Geochemie der Veränderungen von Granit durch hydrothermale Lösungen (Zentraler Aaregranit)

Autor(en): **Mercolli, Ivan / Schenker, Franz / Stalder, Hans A.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **64 (1984)**

Heft 1-2

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-49535

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 64, 67–82, 1984

Geochemie der Veränderungen von Granit durch hydrothermale Lösungen
(Zentraler Aaregranit)

von *Ivan Mercolli*[1], *Franz Schenker*[1] und *Hans A. Stalder*[2]

Abstract

Using whole rock analyses, the effect of hydrothermal alteration of granite adjacent to fissures was examined in the granite of the central Aar Massif (a greenschist metamorphosed Hercynian granite).

Cations can be classified into four groups (BOC, TOC, TEC, ALC) depending on their crystal-chemical properties. It was found that cations of the same group behave similarly during fluid/rock interaction, this allowed to estimate the bahaviour of elements which were not measured. On the other hand the four groups show considerable differences in magnitude and in direction of transport.

BOC: nearly totally depleted in the altered granite
TOC, TEC: fairly depleted in the altered granite
ALC: varies between slight depletion and enrichment

The hydrothermal processes can be summarized as follows:
granite (unaltered) + fluid 1 → granite (altered) + fluid 2 → fissure minerals + fluid 3

Keywords: hydrothermal fluids, geochemistry, alteration, transport of cations, classification of cations, granite, fissures

1. Einleitung

Beim Eindringen von Lösungen bilden sich im Bereich von Klüften chemisch und mineralogisch veränderte Gesteine. Wir haben solche Phänomene am Zentralen Aaregranit im Querschnitt des Gotthardstrassentunnels untersucht. Ziel dieser Arbeit ist es, eine chemische Bilanz der Reaktion Lösung–Gestein ziehen zu können. Dazu haben wir Gesamtgesteinsanalysen von unveränderten und veränderten Graniten verwendet.

Nicht eingegangen wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Austauschreaktionen zwischen Mineralphasen und Lösung.

[1] Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern, Baltzerstr. 1, CH-3012 Bern
[2] Naturhistorisches Museum Bern, Bernastr. 15, CH-3005 Bern

2. Geologischer Rahmen

Die untersuchten Proben stammen aus dem Gotthardstrassentunnel (STALDER et al., 1980). Lithologisch sind sie dem Zentralen Aaregranit zuzuordnen. Es handelt sich um einen herzynisch intrudierten Pluton (Rb-Sr-Gesamtgesteinsalter 281 ± 11 my, FREY et al., 1976, nach WÜTHRICH, H., 1965), welcher alpidisch leicht deformiert und grünschieferfaziell überprägt wurde (FREY et al., 1976). Die im Folgenden beschriebene hydrothermale Veränderung des Granits um die Zerrklüfte ist ein alpidisches Ereignis.

Die ursprüngliche Probenbezeichnung nach der Metrierung wurde nach folgendem Schema vereinfacht:

Probenbezeichnung:

STALDER et al., 1980	Diese Arbeit
GNS 102 UV	GO 11
GNS 102 V	GO 12
GNS 294 UV	GO 21
GNS 294 V	GO 22
GNS 1775 UV	GO 31
GNS 1775 V	GO 32
GNS 1783 UV	GO 41
GNS 1783 V	GO 42
GNS 1927 UV	GO 51
GNS 1927 V	GO 52

GNS	Gotthard Nord Sicherheitsstollen	GO	Gotthard Nord Sicherheitsstollen
102	Metrierung ab Nordportal	1	Kluftnummer
UV	unverändert	1	unverändert
V	verändert	2	verändert

