

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen =
Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 50 (1970)

Heft: 1: Gas- und Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralien

Artikel: Kryometrische Bestimmungen der Salz- und Gasgehalte
eingeschlossener Lösungen in Quarzkristallen aus Zerrklüften der
Schweizer Alpen

Autor: Poty, B. / Stalder, H.A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-39247>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Kryometrische Bestimmungen der Salz- und Gasgehalte eingeschlossener Lösungen in Quarzkristallen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen

Vorläufige Mitteilung

Von *B. Poty* (Nancy)*) und *H. A. Stalder* (Bern)**)

Mit 1 Textfigur und 1 Tabelle

Zusammenfassung

Die kryometrischen Daten gliedern sich in zwei Serien von Ergebnissen. – Die Bildung von durchsichtigen Kristallen verschiedener Hydrate mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen lassen den qualitativen Nachweis verschiedener Gase in den Mineraleinschlüssen zu. Am häufigsten ist das CO_2 -Hydrat (Gotthardmassiv und Penninikum). In den nördlichen Kalkalpen ist ein Hydrat verbreitet, das bei $+16^\circ\text{ C}$ bis $+18^\circ\text{ C}$ schmilzt. Es muss sich um das CH_4 -Hydrat handeln. Die chemische Natur eines dritten, seltenen Hydrates kann noch nicht angegeben werden.

Die Messungen der Schmelztemperaturen des Eises in den Quarzeinschlüssen geben einen Hinweis auf den Salzgehalt der Lösungen. Dieser wird in Äquivalenten $[\text{NaCl}]$ angegeben. Die erhaltenen Daten lassen sich nach Regionen recht gut gliedern, zudem können folgende Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden:

1. Der Salzgehalt hängt vom Nebengestein ab. Ganz auffällig ist die Erhöhung des Salzgehaltes in der Umgebung von Evaporiten.
2. Das Vorhandensein von CO_2 vermindert den Salzgehalt.
3. Die Salzkonzentration scheint mit steigendem Druck und steigender Temperatur anzuwachsen (Zeolithfacies nach Grünschieferfacies; die generellen Unterschiede zwischen dem zentralen Aarmassiv und dem Gotthardmassiv/Tessin scheinen dieser Regel allerdings zu widersprechen).

Abstract

The freezing data can be divided into two categories. – Transparent crystals of different hydrates detect different gases in the mineral inclusions. Most frequently the CO_2 hydrate occurs (Gotthardmassiv and Penninikum). In the northern Kalkalpen a hydrate can be found which melts at 16° to 18° centigrade; it must be the CH_4 hydrate. The chemical

*) Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, 54, Vandœuvre-lès-Nancy.

**) Naturhistorisches Museum, Bernastrasse 15, 3005 Bern.

composition of a third rare hydrate melting between 2° and 6° centigrade has not yet been determined.

The measurements of the melting-points of the ice in the quartz-inclusions give an idea of the salt concentration of the solution. It is indicated in equivalents of [NaCl]. The data obtained can easily be classified according to its geographical origin. Additionally, the following relationships were detected:

1. The salt concentrations depend on the surrounding rocks. It is striking how the salt concentration increases in the neighbourhood of evaporites.
2. The presence of CO₂ reduces the salt concentration.
3. It seems that the salt concentration increases with the temperature and the pressure (from the zeolitic facies to the greenschist facies). But the general differences between the central part of the Aarmassiv and the Gotthardmassiv (and Tessin) are in conflict with this principle.

EINLEITUNG

Die indirekten, kryometrischen Messungen des Salzgehaltes der Flüssigkeiteinschlüsse in Mineralien sind seit der Arbeit von ROEDDER (1962 und 1963) zwar vervielfacht worden. Trotzdem finden sich in der Literatur noch sehr wenig genaue Angaben über die Zusammensetzung der Lösungen, die mit einer Metamorphose gekoppelt waren. Dabei standen diese Flüssigkeiten im Gleichgewicht mit den metamorph entstehenden Mineralassoziationen, und die genaue Kenntnis ihrer Zusammensetzung, vor allem die Kenntnis des Faktors Σ aller Kationen/H⁺ (HEMLEY, 1959), würde wichtige Erkenntnisse über die Stabilität bestimmter Silikate liefern.

Für das Studium entsprechender Zusammenhänge bieten die alpinen Zerrklüfte gutes Untersuchungsmaterial an. Sie enthalten Kristalle mit Flüssigkeiteinschlüssen, die leicht studiert werden können. Zudem kann häufig festgestellt werden, mit welchen Mineralien diese Lösungen im Gleichgewicht standen. Allerdings muss betont werden, dass damit nicht Zustände aufgezeigt werden, die während der alpidischen Metamorphose, sondern während einer gewissen Zeit nachher im Alpenkörper geherrscht haben. Das studierte Material stammt aus 36 Zerrklüften der Schweizeralpen: Aus den helvetischen Decken im Norden, aus den Zentralmassiven und aus dem Penninikum im Süden, zudem aus möglichst verschiedenartigem Nebengestein. Einige der Zerrklüfte sind vor kurzem eingehender beschrieben worden (STALDER, 1964a und b, 1967). In allen Klüften ist der Quarz das vorherrschende Mineral; die Messungen sind deshalb ausschliesslich an dieser Mineralart gemacht worden. Bei den Einschlüssen handelt es sich durchwegs um solche sekundärer und pseudosekundärer Art.

