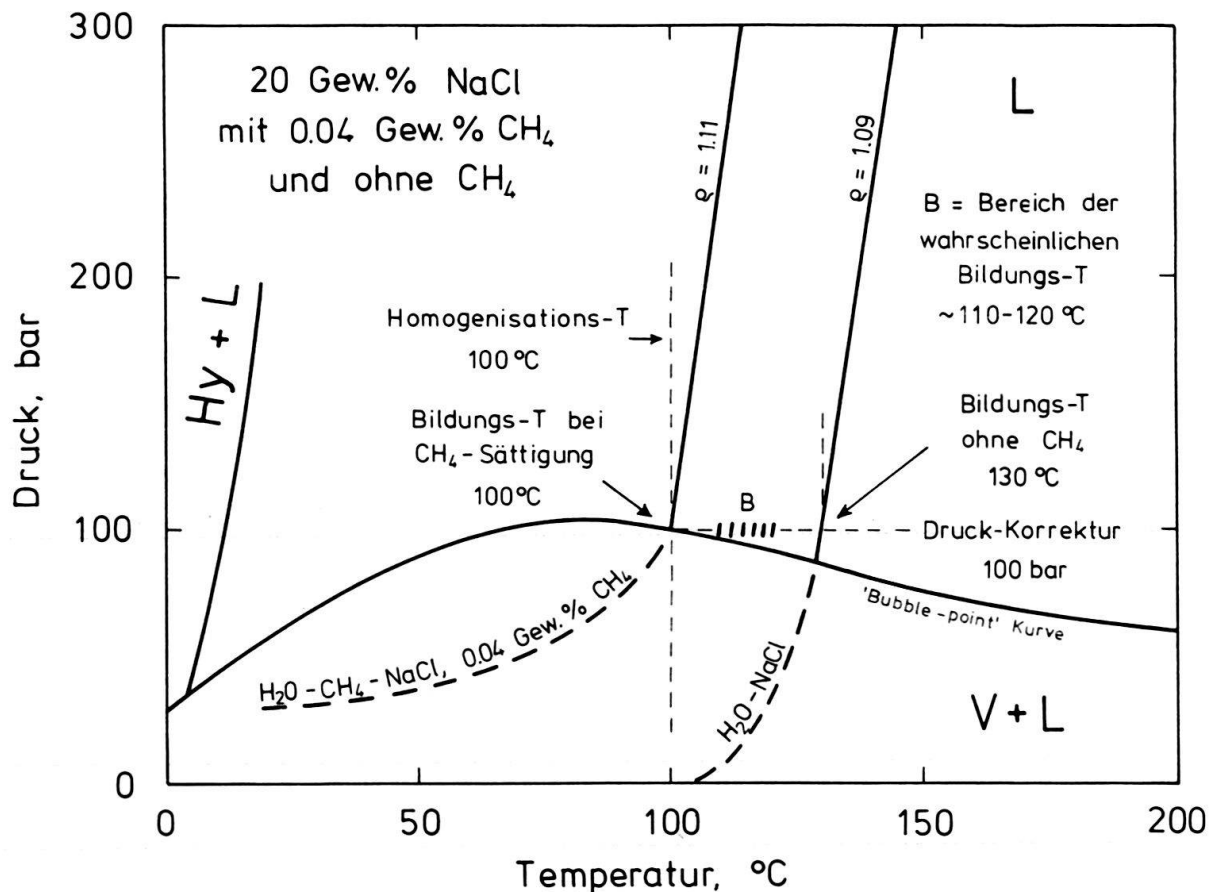


Fig. 4. Abschätzung der Bildungstemperatur der Einschlüsse im System $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-(\text{CH}_4)$ (20 Gew. % NaCl), deren Fluids bei $T_H = 100^\circ\text{C}$ und $P_H = 100$ bar mit 0.04 Gew. % CH_4 (HAAS 1978) gesättigt bzw. vollständig methanfrei sind. Gestrichelter Isochorenverlauf = approximativ.

Bei Methansättigung koexistieren eine methanreiche und eine wasserreiche Phase miteinander, und die T_H entspricht der Einschließungstemperatur der Fluids. Bei vollständigem Fehlen von Methan in der wässrigen Phase liegt die Einschließungstemperatur unter Anwendung der Druckkorrekturmethode nach POTTER (1977) bei 130°C . Da weder methanreiche Einschlüsse beobachtet wurden noch ein gänzlich Fehlen von Methan in der wässrigen Lösung zu erwarten ist, kommt die effektive Bildungstemperatur wahrscheinlich um 10° bis 20°C oberhalb der gemessenen T_H zu liegen.