3. Beschreibung der hydrothermal veränderten Zonen

Durch das alpidische Stressfeld öffneten sich ungefähr senkrecht zur Hauptschieferung Zerrklüfte. Entlang dieser Risssysteme drangen hydrothermale Lösungen ein. Nach Messungen von Flüssigkeitseinschlüssen in Kluftquarzen (STALDER et al., 1980, MULLIS, 1983) erwiesen sich die hydrothermalen Lösungen als CO_2-arm (weniger als 2 Mol. %) und relativ salzreich (vorwiegend NaCl). Die Reaktion der Lösungen mit dem Granit ergaben rings um die Zerr-

klüfte Auslaugungszonen in Dezimeter-, ausnahmsweise in Meter-Breite (GO 1, 2, 3, 5). GO 4 stammt aus einer schlotförmigen Auslaugung von ca. 2 m Durchmesser, die nicht an eine Mineralkluft gebunden ist, mindestens nicht im Tunnelprofil. Einen besonderen Fall (GNT 2312) von hydrothermal verändertem Granit bildet eine überaus mächtige, schlotförmige Gesteinspartie, die im Tunnel 20 m weit durchfahren wurde (STALDER et al., 1980). Wir haben diesen Fall in unseren geochemischen Betrachtungen nicht berücksichtigt, aufgrund seiner besonderen Ausbildung, die zu stark von unserem Modell der Auslaugung um eine Zerrkluft abweicht. Die mineralogischen Veränderungen (siehe Tabelle 1) in dieser Zone folgen, mindestens qualitativ, den Tendenzen der Umwandlungen um die Zerrklüfte, die hier mit starkem Abbau von Quarz, Biotit und Albit und Neubildung von Adular und Laumontit verbunden sind. Die Umwandlungsbedingungen sollten ungefähr ähnlich sein wie in den anderen untersuchten Beispielen, anders hingegen der Entstehungsmechanismus (starke Fluid-Durchströmung entlang einer alten (?), schwach tektonisierten Zone).

Tabelle 1 Zusammenstellung der Mineralogie für die untersuchten Beispiele.

Nr.	Mineralienabbau im veränderten Granit	Mineralienausscheidung im veränderten Granit	Kluftmineralien
GO1	Qz, Bi	Ad	Qz, Chl, Bi, Ep, Py
GO2	Qz, Bi, Chl	Qz, Ad, Ab	Qz, Cc, Chl, Ap, All, Tit
GO3	Qz, Chl	Ad, Ab, Hellg., Ap, Ep, Laumonit	Qz, Chl, Ep, Laumontit
GO4	Qz, Bi, Chl	Chl, Cc	-
GO5	Qz, Bi, K'feld.	Qz, Ab, Ep	Qz, Cc, Chl, Fl, Ap, Ep
GO6	Qz, Ab, Bi	Ad, Laumontit	-

Die Alterationszonen (Episyenit der französischen Literatur) sind charakterisiert durch eine intensive Ausbleichung und Vergrusung. Die Farbveränderung ist vorwiegend auf das Verschwinden von Biotit zurückzuführen. Auch der Quarzgehalt ist überall stark herabgesetzt, wogegen etwas Adular, Epidot und Chlorit, zuweilen auch Albit, in den veränderten Zonen neu ausgeschieden worden sind. In den Klufthohlräumen entstanden während und nach der Auslaugungsphase grössere Kluftmineralien, vorwiegend Quarz, Calcit, Chlorit, Titanit und Epidot (für die genaue Beschreibung verweisen wir auf STALDER et al., 1980).

4. Geochemie der hydrothermalen Veränderungen

4.1. ANALYTIK

Für die vorliegende Arbeit wurden fünf Beispiele von hydrothermaler Zersetzung geochemisch untersucht. Von jedem Vorkommen wurden je eine veränderte und eine unveränderte Granitprobe entnommen. Diese Art der Probennahme erlaubt keine Rückschlüsse auf die graduelle Veränderung des Gesteins. Aber die veränderte Probe repräsentiert das Endstadium des hydrothermalen Prozesses. Zusammen mit dem unveränderten Granit ergibt sich ein Vergleichspaar, das den maximalen Bereich der Veränderung abdeckt.