UNTERSUCHUNGSTECHNIK

Der verwendete Kühltisch (Modell Leitz, 350, leicht abgeändert) erlaubt das Erreichen von ziemlich tiefen Temperaturen. Die Abkühlung geschieht

durch einen Gasstrom von Stickstoff, der seinerseits zuvor in flüssigem Stickstoff abgekühlt worden ist. Ein Präzisions-Hahn erlaubt die Regulation des Gassstromes, um nach erfolgter Gefrierung des Einschlusses ein langsames Wiederansteigen der Temperatur zu erhalten. Diese Temperatur wird mit einem Platin-Widerstands-Thermometer gemessen, welches neben die Probe gehalten wird. Die Genauigkeit, geprüft an Hand synthetischer Einschlüsse von destilliertem Wasser und n-Dodecan ($T_s = -9,6^\circ\text{C}$), ist im Bereich, der für unsere Messungen wichtig ist, das heißt von -10°C bis 0°C , $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Unter Berücksichtigung dieser Genauigkeit kann das Wiederansteigen der Temperatur trotzdem relativ rasch erfolgen, das heißt von 1° bis 2°C pro Minute. Das Untersuchungsverfahren wurde von ROEDDER (1962) im Detail beschrieben: Zuerst bringt man die wässrigen Lösungen der Einschlüsse bei tiefer Temperatur zum Gefrieren. Dieses Gefrieren erfolgt sehr häufig bei ungefähr -40°C und zwar in einem Akt, vorausgesetzt, dass die Lösung im wesentlichen eine wässrige ist. Das Gefrieren geschieht in zwei Akten, wenn CO_2 (oder ein anderes Gas) in den Einschlüssen vorhanden ist; dann entsteht zuerst ein durchsichtiges Hydrat und erst nachher mehr oder weniger undurchsichtiges Eis. Beim Wiederansteigen der Temperatur beobachtet man zuerst das partielle Erscheinen von durchsichtiger Flüssigkeit (Temperatur des ersten Schmelzens = T_{s1}), später das Verschwinden der letzten Eiskristalle (Schmelztemperatur = T_{s2}) und schließlich, wenn überhaupt vorhanden, das Verschwinden der Hydrat-Kristalle. T_{s1} ist oft recht schwer zu beobachten, T_{s2} kann dagegen genau festgestellt werden.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse (Tabelle 1) gliedern sich in zwei Serien. Die erste Serie umfasst Nachweise bestimmter Gase in den Quarzeinschlüssen, gleichgültig ob diese Gase bei Zimmertemperatur in verflüssigter Phase oder gelöst in der wässrigen Lösung vorhanden waren. Die zweite Serie gibt Hinweise über den Salzgehalt der eingeschlossenen wässrigen Lösungen.

1. Die verschiedenen Hydrate

Nach ihrer Schmelztemperatur kann man drei verschiedene Hydrate (resp. Hydratgruppen) unterscheiden.

a) CO_2 -Hydrat: $\text{CO}_2 \cdot 5\frac{3}{4} \text{H}_2\text{O}$. Dieses Hydrat konnte in den 17 Proben, die flüssiges CO_2 enthalten, aber auch in zwei weiteren (17, Gischihorn und 19, Piz Garviel) beobachtet werden, in welchen das CO_2 beim Abkühlen nicht in Erscheinung trat. Das Hydrat verschwindet zwischen $+7,2^\circ\text{C}$ und $+11,4^\circ\text{C}$, was in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen von ROEDDER (1963) und auch mit den experimentellen Daten von TAKENOUCHI und KENNEDY

Tabelle 1: Verzeichnis der untersuchten Proben

Nr. = Nummer der Fundortgruppe nach R. L. PARKER: Die Mineralfunde der Schweizer Alpen. 3. Auflage (in Vorbereitung). Anzahl Phasen: Festgestellt bei Zimmertemperatur. Bei allen dreiphasigen, CO_2 -haltigen Einschlüssen ist die Homogenisierungstemperatur des CO_2 angegeben. G bedeutet, dass dabei alles CO_2 in die gasförmige (F entsprechend in die flüssige) Phase übergeht.