eigentlichen Einschliessungstemperatur der Einschlüsse. Enthält aber die wässrige Lösung, deren Einschlüsse bei 100°C homogenisieren, überhaupt kein Methan, so wurden die Einschlüsse – unter Anwendung der Druckkorrektur nach POTTER (1977) – bei 100 bar und 130°C gebildet. Aus der Tatsache, dass in keiner Probe der Nagra-Bohrungen methanreiche Einschlüsse nachgewiesen werden konnten, kann gefolgert werden, dass die Fluids während ihrem Einschliessungsprozess an Methan untersättigt waren, d.h., sie sind unter isobaren Bedingungen bei etwas höheren Temperaturen ins Wirtmineral eingeschlossen worden. Da andererseits im sedimentären Deckgebirge der Nagra-Bohrungen organisches Material, wie Kohle, gefunden wurde, ist anzunehmen, dass in den meisten wässrigen Salzlösungen dennoch geringe Mengen Methan enthalten sind (vgl. Methangehalte in manchen Tiefengrundwässern der Nagra-Bohrungen, SCHMASSMANN et al. 1984). Dies hat nach dem aktuellen Wissensstand zur Folge, dass die eigentliche Bildungstemperatur wahrscheinlich um 10° bis 20° über der gemessenen TH von 100°C angesetzt werden muss. Die effektiven Einschliessungstemperaturen aller Bohrungen liegen somit zwischen ~ 30° und ~ 140°C.

4. Diskussion

Relatives Alter der Einschlussgruppen

In den Stephanien-Grauwacken der Bohrung Weiach kommen die Einschlüsse der *ersten Gruppe* nur in detritischen Quarzen und nicht im homoaxial über diesen Körnern gewachsenen Kluftquarz vor (MULLIS & STALDER 1987). Ihre Einschlussbahnen lassen sich auch nicht über zwei oder mehrere benachbarte Quarzkörner hinweg verfolgen. Die Einschlüsse der ersten Gruppe wurden demzufolge vor der Ablagerung der Sedimente erworben, also noch im kristallinen Liefergestein, und haben Prä-Stephanien-Alter. Bezogen auf die Intrusionsalter des Böttsteingranits und der Intrusiva von Schafisheim (PETERS et al. 1987, MATTER et al. 1987c) können die dortigen Einschlüsse der ersten Gruppe nicht älter sein als 320 bis 330 Ma.

Das Maximalalter der *zweiten Einschlussgruppe* der Bohrung Weiach kann wiederum von den Stephanien-Grauwacken hergeleitet werden. Dort sind die Einschlüsse der zweiten Gruppe im Kluftquarz angereichert und nur vereinzelt entlang von sekundären Einschlussbahnen in detritischen Quarzkörnern vertreten. Ihre Entstehung muss demnach nach dem Stephanien erfolgt sein.

Der Einschliessungsprozess der *salzärmeren Einschlüsse* der *zweiten Gruppe* war während der Jurafaltung noch nicht abgeschlossen. Dies geht einerseits aus der Ähnlichkeit der Salzgehalte in den Einschlüssen der Unteren Süsswassermolasse der Bohrung Weiach sowie im oberen Malm, im Muschelkalk und im Buntsandstein der Bohrung Schafisheim hervor. Andererseits stammt die einschlussführende Calcitprobe im oberen Malm der Bohrung Schafisheim aus einer Harnischfläche (578.28 m, H.-R. Bläsi und K. Ramseyer, mündl. Mitt., 1987), die in der Zeit zwischen der Kreide und der Jurafaltung gebildet wurde. Auch entstammt die Probe 1329.20 m bei Schafisheim einer offenen Kluft unterhalb der Überschiebungszone im Hauptmuschelkalk, deren Entstehung nach BLÄSI et al. (1987) mit der Jurafaltung im Zusammenhang steht. Dies gilt auch für die Probe 1484.36 m von Schafisheim, in der die Einschlussbildung nach RAMSEYER (1987) während der Jurafaltung stattfand. Die grosse Ähnlichkeit der Homogenisationstemperaturen der Einschlüsse unterhalb (1484.36 m) und oberhalb (1329.20 m) des während der Jurafal-

tung aktiven Hauptabscherhorizontes in der Evaporitformation der mittleren Trias (1442–1360 m) deutet zusätzlich auf eine Einschlussbildung hin, die zeitlich im Zusammenhang mit der Jurafaltung steht.

Da die Eigenschaften sowohl der ersten als auch der zweiten Einschlussgruppe in allen Bohrungen ähnlich sind, können die von den einzelnen Bohrungen hergeleiteten relativen Altersbeziehungen für das gesamte Untersuchungsgebiet generalisiert werden; d. h.: die erste Einschlussgruppe wurde im Oberkarbon gebildet, die zweite in der Zeit nach dem Stephanien, also vom Perm bis mindestens zum mittleren Miozän.