Die zehn Proben wurden mit der Röntgenfluoreszenz-Methode auf Haupt- und Spurenelemente hin analysiert. CO_2 wurde coulometrisch, FeO spektralphotometrisch, Li flammenphotometrisch, F mit einer ionenselektiven Elektrode bestimmt. H_2O wurde aus dem restlichen Glühverlust berechnet.

Die Resultate sind in Tabelle 2 zusammengestellt, in welcher auch die durchschnittlichen Fehler (*) für die jeweiligen Konzentrationsbereiche angegeben sind (* Standardabweichung der linearen Regression).

Bei den Spurenelementen ist zusätzlich die untere Nachweisbarkeitsgrenze angegeben.

4.2. ZUM PROBLEM DER ANALYSENVERGLEICHE

Die hydrothermalen Prozesse verursachen eine Veränderung des Raumgewichtes des Gesteins. Das hat zur Folge, dass die Analysenwerte (in Gewichtsprozenten) der veränderten und unveränderten Proben nicht direkt vergleichbar sind. Wir haben deshalb drei Normierungsmöglichkeiten getestet, nämlich Volumen-, Aluminium- und Natriumkonstanz.

An allen Proben wurde das Raumgewicht (Auftrieb in Wasser und in Quecksilber) bestimmt. Damit werden von der Gesteinschemie unabhängige Vergleiche ermöglicht. Die Berechnung der Aluminiumkonstanz bietet sich an, weil Aluminium sich weitgehend immobil verhält. Da Natrium sich nach EUGSTER und GUNTER, 1981, bei hydrothermalen Prozessen zu den festen Phasen inkompatibel verhält und deshalb in der Lösung verbleiben sollte, haben wir auch die Na-Konstanz getestet.

Die auf Konstanz korrigierten Konzentrationen wurden folgendermassen berechnet:

1. Für Volumenkonstanz

$$\frac{RG_V}{RG_{UV}} = F_{RG} \qquad i_V{}^* = i_V \cdot F_{RG}$$

2. Für Aluminium- und Natriumkonstanz

$$\frac{Al_{UV}}{Al_V} = F_{Al} \qquad i_V^* = i_V \cdot F_{Al}$$

resp.

$$\frac{Na_{UV}}{Na_V} = F_{Na} \qquad i_V^* = i_V \cdot F_{Na}$$

RG:	Raumgewicht
F_{RG}, F_{Al}, F_{Na}:	Normierungsfaktoren
UV:	unveränderte Probe
V:	veränderte Probe
V*:	normierte, veränderte Probe
i:	Konz. des Elementes i

Jede der drei Berechnungsarten führte zu verschiedenen Resultaten. Der direkte Vergleich ist in Figur 1 dargestellt.

Für jede Kluft und jedes Element dienten die mit Volumenkonstanz ermittelten Werte als Basis für die Darstellung der prozentualen Abweichung jener Werte, welche mit den andern beiden Methoden berechnet wurden. Aus der Figur 1 geht deutlich hervor, dass bei den ersten drei Proben die Aluminium- mit