Nr. Fundort	Koordinaten	Nebengestein	Paragenese	Nr. nach PARKER	T_{s1} °C	T_{s2} °C	[NaCl] Gew. %	Anzahl Phasen	$T_{\text{Ph}3 \rightarrow 2}$	Hydrate	$T_{\text{g Hydr.}}$ °C
<i>1a) Nördliche Kalkalpen, CH_4-frei</i>											
3 Sackgraben, Frutigen, BE	611,35/153,25	Flysch, Niesensandstein	Qz, Cc	15b	-25 bis -30	-4,5 und -9,5	7	2	—	—	—
5 Rosenlau, BE	655,7/170,5	Taveyannaz-sandstein	Qz, Chl, Cc, Brookit	15b	-6 bis -7	0,0 bis -0,8	0 bis 1,5	2	—	—	—
<i>1b) Nördliche Kalkalpen, CH_4-haltig</i>											
1 Torrent de la Tille, Val d'Illiez, VS	559,2/118,4	Flyschsandstein	Qz, Cc	15c	-3,4 bis -4	-0,6 bis -1,2	1 bis 2	2	wenig	16 bis 18	18
2 Tour de Duin, Bex, VD	567,8/121,2	Flyschsandstein	Qz, Cc	15c	-3,5	-1,1 bis -1,2	2	2	wenig	16 bis 18	18
4 Wermutfluh, Hohtürli, BE	625/152,1	Quarzsandstein	Qz	15c	-4	-1,3 bis -1,4	2,5	2	sehr viel	16 bis 18	18
<i>2. Armassiv, Zone der Nördlichen Schiefer</i>											
6 Kammegg bei Guttannen, BE (Kammegg I)	667,1/168	Amphibolit	Qz, Ad, Chl, Am, Ep, Scheelite	2a	-14	-2,5 bis -2,7	4,4 bis 4,8	2	sehr wenig	3	3
7 Kammegg bei Guttannen, BE (Kammegg II)	668,05/168,65	Amphibolit	Qz, Ad, Chl, Am, Ep	2a	-13 bis -18	-2,5 bis -2,9	4,5 bis 5	2	sehr wenig	3,5	3,5

8	Stollen Mittagfluh – Trift, BE	Chlorit-Seri- cit-Schiefer/ Gneis	Qz, Ad, Chl, Tit	2a	–25	–3,5 bis –4,0	5,8 bis 6,5	2	–
25	Alp Cavrein, Val Gronda, GR	707,5/180,7	Chlorit-Seri- cit-Schiefer/ Gneis	Qz, Ad, Chl, An, Br ... (–25)	1a –30	–20 bis –2,5	4,5	2	–
<i>3. Aarmassiv, Zone der zentralen Granite</i>									
9	Sommerloch, Grimsel, BE	668,65/158,90 (unter Tag)	Grimsel- Granodiorit	Qz, Fl, Chl, Ap, Milarit	4a –28	–25 bis –8,0	–7,8 bis 11,2 bis 11,5	2	–
10	Juchli, Grimsel, BE		Grimsel- Granodiorit	Qz, Fl, Chl, Cc, Py	4a –30	–25 bis –6,2 (–5,6)	–4,5 bis 7,2 bis 9,3 (8,5)	2	–
11	Druckschacht, Grimsel, BE	668,22/157,45 (unter Tag)	Grimsel- Granodiorit	Qz, Karb, Musk, Erze ...	4c –14	–6,0	9	31 G	viel 8,5 bis 9,5
12	Gerstengletscher, Oberhasli, BE	670,60/160,60	Grimsel- Granodiorit	Qz, Ad, Py, Chl	4a –25	–7,5 bis –8,0	11 bis 11,5	2	–
15	Hinter Wasen, Fieschergletscher, VS	654,8/149,7	Zentraler Aaregranit	Qz, Amethyst, Chl, Il-Rut ... VS	4b –16	–10 bis –6,5	9,6	27,5 bis 31 G	viel 8,5 bis 9
<i>4. Aarmassiv, südliche Zone und Gotthardmassiv, nördliche Zone</i>									
13	Sondierstollen, Gletsch, VS	670,7/157	Amphibolit- Hornblende- fels, Aarm.	Qz, Ad, Chl, Tit	5d –18	–15 bis –4,8	–3,8 bis 7,6	6,3 bis 7,6	2
14	Rhonegletscher, VS	672,37/158,6	Sericit-Gneis der GSZ, Aarm.	Qz, Chl	5d –10	–7 bis –4,4	–3,8 bis 7	31 G	9,5
16	Mooshubel, Mühlebach, VS	654,65/139,7	Phyllit, Gotthardm.	Qz, Musk, Karb, Rut	5b	– 8	– 3,2	5,4	3 viel 24,5 F

Nr. Fundort	Koordinaten	Nebengestein	Paragenese	Nr. nach PARKER	T _{s1} °C	T _{s2} °C	[NaCl] Gew. %	Anzahl Phasen T _{ph3} → ₂	Hydrate	T _s Hydr. °C
27 Muttgletscher bei Gletsch, VS	675/155,8	Gurschengneis Qz, Ab, Musk, Chl	nördl. Gottthardmassiv	5b — 7	— 6 bis — 4,5	— 3,5 bis — 4,5	5,8 bis 7,2	3 29,5 F	viel	9,5
28 Mettlen bei Andermatt, UR	689,3/165,7	Permokarbon Qz, Chl	6	— 17	— 5,6 bis — 5,9	8,5 bis 9	2	sehr wenig	— 3 bis — 1	
<i>5. Gotthardmassiv, zentrale und südliche Zone</i>										
18 Ri della Fibbia, TI	686,3/156,1	Fibbia-Granit- Qz, Rut, Ad, Chl, Des ...	gneis	7d	— 7,5	— 3,3 bis — 3,5	5,5 bis 5,8	3 29,5 G	wenig	9,5 bis 11,5
19 Piz Garvieu, Medel, GR	706,9/161	Medelsorgranit Qz, Chl	od. Cristallina-Granodiorit	7e	— 15	— 4,5 bis — 5,5	7,2 bis 8,5	2	sehr viel	7,5 bis 8,2
23 Piz Prevat, Gotthard, UR	691,0/159,2	Paragneis des Qz, Ab, Musk, Chl, Rut, An	Gotthard- massivs	7b	— 8	— 3,8 bis — 4,4	6,2 bis 7	3 28,5 F	viel	9,1 bis 10,5
24 Alpe di Fieud, Gotthard, TI	685,5/153,5	Tremola-Serie Qz, Rut, Chl, Musk, Akt ...	Amphibolit	7i	— 3,5 bis — 4,0	5,8 bis 6,5	3 27,5 F	3 viel	9 bis 10	
<i>6. Tessin</i>										
29 Piz Madone, Val Torta, TI	685,6/149,3	Bündnerschiefer	Qz, Musk, Rut, 10d Magnetkies ...	— 3	— 2,0	3,7	3	viel	10,6 bis 11,5	
47 Prugiasco, Val Blenio, TI	714,72/146,17	Granitgneis	Qz, Musk, Ab, 10f Chl, Rut, Tur ...	— 5	— 3,4	5,7	3 24 bis 27 G	vorhanden	9,5 bis 10,0	
46 Iragna, Steinbruch, TI	717,8/131,1	Pegmatit	Qz, Ad, Tit, Chl, Musk ...	10g — 11	— 9 bis — 4,3	6,1 bis 7	2 —			