Druck-Temperatur-Abschätzungen während der Einschlussbildung

Einige der frühesten Einschlüsse der *ersten Fluidgruppe* wurden, wie bereits ausgeführt, unter Siedebedingungen ins Wirtmineral eingeschlossen. Die gemessenen TH-Werte entsprechen dann den approximativen Bildungstemperaturen. Anhand der Siedekurven des Systems H_2O (VARGOFTIK 1975) und einer 5 Gew.-prozentigen NaCl-Lösung (HAAS 1976) lassen sich auch die korrespondierenden approximativen Bildungsdrücke abschätzen. Für den Temperaturbereich von 300° bis 350°C betragen diese 86 bis 165 bar. Derart geringe Einschliessungsdrücke können als Folge von Druckentlastung anlässlich der kataklastischen Deformation des Gesteins gedeutet werden. Ähnliche Phänomene wurden öfters in alpinen Zerrklüften beobachtet (MULLIS 1976, 1983).

Viele der untersuchten Einschlüsse der ersten Fluidgruppe wurden jedoch nicht unter Siedebedingungen gebildet. Ihre Homogenisationstemperatur kann nur als minimale Bildungstemperatur interpretiert werden. Unter Zuhilfenahme eines externen Thermometers lässt sich aber anhand der Isochoren (Linien gleicher Dichte) der Bildungsdruck solcher Einschlüsse herleiten. Gestützt auf petrographische Evidenzen konnte MEYER (1987a) am Beispiel der Bohrung Weiach zeigen, dass das Gestein während der hydrothermalen Überprägung eine Temperatur von 400°C nicht überschritten hat. Für Einschlussverbände, die zwischen 300° und 350°C homogenisieren und bei einer Maximaltemperatur von 400°C gebildet wurden, resultiert nach BURNHAM et al. (1969) und POTTER & BROWN (1977) ein Bildungsdruck von 0.5 bis 1 kbar. Aufgrund der Ungewissheit, ob die Fluids unter eher hydrostatischen oder eher lithostatischen Bedingungen eingeschlossen wurden, kann die Gesteinsüberlagerung für die Zeit der Einschlussbildung nur grob abgeschätzt werden. Da rein hydrostatische Bedingungen kaum anzunehmen sind, muss die Überlagerung weniger als 5–10 km betragen haben. Daraus ergeben sich erhöhte geothermische Gradienten von mindestens 50°C/km. Solche Gradienten sind nur in Gebieten mit bedeutenden thermischen Anomalien (z. B.: nahe liegende, seichte Intrusion) möglich.

In der *zweiten Einschlussgruppe* können die approximativ ermittelten Bildungstemperaturen bisweilen stark variieren. Diese bewegen sich beispielsweise bei den frühen salzreichen Proben aus dem Buntsandstein aller Bohrungen zwischen ~ 30° und ~ 120°C (vgl. TH-Werte in Tabelle 2 und in den Figuren 3 und 5). Daraus folgt, dass der Einschliessungsprozess der frühen salzreichen Fluideinschlüsse sich über einen grösseren Zeitraum erstreckt haben kann, sofern die Fluids nicht aus unterschiedlich heissen «Thermalbereichen» stammen.

Auch die salzärmeren Einschlüsse der zweiten Einschlussgruppe zeigen über den gesamten Untersuchungsbereich eine erhebliche Streuung der approximativen Bildungs-