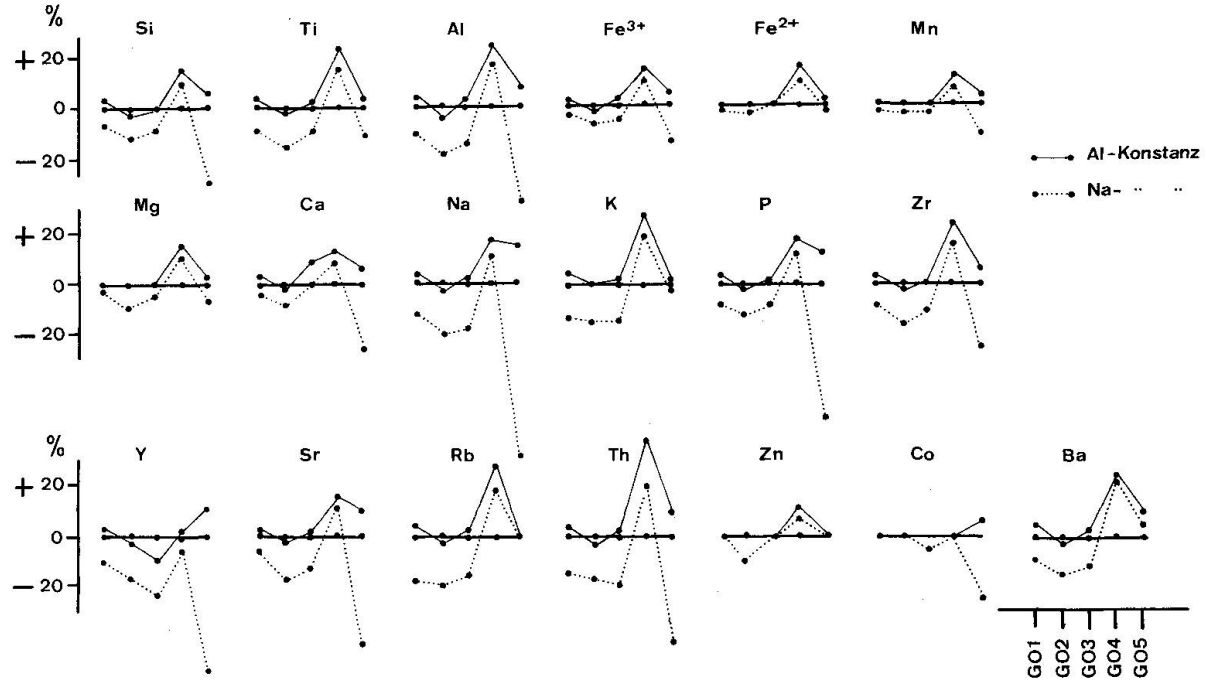

Fig. 1 Prozentuale Abweichung der mit Al-, resp. Na-Konstanz berechneten Werte von den mit Raumgewichtkonstanz ermittelten Werten für die fünf Probenpaare.

Tabelle 2 Chemische Analysen und Raumgewichte (RG in g/cm³) der fünf Probenpaare.

	G011	G012	G021	G022	G031	G032	G041	G042	G051	G052	Reg.Fehler (1σ in%)	
SIO2	70.09	64.12	71.63	66.72	73.65	64.60	72.97	63.47	75.23	73.43	± 0.60	
TIO2	0.41	0.51	0.33	0.41	0.17	0.17	0.16	0.19	0.16	0.06	± 0.01	
AI2O3	14.59	19.06	13.88	18.10	12.09	19.37	14.34	19.23	12.49	15.51	± 0.20	
FE2O3	1.82	0.57	0.85	0.53	0.77	0.55	0.83	0.61	0.99	0.50	± 0.20	
FEO	0.86	0.06	0.61	0.21	0.66	0.00	0.75	0.60	0.60	0.07		
MNO	0.06	0.01	0.03	0.01	0.05	0.01	0.05	0.03	0.05	0.02	± 0.01	
MGO	0.69	0.15	0.40	0.27	0.28	0.15	0.35	0.28	0.39	0.10	± 0.07	
CAO	2.32	1.41	1.23	0.70	1.12	1.10	1.31	0.91	1.31	1.14	± 0.04	
NA2O	3.79	5.75	3.63	5.60	3.28	6.27	3.95	5.75	3.58	8.24	± 0.08	
K2O	3.82	6.98	5.08	5.79	3.86	6.24	4.72	7.26	3.55	0.21	± 0.02	
P2O5	0.14	0.16	0.11	0.11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	± 0.01	
H2O+	0.57	0.46	0.79	0.47	3.83	0.32	0.49	0.43	0.57	0.27		
CO2	0.01	0.04	0.60	0.05	0.04	0.06	0.05	0.09	0.05	0.04		
TOTAL	99.17	99.28	99.17	98.97	99.85	98.89	100.02	98.90	99.02	99.68	± 0.70	
R.G.	2.71	2.01	2.65	2.07	2.64	1.63	2.66	1.48	2.66	1.95	(1σ in ppm)	Lower Det. Limits(ppm)
NB	19	21	18	22	16	20	20	26	21	14	± 3	3
ZR	226	249	173	216	129	141	115	149	126	109	± 5	4
Y	25	32	28	36	30	42	31	39	35	62	± 2	4
SR	262	212	91	118	112	140	124	114	110	161	± 5	4
U	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7		7
RB	154	325	153	233	143	263	212	316	146	2	± 5	4
TH	9	15	12	16	10	21	18	27	14	19	± 2	5
PB	<6	<6	<6	<6	<6	<6	23	17	<6	<6		6
GA	17	14	14	19	14	20	17	22	18	17	± 2	2
ZN	47	<4	33	22	31	<4	36	23	34	<4	± 3	4
CU	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7		7
NI	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7		7
CO	16	<6	12	<6	17	7	18	<6	31	21	± 3	6
CR	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		10
V	34	19	10	<4	9	7	12	15	9	<4	± 4	4
CE	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25		25
ND	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15		15
BA	927	1141	884	1018	597	792	785	988	500	77	± 20	2
LA	21	38	16	13	<12	21	21	32	<12	<12		12
SC	4	5	4	3	2	5	3	6	3	<1	± 1	1
F	592	333	344	455	279	268	670	278	636	98		
LI	15	4	12	10	16	6	29	15	21	4		