54	Campo Blenio, TI	714,8/156,8	Bündnerschiefer	Qz, Alb, Chl, Musk, Erze...	10d	-3,0	5,1	3	vorhanden	4 bis 6
61	Camperio bei Olivone, TI	712,4/153,7	Quartonschiefer	Qz, Musk, Chl, 10d Rut, Tit ...	-7	10,3	3	31 F	vorhanden	7,2 bis 8,5
50	Lago Bianco, Val Bavona, TI	682,3/145,3	Gneis, ver-schiefert	Qz	10e, f	-3,0 bis -3,5	5,1 bis 5,8	~31 F	vorhanden	10,5 bis 11
66	Piz Barone, TI		Biotit-Gneis	Qz	? 10e	-3,0 bis -3,5	5,1 bis 5,8	29 G	vorhanden	10,5
67	Val di Chironico, TI		Gneis	Qz, Ad, Tit	10h	-3,1 bis -4,2	5,2 bis 6,8	31 F	vorhanden	9,4 bis 10,5
								31 G	Hydrate vorhanden	9,8 bis 11,3
									12 bis	13
17	Gischihorn, Binntal, VS	659,65/130,05	Zweiglimmer-gneis	Qz, Fl, Chl, Tur ...	11g	- 7	- 2,5	4,5	2	sehr wenig 8
20	Piz Stgir, GR	721,54/165,8	Bündnerschiefer	Qz, Cc ...	8h	-11	-7,5	11	3	14,5 G viel
21	Val Largia, Lumnezia, GR	725,98/169,58	Bündnerschiefer	Qz, Cc	8h	-10 bis -7	-2,5 bis -3,5	8,4	2	sehr wenig 9,5
								5,8	2	2 bis 4
51	Plattenzug, Calanda, GR	752,6/189,95	Spilit	Qz, Tur, Ab, Chl ...	15g	-25	-4,8	7,6	2	-
52	Tschengels, Calanda, GR	751,27/190,2	Rötidolomit	Qz, Dol ...	15h	- 7 bis -8	-3,7 bis -4,5	6,1 bis 7,2	30,5 bis 31 F	9,2 bis 10

(1965a) steht. Diese fanden eine Zersetzungstemperatur des CO_2 -Hydrates von 10°C , in Anwesenheit von Wasser und CO_2 -Gas. Einmal mehr stellen wir fest, dass dieses Hydrat den qualitativen Nachweis des CO_2 erlaubt, auch wenn das flüssige CO_2 in den Einschlüssen nicht erscheint. Der Nachweis ist sehr empfindlich.

b) Zwischen $+16^\circ\text{C}$ und $+18^\circ\text{C}$ schmelzende Hydrate. Die Proben aus drei Klüften (1, Torrent de la Tille; 2, Tour de Duin und 4, Wermutfluh) zeigen die Bildung eines Hydrates, das zwischen $+16^\circ\text{C}$ und $+18^\circ\text{C}$ verschwindet. Dies kann nicht mehr das Hydrat des CO_2 sein, das bei dieser Temperatur nur unter sehr hohem Druck stabil ist. Es handelt sich höchst wahrscheinlich um das Hydrat des Methans, das nach experimentellen Daten (DEATON und FROST, 1946) bei dieser Temperatur und einem Druck von ungefähr 150 Atm. stabil ist. Der Druck kann aber sehr viel niedriger sein, wenn Spuren von CO_2 oder andere Kohlenwasserstoffe vorhanden sind. STALDER und TOURAY (1970) haben gezeigt, dass in den betreffenden Einschlüssen neben H_2O wirklich CH_4 vorhanden ist, zusammen mit Spuren von CO_2 und andern Kohlenwasserstoffen. Ein bis $+18^\circ\text{C}$ stabiles Hydrat hat ROEDDER (1963) in den Quarz-Kristallen von Magnet Cove, Arkansas, beobachtet.

c) Zwischen $+2^\circ\text{C}$ und $+6^\circ\text{C}$ schmelzende Hydrate. Die Proben aus drei Klüften (6 und 7, Kammegg und 20, Piz Stgir) weisen ein Hydrat auf, das stabil ist bis $+4^\circ\text{C}$, und aus der Kluft 54 (Campo Blenio) stammt eines, das bei $+6^\circ\text{C}$ zerfällt. Für diesen Temperaturbereich sind die Diagramme von DEATON und FROST (1946) kaum zu gebrauchen, da man die Drucke nicht kennt. Wir können einzig sagen, dass diese Hydrate sich verhalten wie Hydrate von Kohlenwasserstoffen bei mittleren Drucken: einige bis einige Dutzend Atmosphären.