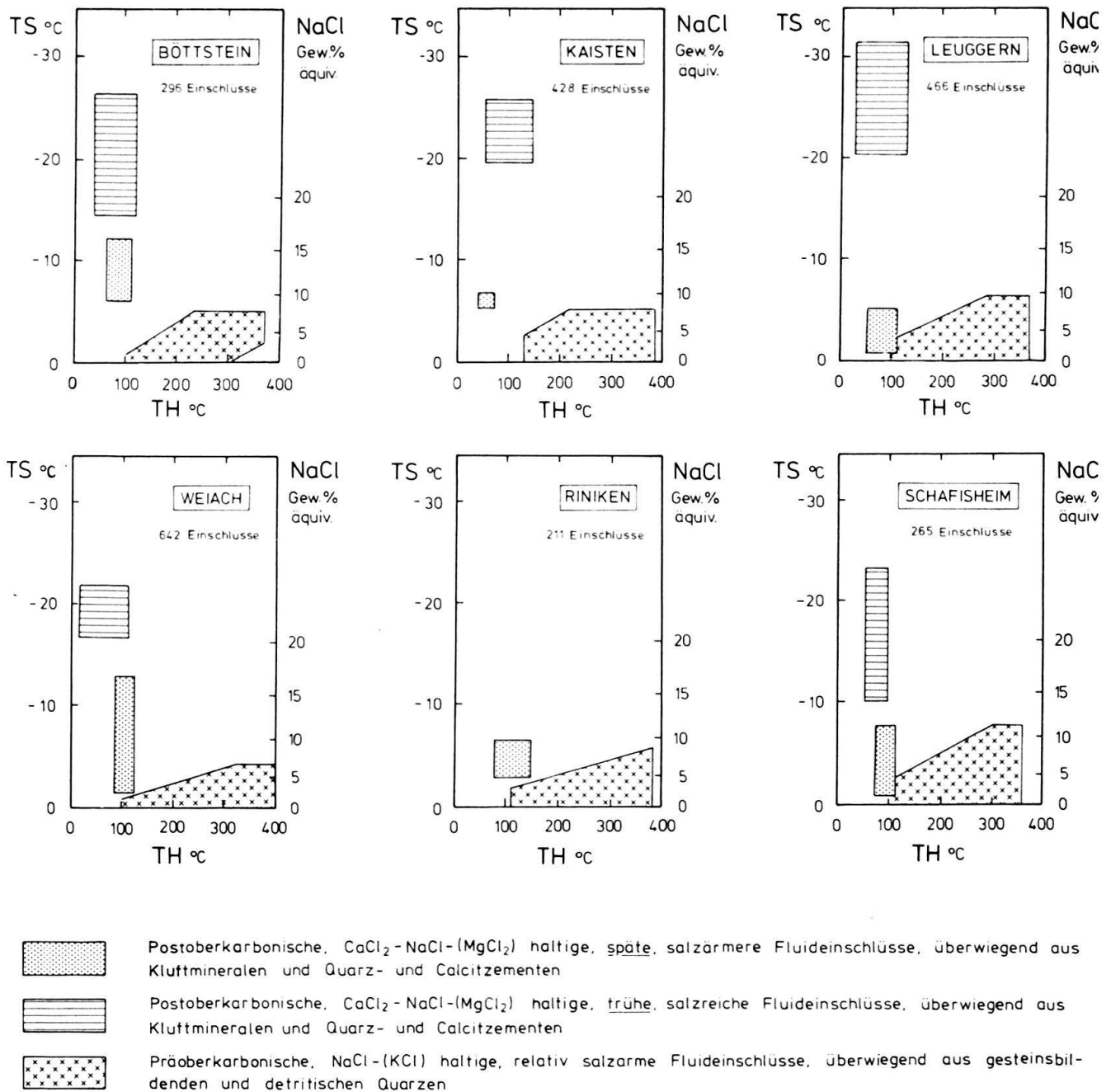


Fig. 5. Schematische Darstellung der Fluideinschluss-Gruppierungen aus den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz im TS/TH-Diagramm, mit zusätzlicher Angabe der relativen Salzgehalte in NaCl-Gew. %-Äquivalenten. (Metastabile Einschlüsse sind nicht berücksichtigt).

Tabelle 2: Mikrothermometrie-Daten aus dem Buntsandstein aller 6 Nagra-Bohrungen sowie der Erdölbohrung Pfaffnau 1. Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der jeweils ältesten Einschlussgeneration.

BUNTSANDSTEIN in BOHRUNG	GRUPPE 1			GRUPPE 2					
				Frühe, salzreiche Einschlüsse			Späte, salzarme Einschlüsse		
Tiefe	NaCl (Gew.%)	TH (°C)	n _E WM	NaCl (Gew.%)	TH	n _E WM	NaCl (Gew.%)	TH	n _E WM
Leuggern 218.61 m	n.u.			n.b.			2.0	60 57,63 L	40 KCc
Böttstein 309.87 m	2.9 2.5,3.2	298 266,315 L	10 DQ	>23.3	40 L	4 AuQ	6.5	?	1 AuQ
Kaisten 114,13 m	n.u.			>23.3	100 81,115 L	42 KQ	n.b.		
Weiach 981.84 m	1.2	330-370 G	17 DQ	>23.3	28 26,30 L	7 AuQ	n.b.		
Riniken 805.00 m	7.7 7.1,8.3	347 340,352 L	12 DQ	n.b.			< 1	80 67,90 L	26 KQ
Schafisheim 1484.36 m	10.8 9.3,11.7	301 290,307 L	11 DQ	n.b.			6.9 3.4,10.5	98 90,109 L	19 ACc
Schafisheim 1485.75 m	n.b.			n.b.			6.5 3.4,9.3	103 90,112 L	23 ACc
Pfaffnau 1814.10 m	< 1	300 G	10 DQ	> 23.3	91 80,96 L	10 KQ	8.5 6.5,10.5	70-120 L	5 ACc

NaCl (Gew.%) Salzgehalt in Gew. % äquivalent NaCl.