der Volumenkonstanz gut übereinstimmt; Natriumkonstanz weicht deutlich ab. Kluft fünf zeigt die gleiche Tendenz, jedoch mit grösserer Abweichung. Das aberrante Bild von Probe 4 ist sehr wahrscheinlich auf eine fehlerhafte Bestimmung des Raumgewichts zurückzuführen. Die Abweichungen der mit Na-Konstanz berechneten Werte zeigen, dass Na doch an den Austauschreaktionen teilgenommen hat. Darum eignet sich diese Normierung nicht.

Sowohl Volumen- wie auch Aluminiumkonstanz erweisen sich als für unsere Zwecke geeignete Berechnungsmethoden. Die Messung des Raumgewichts ist jedoch besonders für kleine Proben mit relativ grossen Fehlern verbunden (Beispiel Probe 4).

Um alle fünf Probepaare vergleichen zu können, haben wir uns entschieden, alle weiteren Berechnungen mit Aluminiumkonstanz durchzuführen, wobei uns durchaus bewusst ist, dass ein gewisser Anteil Aluminium mobilisiert und in der Kluft als aluminiumhaltige Mineralien (Chlorit, Epidot, Adular) auskristallisiert ist. Da Aluminium konstant gehalten wird, sind damit Aussagen über sein Verhalten in den hydrothermalen Lösungen nicht mehr möglich.

4.3. DIE AN- UND ABREICHERUNGSPROZESSE

In Tabelle 3 sind die Elementkonzentrationen der unveränderten (UV) und der normierten, veränderten (V*, Al-konstant) Probenpaare aufgelistet. Die Werte sind atomar in ppm angegeben. Die Differenz $\Delta = UV-V^*$ und der prozentuale Unterschied $\Delta\,\% = \Delta \cdot 100/UV$ präsentieren Anreicherung (negatives Vorzeichen), respektive Verarmung (positives Vorzeichen) der betreffenden Elemente bezüglich des unveränderten Granits. Die Elemente wurden unterteilt in vier Kategorien von Kationen. Diese Art von Klassierung ermöglicht durch die Reduktion der Anzahl der Variablen (gemessene Elemente) eine übersichtlichere Behandlung der hydrothermalen Veränderungen. Gleichzeitig werden die Ähnlichkeiten im geochemischen Verhalten der verschiedenen Elemente innerhalb einer bestimmten Gruppe betont und erlauben Voraussagen über nicht gemessene Elemente.