2. Die Konzentration der gelösten Salze

Um die Interpretation zu vereinfachen, sind die Resultate (Tabelle 1) auf ein Diagramm (Fig. 1) übertragen worden, wobei auf der Abszisse die Schmelztemperatur (T_{S_2}) und die Salzkonzentration in Äquivalenten [NaCl], auf der Ordinate die Temperatur des ersten Schmelzens (T_{S_1}) abgetragen sind, die eine Idee über die Komplexität der Salzgehalte, insbesondere über den relativen Gehalt an Ca vermittelt.

Trotz der kleinen Anzahl studierter Klüfte, erscheinen gewisse Gruppierungen recht klar.

Die Kristalle aus dem Helvetikum (1, 2, 4, 5) gruppieren sich über einer Schmelztemperatur von $-1,5^\circ\text{C}$. Dies entspricht den schwächsten Salzkonzentrationen, die im Laufe dieser Arbeit ermittelt worden sind. Eine einzige Kluft bildet eine Ausnahme (3, Sackgraben) mit einer Temperatur T_{S_2} von $-4,5^\circ\text{C}$. Die Mineralkluft 3 liegt ganz nahe einer Rauhwackeschicht und nur 150 m von

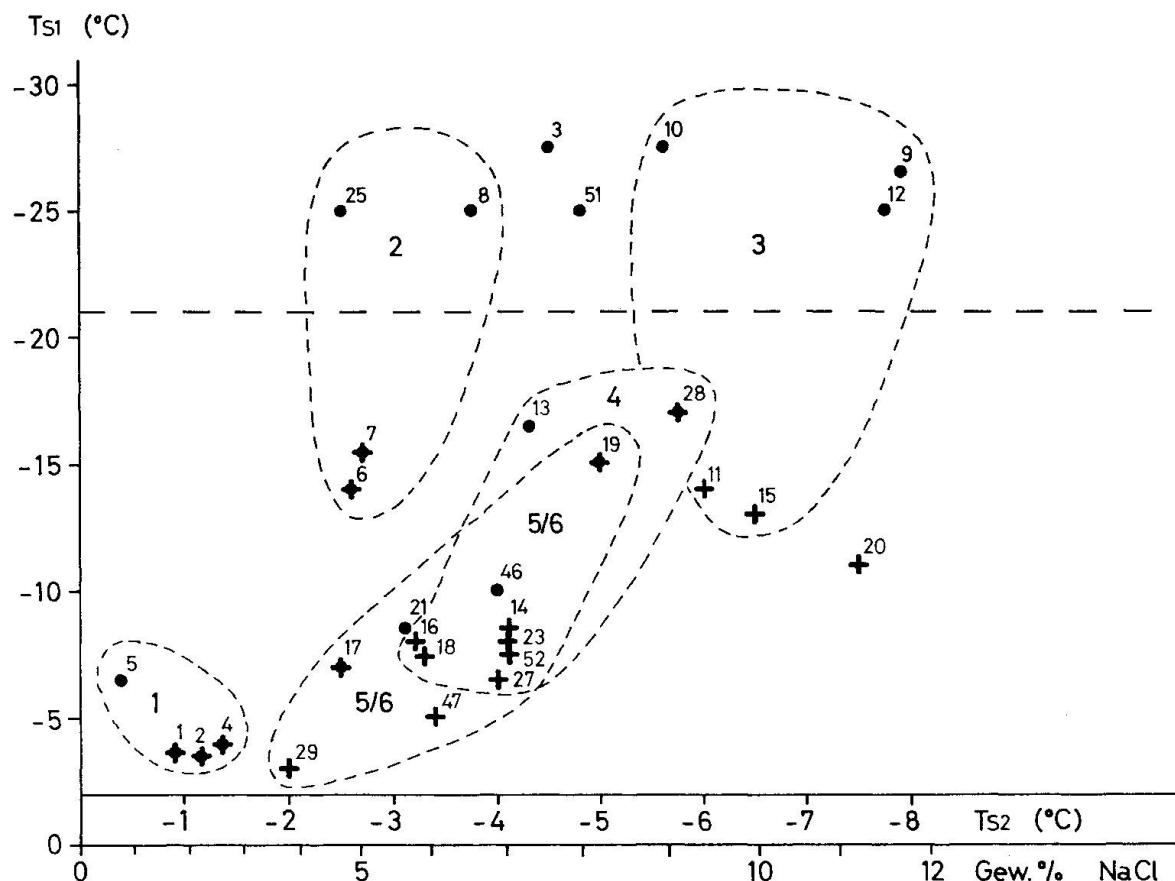


Fig. 1. Zusammenstellung der kryometrischen Messungen.