TH (°C) Homogenisationstemperatur der Einschlüsse in °C. L: Homogenisation in flüssige Phase; G: Homogenisation in Gasphase.

n_E Anzahl gemessene Einschlüsse.

WM Wirtmineral:
DQ: detritischer Quarz;
KQ: Kluftquarz;
AuQ: authigener Quarz;
KCc: Kluftcalcit;
ACc: Adercalcit.

n.u. Nicht untersucht.

n.b. Nicht beobachtet.

temperaturen (~ 70° bis ~ 140°C); die Homogenisationstemperaturen der späten salzärmeren Einschlüsse liegen jedoch allgemein bei höheren Werten als diejenigen der frühen salzreichen Einschlüsse (vgl. TH-Werte in Tabelle 1 und in den Figuren 3 und 5). Dieser allgemeine Temperaturanstieg kann vor allem als Folge einer erhöhten Gesteinsüberlagerung gedeutet werden, die während der Einschliessung der salzärmeren Einschlüsse vorgelegen haben mag. Die grösste Gesteinsüberlagerung hat im Untersuchungsgebiet nach NAEF et al. (1985) im Miozän vorgelegen, was mit der relativen Alterszuordnung der späten, salzärmeren Einschlüsse in guter Übereinstimmung steht.

Da, wie oben bereits dargelegt, die salzärmeren Fluideinschlüsse der zweiten Gruppe im Buntsandstein und Muschelkalk der Bohrung Schafisheim zur Zeit der Juraufaltung gebildet wurden, kann im Folgenden der paläogeothermische Gradient für Schafisheim

während der maximalen Gesteinsüberlagerung im Miozän abgeschätzt werden. Die Mächtigkeit der Sedimente über den Entnahmestellen 1484.36 m und 1329.20 m der Bohrung Schafisheim betrug im mittleren bis oberen Miozän nach NAEF et al. (1985) gegen 1600 bis 1800 m, was bei einer korrigierten Bildungstemperatur der Einschlüsse (105° bis 115°C) einem geothermischen Gradienten von 50° bis 60°C/km entspricht. Solche Gradienten sind für ein Sedimentbecken ungewöhnlich hoch. Ähnlich hohe Werte wurden neulich auch von der Nordsee mitgeteilt (HASZELDINE et al. 1984, MALEY et al. 1985) und verdienen besondere Beachtung.

Genetische Deutung der Fluid- und Einschlussbildung

Da die *NaCl-(KCl-)haltigen relativ salzarmen Einschlüsse der ersten Gruppe* in gesteinsbildenden Mineralen des kristallinen Grundgebirges bei allen Bohrungen vertreten sind (Figur 5), und da dieselbe Einschlussgruppe in den detritischen Quarzkörnern von nahezu allen untersuchten Proben aus dem Permokarbon und dem Buntsandstein wiedergefunden wurde, muss das Ereignis, das zur Bildung der ersten Gruppe führte, von grösserer regionaler Ausdehnung gewesen sein. Wie aus der relativen Alterszuordnung der Einschlüsse hervorgeht, kann dieses Ereignis in den Zusammenhang mit der spätvariszischen Orogenese gestellt werden (vgl. hierzu z. B.: MÜLLER et al. 1984, PETERS et al. 1987, BITTERLI & FRANK 1987). Die bevorzugte Anlage der Einschlüsse entlang verheilte Risse im Wirtmineral weist auf eine erhöhte tektonische Aktivität hin, die im Zeitraum zwischen der Intrusion des Böttsteingranits und der Bildung des Permokarbondtroges herrschte. Dabei wurde die Wegsamkeit der Fluids entlang von Klüften und Störungszonen erhöht, was die hydrothermale Überprägung des Gesteins im Grundgebirge begünstigte (vgl. PETERS et al. 1987, PETERS et al. 1987a, PETERS et al. 1987b, MATTER et al. 1987a, MATTER et al. 1987b). Die Abnahme der Salzgehalte im Laufe der Zeit ist wahrscheinlich durch eine Verdünnung der Fluids mit salzärmeren oder meteorischen Wässern bedingt (vgl. Probe 1932.10 m und 1566.24 m von Schafisheim in Figur 3).

Das Vorkommen der *frühen salzreichen $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-(MgCl}_2\text{)-haltigen Einschlüsse der zweiten Gruppe}$* im Buntsandstein, den Permokarbon-Sedimenten und im kristallinen Grundgebirge von nahezu allen Bohrungen (Figur 5) lässt ebenfalls auf eine grossräumige regionale Verbreitung dieser Fluids schliessen. Dasselbe gilt auch für die späten, salzärmeren Fluids, deren vertikale Verteilung sich von der Molasse bis an die Basis der Bohrungen im Permokarbon-Trog oder im kristallinen Grundgebirge erstreckt. Entstehungs- und Einschliessungsprozess dieser Fluids ist noch ungewiss. Der primäre Anreicherungsprozess der Fluids an Salz kann mit dem Vorkommen von Evaporiten in der Zeit vom Rotliegenden bis zum Keuper in Zusammenhang gebracht werden. Wahrscheinlich hat, bedingt durch erhöhte Verdunstung bei aridem Klima im Rotliegenden, eine erste starke Salzanreicherung in den Grundwässern (bis zu deren Sättigung) stattgefunden. Die Einschliessung der frühen salzreichen Fluids erfolgte bevorzugt anlässlich tektonischer Beanspruchung des Gesteins in der Zeit vom Perm bis möglicherweise ins Tertiär, derjenige der salzärmeren Einschlüsse jedoch überwiegend im Tertiär. Mehrere tektonische Ereignisse haben das Tertiär geprägt: Das Einbrechen des Oberrheingrabens im oberen Eozän und im Oligozän (LAUBSCHER 1982), das Absenken des Molassebeckens und die Hebung des Schwarzwaldes im Oligozän und vor allem im Miozän, und schliesslich die Juraufaltung im mittleren und oberen Miozän (vgl. z. B.: MÜLLER et al. 1984, NAEF et al.

1985, DIEBOLD & MÜLLER 1985, LAUBSCHER 1986). Diese Ereignisse haben hauptsächlich früh angelegte tektonische Störungssysteme reaktiviert (LAUBSCHER 1987) und sehr wahrscheinlich die Wegsamkeit der Fluids erhöht. Bei günstigen hydraulisch-thermischen Voraussetzungen konnten salzarme oder meteorische Wässer aus topographisch hoch gelegenen Infiltrationsgebieten in grössere Tiefen gelangen. Möglicherweise kann dadurch die starke Abnahme der Salzgehalte zwischen den frühen salzreichen und den späten salzärmeren Einschlusspopulationen erklärt werden.

Die Salzgehalte der den einzelnen Bohrungen entnommenen Tiefengrundwässer betragen allgemein ≤ 2 Gew. % und sind mehrheitlich von formationsspezifischer Prägung (SCHMASSMANN et al. 1984, BALDERER 1985). Sie weisen eventuell auf eine fortgesetzte Veränderung der Fluids bis zu den heute vorgefundenen niederen Salinitäten hin.

Vergleich der Fluideinschlussuntersuchungen aus den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz mit denjenigen vom Schwarzwald und von der Oberpfalz

Im Rahmen der Vorerkundungsarbeiten für das kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland wurden im Schwarzwald und in der Oberpfalz ähnliche Fluidgruppierungen wie in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz gefunden (WEBER & VOLLBRECHT 1986, VON GEHLEN et al. 1986, BEHR et al. 1987). Es konnte ein variszisches hochtemperiertes/niedersalinäres von einem post-variszischen niedertemperierten/hochsalinären Fluidsystem unterschieden werden. BEHR et al. (1987) haben ersteres mit der variszischen Kompressionstektonik und Metamorphose sowie mit dem Granitplutonismus im frühen Perm in Zusammenhang gebracht. Das niedertemperiert/hochsalinäre Fluidsystem wurde mit der postvariszischen Bruchtektonik, der Hebung und der Sedimentation der variszischen Molasse in Verbindung gebracht. Die auffallende Ähnlichkeit bezüglich der relativen Alterszuordnung und der Zusammensetzung der Fluideinschlüsse aus dem Oberkarbon, dem Perm und dem frühen Mesozoikum lassen auf ähnliche Bildungs- und Einschliessungsbedingungen der Fluids schliessen, die offensichtlich von mitteleuropäischer Ausdehnung waren.

5. Schlussfolgerungen

1. Im Untergrund der Nordschweiz haben vom oberen Karbon bis zum Tertiär zwei verschiedene Fluidsysteme im Gestein vorgelegen: ein hochtemperiertes/niedersalinäres System im Oberkarbon (erste Einschlussgruppe), und ein niedertemperiertes/hoch- bis niedersalinäres System in der Zeit vom Perm bis mindestens zum mittleren Miozän (zweite Einschlussgruppe).
2. Die gelösten Salze in Fluids aus dem Oberkarbon sind im wesentlichen NaCl-(KCl), diejenigen der permisch bis miozänen Fluids überwiegend CaCl₂-NaCl-(MgCl₂).
3. Die Salzkonzentration der postoberkarbonen Fluids veränderte sich im Laufe der Zeit von > 20 Gew. % im Perm auf 2–14 Gew. % im Miozän. Die heutigen überwiegend salzarmen Tiefengrundwässer stellen möglicherweise eine Fortsetzung dieser Fluidentwicklung dar.
4. Die Anlage der Einschlüsse entlang verheilter Risse im Wirtmineral weist auf bedeutende tektonische Ereignisse hin (Oberkarbon, Kreide bis Tertiär).