Abszisse: Temperatur des vollständigen Schmelzens, das heisst des Schmelzens der letzten Eis-kristalle (T_{S2}), schematisch umgerechnet in Äquivalente NaCl.

Ordinate: Beginn des ersten Schmelzens (T_{S1}). Die Temperatur des Eutektikums von H_2O und $NaCl \cdot 2H_2O$ bei $-21,1^\circ C$ ist besonders hervorgehoben. Einschlusfüllungen, die schon vor dieser Temperatur zu schmelzen beginnen, müssen neben NaCl noch andere Salzkomponenten enthalten.

Kleine Zahlen = Probenummern entsprechend Tabelle 1.

Grosse Zahlen = Fundortgebiete entsprechend Tabelle 1.

Punkte = Zweiphasige Einschlüsse (bei Zimmertemperatur) ohne Hydratbildung.

Punkt-Kreuze = Zweiphasige Einschlüsse (bei Zimmertemperatur) mit Hydratbildung.

Kreuze = Dreiphasige Einschlüsse (bei Zimmertemperatur) mit Hydratbildung.

einer Gipsbank entfernt. Dieser Sachverhalt soll weiter unten diskutiert werden.

Im Aarmassiv können zwei Gruppierungen unterschieden werden: Die Kristalle aus der Zone der nördlichen Gneise und Schiefer (inkl. Amphibolite) weisen eine Schmelztemperatur (T_{S2}) von $-2,6^\circ$ bis $-3,7^\circ C$ auf, wobei die erste Schmelztemperatur (T_{S1}) zum Teil ausgesprochen tief liegt ($-14^\circ C$ bis $-30^\circ C$). Die Kristalle aus der zentralen Granitzone geben eine T_{S2} , die deutlich tiefer liegt ($-5,6^\circ$ bis $-7,9^\circ C$) als diejenige aus der Zone der nördlichen Gneise, und die T_{S1} ist ebenfalls sehr tief. Hier kann an die zwei chemischen Analysen von Flüssigkeitseinschlüssen aus einem Quarzkristall vom Bächi-

stock von KOENIGSBERGER und MÜLLER (1906a und b) erinnert werden. Diese Analysen, sie gehören zu den ersten überhaupt durchgeföhrten, entstammen ebenfalls einer Fundstelle der zentralen Granitzone. Die mitgeteilten Salzgehalte von 7,8% und 10,5% NaCl stimmen gut mit unsren kryometrischen Daten von 7,2% bis 11,5% [NaCl] überein. Diese Werte lassen sich zudem auch mit denjenigen aus Einschlüssen in Mineralien aus Klüften des Mont-Blanc-Massivs (7% bis 11% [NaCl]; POTY, 1967) vergleichen, dessen tektonische Stellung im alpinen Gebirgsbau weitgehend demjenigen des Aarmassivs entspricht.

Die Daten aus dem Südteil des Aarmassivs und dem Gotthardmassiv zeigen eine Gruppierung bei T_{S_2} $-3,1^{\circ}$ bis $-5,7^{\circ}$ C. Dies entspricht einem etwas geringern Salzgehalt als demjenigen aus der zentralen Granitzone des Aarmassivs. Vor allem ist aber die erste Schmelztemperatur (T_{S_1}) im Gotthardmassiv niedriger als im Aarmassiv.

DISKUSSION

Aufgrund der gegebenen Tatsachen ist es möglich herauszufinden, wovon die Salzkonzentration in der flüssigen Phase vor allem abhängt:

1. Von der Intensität der Metamorphose (?).
2. Vom Gehalt des gelösten Gases.
3. Von der Natur des umgebenden Gesteins.

1. Einfluss der Intensität der Metamorphose

In den Kalkalpen nördlich der Massive ist die Schmelztemperatur (T_{S_2}) relativ hoch, das heisst höher als $-1,4^{\circ}$ C, während südöstlich davon die entsprechende Temperatur zwischen -2° C und -8° C liegt. Der Unterschied ist sehr deutlich. Vermutlich hängt er mit den Temperatur- und Druckbedingungen zusammen, die während der Bildungszeit in den Klüften geherrscht haben. In den nördlichen Kalkalpen haben die Temperatur- und Druckbedingungen nie diejenigen der Zeolith-Facies überschritten (MARTINI und VUAGNAT, 1965), während im Aarmassiv im Bereich der Stilpnomelan-Zone überall die Grünschiefer-Facies erreicht worden ist (E. NIGGLI und C. NIGGLI, 1965). Zudem weiss man, dass die alpinen Zerrklüfte des Aarmassivs die meisten typischen Mineralien der Grünschiefer-Facies enthalten (PARKER, 1954). Es ist deshalb anzunehmen, dass sich diese Mineralien nur kurze Zeit nach der intensivsten Metamorphose dieses Gebietes gebildet haben. Im Tessin war die geologische Situation anders. Während die Bedingungen der intensivsten alpinen Metamorphose die Grünschiefer-Facies weit überschritten und sogar zur Bildung von Sillimanit führten, enthalten die alpinen Zerrklüfte dieses Gebietes im wesentlichen typische Mineralien der Grünschiefer-Facies.

Der Reihenfolge steigender Salzgehalte: Nördliche Kalkalpen, Tessin, Gotthard-Massiv, zentrales Aarmassiv, kann nun allerdings trotzdem kein allgemeines Wachstum der Parameter T und P entsprechen. Dies würde allen qualitativen Abschätzungen dieser Werte, die wir heute besitzen, widersprechen. So führen zum Beispiel BAMBAUER, BRUNNER und LAVES (1962) den hohen Wasserstoffgehalt in den Quarzen des südlichen Gotthardmassivs und im Penninikum (zwischen Moësa und Toce) auf höhere Bildungstemperaturen zurück. Auch die Feststellung von GÜNTHER (1953), wonach die Kluftplagioklase im gleichen Gebiet zum Teil beträchtliche An-Gehalte aufweisen, und die Untersuchungen von NISSEN (1967) über den Adularhabitus untermauern die Ansicht von BAMBAUER et al.

Es erscheint uns deshalb vorläufig recht schwierig zu erklären, warum die Einschlüsse in Quarzkristallen des zentralen Aarmassivs den höchsten Salzgehalt aufweisen, einen höhern als entsprechende Einschlüsse im Gotthardmassiv und im südlich anschliessenden Penninikum. Es bleibt deshalb nur die Feststellung, dass der Salzgehalt von der „Zeolith“- zur Grünschiefer-Facies eindeutig zunimmt.

2. Der Einfluss des Gehaltes gelösten Gases

Die vorliegenden Messungen sind viel zu wenig zahlreich, um eine Abhängigkeit zwischen Methan- und Salzgehalt festzustellen; dagegen kann eine solche zwischen CO₂- und Salzgehalt beobachtet werden. Als Beispiel soll das zentrale Aarmassiv dienen. Hier haben sich die Kluftmineralien vermutlich bei ähnlichen Temperatur- und Druckbedingungen gebildet. Dort, wo nun flüssiges CO₂ vorhanden ist (Sättigung der wässerigen Phase an CO₂), sind höhere Schmelztemperaturen (T_{S1} und T_{S2}) festzustellen als in Einschlüssen ohne CO₂.

Vorkommen von flüssigem CO ₂ (oder von CO ₂ -Hydrat)			Kein CO ₂		
	T _{S1}	T _{S2}		T _{S1}	T _{S2}
11 Druckschacht Oberaar	-14	-6,0	9 Sommerloch	-27	-7,9
15 Fieschergletscher	-13	-6,5	10 Juchli	-27	-5,6
			12 Gerstengletscher	-25	-7,7

Dieser Einfluss beschränkt sich nicht auf die Klüfte des zentralen Aarmassivs; man stellt ihn beim Studium der Tabelle 1 auch an andern Orten fest. Der Effekt kann nicht überraschen, denn die experimentellen Daten haben schon mehrfach gezeigt, dass beim Hinzufügen einer Komponente (CO₂ oder NaCl) zur wässerigen Lösung, die Löslichkeit der andern stark herabgesetzt wird (TAKENOUCHI und KENNEDY, 1965b).

3. Einfluss des Nebengesteins

Die Zusammensetzung des Nebengesteins ist ein wichtiger Faktor der Beeinflussung des Salzgehaltes in den wässrigen Einschlüssen. Aus den gleichen Gründen wie oben führen wir Beispiele aus dem Aarmassiv (Grimselgebiet) an.

Grimsel-Granodiorit			Amphibolite		
	T_{S1}	T_{S2}		T_{S1}	T_{S2}
9 Sommerloch	—27	—7,9	6 Kammegg I	—14	—2,6
10 Juchli	—27	—5,6	7 Kammegg II	—16	—2,7
11 Druckschacht	—14	—6,0	13 Gletsch	—16	—4,2
12 Gerstengletscher	—25	—7,7			

Die Lösungen, die im Gleichgewicht mit den Granodioriten standen, weisen eine erste Schmelztemperatur (T_{S1}), vor allem aber eine zweite (das heisst eigentliche) Schmelztemperatur (T_{S2}) auf, die viel tiefer liegt als die entsprechenden Temperaturen aus den Amphiboliten. In den Granodioriten treten demnach etwa doppelt so hohe Salzgehalte auf wie in den Amphiboliten. Vorläufig bleibt diese Gegenüberstellung für die kristallinen Gebiete leider die einzige mit einem bestimmten Aussagewert.

Während die Löslichkeit silikatischer (und karbonatischer) Gesteine allgemein sehr klein ist, ist diejenige der Evaporite recht gross. Es ist deshalb verständlich, dass Kluftlösungen, die mit Evaporiten in Berührung kamen, viel salzreicher sind. – Wir haben zum Beispiel gesehen, dass in den nördlichen Kalkalpen die Salzgehalte der Kluftlösungen gering und um einen bestimmten Wert gruppiert sind. Davon ausgenommen ist eine Kluft aus der Niesendecke (3, Sackgraben), die etwa 150 m über einer mächtigen Gipsbank liegt. Ähnlich ist der hohe Salzgehalt aus einer Kluft im Tessin (61, Camperio) zu erklären, die in den Quartenschiefern des Keupers liegt, der in der näheren Umgebung einen mächtigen Gipskörper einschliesst. Der Salzgehalt in der Kluft am Piz Stgir (20), im Diagramm ganz isoliert vorkommend, kann vermutlich mit nahe gelegenen Trias-Aufschlüssen in Zusammenhang gebracht werden (allerdings sind dort bis heute keine Gipslager bekannt geworden).