Verdankungen

Am Gelingen dieser Arbeit haben J. Meyer, K. Ramseyer, H.-R. Bläsi, H. A. Stalder, Tj. Peters, A. Matter, P. Jordan, Th. Nowack und weitere durch zahlreiche Diskussionen beigetragen. Durchgesehen wurde das Manuskript von J. Meyer, M. Frey, P. Tschudin, H. A. Stalder, Tj. Peters und A. Matter. Die Untersuchung einiger Fluideinschlüsse erfolgte durch C. Kosztolanyi am CREGU in Nancy. Ihnen allen, sowie M. Thury von der Nagra, der die Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit ermöglichte, möchte ich herzlich danken.

LITERATURVERZEICHNIS

- BALDERER, W. (1985): Sondierbohrung Böttstein. Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur hydrogeologischen Charakterisierung der Tiefengrundwässer. Nagra Technischer Bericht, NTB 85-06. – Nagra, Baden.
- BEHR, H.-J., HORN, E. E., FRENTZEL-BEYME, K., LÜDERS, V., & REUTEL, Chr. (1987): Fluid inclusion characteristics of the Variscan and post-Variscan vein deposits in the Federal Republic of Germany. – *Chem. Geol.* 61, im Druck.
- BITTERLI, P. H., & FRANK, E. (1987): Die geologische Entwicklung der Nordschweiz im Erdaltertum: Neue Erkenntnisse aus unserer Region. – *Brugger Neujahrsblätter* 87, 57–78.
- BLÄSI, H.-R., DRONKERT, H., MATTER, A., & RAMSEYER, K. (1987): Diagenese des Muschelkalk- und des Buntsandsteinaquifers in den Nagra Tiefbohrungen. Nagra Technischer Bericht NTP 87-02. – Nagra, Baden, im Druck.
- BORISENKO, A. S. (1978): Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. – *Soviet Geol. and Geophys.* 18, 11–19.
- BURNHAM, C. W., HOLLOWAY, J. R., & DAVIS, N. F. (1969): Thermodynamic properties of water to 1,000 °C and 10,000 bars. – *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.* 132.
- DHAMELIN COURT, P., BENY, J.-M., DUBESSY, J., & POTY, B. (1979): Analyse d'inclusions fluides à la microsonde MOLE à effet Raman. – *Bull. Mineral* 102, 600–610.
- DIEBOLD, P. (1986): Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz; Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. – *Mitt. Aarg. Natf. Ges. Bd. 31*, 11–52.
- DIEBOLD, P., & MÜLLER, W. H. (1985): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 84-26. – Nagra, Baden.
- GEHLEN, K. VON, KLEINSCHMIDT, G., STENGER, R., WILHELM, H., & WIMMENAUER, W. (1986): Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten, Lokation Schwarzwald. – 2. KTB-Kolloquium, Seeheim/Odenwald, 19.9.–21.9.1986.
- HAAS, J. L., Jr. (1976): Physical properties of the coexisting phases and thermochemical properties of the H₂O component in boiling NaCl solutions. – *Bull. Geol. Surv.* 1421-A.
- (1978): An empirical equation with tables of smoothed solubilities of methane in water and aqueous sodium chloride solutions up to 25 weight percent, 360 °C, and 138 MPa. – *U. S. Geol. Survey Open-file Rept.* 78-1004.
- HANOR, J. S. (1980): Dissolved methane in sedimentary brines: Potential effect on the PVT properties of fluid inclusions. – *Econ. Geol.* 75, 603–617.
- HASZELDINE, R. S., SAMSON, I. M., & CORNFORD, C. (1984): Dating diagenesis in a petroleum basin, a new fluid inclusion method. – *Nature* 307, 354–357.
- LAUBSCHER, H. P. (1982): Die Südostecke des Rheingrabens – ein kinematisches und dynamisches Problem. – *Eclogae geol. Helv.* 75/1, 101–116.
- (1986): The eastern Jura: Relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. – *Geol. Rdsch.* 75/3, 535–553.
- (1987): Die tektonische Entwicklung der Nordschweiz. – *Eclogae geol. Helv.* 80/2.
- LUZHNAJA, N. P., & VERESHTCHETINA, I. P. (1946): Sodium, calcium, magnesium chlorides in aqueous solutions at –57° to +25 °C (polythermic solubility). – *Zh. Prikl. Khimii* 19, 723–733.
- MALLEY, P., CLAUSER, N., JORDAN, A., & SOMMER, F. (1985): Fluid inclusion chronology and K-Ar dating of illite neoformation in sandstones from the Brent Formation of the North Sea. – *AAPG Research Conference*, Abstract.
- MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-01. – Nagra, Baden, im Druck.