Bis heute kennt man aus den Schweizeralpen nur von zwei Fundstellen ausgeschiedene Steinsalzkristalle (resp. kubische Salzkristalle) in den Quarzeinschlüssen:

1. Mineralfundstelle Lengenbach im Binntal, im zuckerkörnigen Trias-Dolomit (STALDER, 1967).
2. Grosse Quarzkluft im Druckschacht der Electra-Massa bei Bitsch (VS), in den südlichen Gneisen des Aarmassivs. Im gleichen Stollen sind mächtige, gangartige Gipslagen entdeckt worden (LABHART, 1969).

Leider konnten beide Funde nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen sein (Mangel an Untersuchungsmaterial und Neuentdeckung während der Niederschrift dieser Arbeit). Obige Beobachtungen bestätigen frühere von YAJIMA, TOURAY und IIYAMA (1967), die Steinsalzwürfelchen in Albit- und Quarzkristallen aus dem Trias-Dolomit der Region von Modane beschrieben haben. Im Mont-Blanc-Massiv ist der Salzgehalt der Lösungen, die mit dem Granit im Gleichgewicht stehen, klein (POTY, 1967), das heisst sehr ähnlich wie im Aarmassiv. Im Süden des Mont-Blanc-Massivs, nahe der Trias, hat aber DEICHA (1955) ebenfalls Steinsalzwürfel in den Mineraleinschlüssen beobachtet.

LITERATUR

SMPM = Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen

- BAMBAUER, H. U., BRUNNER, G. O. und LAVES, F. (1962): Wasserstoff-Gehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit. SMPM 42, S. 221–236.
- DEATON, W. N. und FROST, E. M. (1946): Gas hydrates and their relation to the operation of Natural-Gas Pipe-Lines. U.S. Bureau of Mines, Monograph 8.
- DEICHA, G. (1955): Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides. Signification dans la genèse des gites minéraux et des roches. Masson, Paris.
- GÜNTHERT, A. (1953): Plagioklase aus Klüften der Tessiner Alpen. SMPM 33, S. 161–166.
- HEMLEY, J. J. (1959): Some mineralogical equilibria in the system $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$. Amer. J. Sci. 266, S. 129–166.
- KOENIGSBERGER, J. und MÜLLER, W. J. (1906a): Über die Flüssigkeitseinschlüsse im Quarz alpiner Mineralklüfte. Zbl. Mineral. Geol. Paläont., S. 72–77.
- KOENIGSBERGER, J. und MÜLLER, W. J. (1906b): Versuche über die Bildung von Quarz und Silikaten. Zbl. Mineral. Geol. Paläont., S. 339–348.
- LABHART, T. P. (1969): Die petrologischen, tektonischen und radiometrischen Verhältnisse der Stollen der Electra-Massa. SMPM 49/3.
- MARTINI, J. und VUAGNAT, M. (1965): Présence du facies à zéolites dans la formation des „grès“ de Taveyanne (Alpes franco-suisses). SMPM 45, S. 281–293.
- NIGGLI, E. und NIGGLI, C. R. (1965): Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in den Schweizer Alpen. Eclogae geol. Helv. 58, S. 335–368.
- NISSEN, H. U. (1967): Domänengefüge, Natriumgehalt, Natriumentmischung und Gitterkonstanten von Alkalifeldspäten der Schweizeralpen. SMPM 47, S. 1140–1145.
- PARKER, R. L. (1954): Die Mineralfunde der Schweizer Alpen. Wepf & Co., Basel.
- POTY, B. (1967): La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple du filon de la Gardette (Bourg d'Oisans) et des filons du massif du Mont Blanc. Thèse, Nancy, und Mem. 17, Sciences de la Terre, Nancy (1969).
- ROEDDER, E. (1962): Studies of fluid inclusions I: Low temperature application of a dual purpose freezing and heating stage. Econ. Geol. 57, S. 1045–1061.
- (1963): Studies of fluid inclusions II: Freezing data and their interpretation. Econ. Geol. 58, S. 167–211.
- STALDER, H. A. (1964a): Petrographische und mineralogische Untersuchungen im Grimselgebiet. SMPM 44, S. 187–398.

- (1964b): Quarzfund vom Taminser Calanda. *Mitt. Naturf. Ges. Bern*, NF 20, S. XLIII–XLVI.
 - (1967): Blauquarz vom Taminser Calanda. *Urner Mineralien-Freund*, H. 1, Jhg. 5, S. 1–6.
- STALDER, H. A. und TOURAY, J. C. (1970): Fensterquarz mit Methaneinschlüssen aus dem westlichen Teil der schweizerischen Kalkalpen, *SMPM* 50/1, S. 109–130.
- TAKENOUCHI, S. und KENNEDY, G. C. (1965a): Dissociation pressures of the phase $\text{CO}_2 \cdot 5^{3/4}\text{H}_2\text{O}$. *J. Geol.* 73, S. 383–390.
- (1965b): The solubility of carbon dioxide in NaCl solution at high temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.* 263, S. 445–454.
- YAJIMA, J., TOURAY, J. C. und IIYAMA, J. T. (1967): Les inclusions fluides d'albites de la région de Modane. *Bull. Soc. franç. Minéral. Cristallogr.* XC, S. 394–398.