- MATTER, A., PETERS, Tj., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sondierbohrung Riniken – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-02. Nagra, Baden, im Druck.
- MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F., & WEISS, H.-P. (1987c): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-03. – Nagra, Baden, in Vorbereitung.
- MEYER, J. (1987a): Das Kristallin der Bohrung Weiach. In: MATTER, A. et al. (Ed.): Sondierbohrung Weiach – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-01. – Nagra, Baden, im Druck.
- MULLIS, J. (1976): Das Wachstumsmilieu der Quarzkristalle im Val d'Illiez (Wallis, Schweiz). – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56, 219–268.
- (1983): Einschlüsse in Quarzkristallen der Schweizer Alpen und ihre mineralogisch-geologische Bedeutung. – Bull. Soc. Frib. Sci. Nat. 72, 5–19.
- (1987): Fluid inclusion studies during very low-grade metamorphism. In FREY, M. (Ed.): Low temperature metamorphism. – Blackie, Glasgow (im Druck).
- MULLIS, J., & STALDER, H. A. (1987): Salt-poor and salt-rich fluid inclusions in quartz from two boreholes in Northern Switzerland. – Chem. Geol. 61, im Druck.
- MÜLLER, W. H., HUBER, M., ISLER, A., & KLEBOTH, P. (1984): Erläuterung zur «Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000». Nagra Technischer Bericht NTB 84-25. – Nagra, Baden.
- NAEF, Hch., DIEBOLD, P. & SCHLANKE, S. (1985): Sedimentation und Tektonik im Tertiär der Nordschweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 85-14. – Nagra, Baden.
- PETERS, Tj., MATTER, A., BLÄSI, H.-R., & GAUTSCHI, A. (1987): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. – Nagra, Baden, im Druck.
- PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ZIEGLER, H.-J. (1987a): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-04. – Nagra, Baden, im Druck.
- PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & MEYER, Chr. (1987b): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-05. – Nagra, Baden, im Druck.
- POTTER, R. W. II (1977): Pressure correction for fluid-inclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl–H₂O. – J. Res. U.S. Geol. Surv. 5/5, 603–607.
- POTTER, R. W. II, & BROWN, D. L. (1977): The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0° to 500°C and pressures up to 2000 bars based on a regression of available data in the literature. – Bull. U.S. Geol. Surv. 1421–C.
- POTTER, R. W. II, CLYNNE, M. A., & BROWN, D. L. (1978): Freezing point depression of aqueous sodium solutions. – Econ. Geol. 73, 284–285.
- POTY, B., LEROY, J., & JACHIMOWICZ, L. (1976): Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: l'installation de microthermométrie Chaixmeca. – Bull. Mineral. 99, 182–186.
- RAMSEYER, K. (1987): Diagenese des Buntsandsteins und ihre Beziehung zur tektonischen Entwicklung der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. 80/2.
- ROEDDER, E. (1984): Fluid inclusions. – Reviews in Mineral. 12. – Mineral. Soc. Amer. Washington.
- SCHÄFER, K., & LAX, E. (1960): Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. 6. Aufl., II. Band, 2. Teil, Bandteil a: Gleichgewichte Dampf-Kondensat und osmotische Phänomene, 865. – Springer, Berlin.
- (1962): Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. 6. Aufl., II. Band, 2. Teil, Bandteil b: Lösungsgleichgewichte I. – Springer, Berlin.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W., & PEKDEGER, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Technischer Bericht NTB 84-21. – Nagra, Baden.
- SHEPHERD, T., RANKIN, A. H., & ALDERTON, D. H. M. (1985): A practical guide to fluid inclusion studies. – Blackie, Glasgow.
- VARGOFTIK, N. B. (1975): Tables on the thermophysical properties of liquid and gases. – Wiley, New York.
- WEBER, K., & VOLLBRECHT, A. (1986): Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten, Lokation Oberpfalz. – 2. KTB-Kolloquium, Seeheim/Odenwald, 19.9.–21.9.1986.

Manuskript eingegangen am 9. Februar 1987

Revision angenommen am 4. Mai 1987