Wie von EUGSTER 1983 vorgeschlagen wurde, sind

BOC: bivalente, Oktaederplätze einnehmende Kationen, Grössen und Verhalten ähnlich wie Fe^{2+}: 0,77 Å (VI)

TOC: multivalente, Tetraeder- und Oktaederplätze einnehmende Kationen, Grössen und Verhalten ähnlich wie Fe^{3+}: 0,49 Å (IV), 0,65 Å (VI)

ALC: Kationen, welche fähig sind, Positionen von Alkalien einzunehmen

Um das Verhalten von Silicium und Phosphor (sowie S, B, Be) einer Kategorie zuzuordnen, haben wir die TEC eingeführt:

Tabelle 3 Zusammenstellung der Elementkonzentrationen (atomar in ppm) der unveränderten (UV) und der normierten veränderten (V*) Probenpaare, der absoluten (Δ = UV — V*) und der prozentualen (Δ%) Differenz.

		G01				G02				G03				G04				G05			
		UV	V*	Δ	Δ %	UV	V*	Δ	Δ %	UV	V*	Δ	Δ %	UV	V*	Δ	Δ %	UV	V*	Δ	Δ %
TEC	Si	327601	229400	98201	29.9	334799	239122	95677	28.6	344240	188456	155784	45.2	341062	221220	119841	35.1	351625	276327	75298	21.4
	P	611	524	87	12.5	480	349	131	23.3	218	131	87	37.6	218	175	44	25.4	218	305	-87	-45.0
	Σ	328212	229924			335279	239471			344458	188587			341280	221395			351843	276632		
ALC	Na	28118	32644	- 4526	-16.1	26931	31828	-4897	-18.3	24334	29008	-4674	-19.3	29305	31828	-2522	- 8.5	26560	49262	-22702	-85.3
	K	31714	44333	-12619	-39.9	42174	36861	5313	10.5	32046	32295	-249	- 0.9	39185	44914	-5728	-14.7	29472	1411	28061	95.2
	Ca	16581	10077	6504	53.5	8791	3850	4931	56.4	8005	4931	3073	38.7	9363	4860	4503	48.2	9363	6575	2787	29.9
	Rb	154	248	-94	-61.5	153	178	-25	-16.8	143	164	-21	-14.8	212	235	-23	-11.1	143	2	141	98.9
	Sr	262	162	100	38.1	91	90	1	0.6	112	87	25	22.0	124	85	39	31.4	110	129	-19	-17.9
	Ba	927	873	54	5.8	884	780	104	11.7	597	494	103	17.2	785	736	49	6.1	500	62	438	87.6
	Th	9	11	-2	-27.6	12	12	-	-2.2	10	13	-3	-31.0	18	20	-2	-11.8	14	15	-1	- 9.3
	Y	25	24	1	2.0	28	28	-	1.4	30	26	4	12.6	31	29	2	6.2	35	50	-15	-42.6
	F	592	255	337	56.9	345	349	-4	- 1.1	279	167	112	40.0	670	207	463	69.0	636	79	557	87.5
	Σ	78382	88627			79409	73976			65556	67185			79693	82914			66833	57586		
TOC	Al	77210	77210			73453	73453			63980	63980			75887	75887			66097	66097		
	Ti	2458	2338	120	4.8	1978	1858	120	4.7	1019	659	360	37.6	959	839	120	11.4	959	300	659	41.8
	Fe^{3+}	12729	3077	9652	76.0	5945	2868	3077	52.2	5385	2378	3007	55.4	5805	3147	2658	45.2	6924	2868	4057	58.5
	Zr	226	191	35	15.7	173	175	8	4.2	129	88	41	31.8	115	111	4	3.4	126	82	44	34.8
	Σ	92623	82816			81549	78344			70513	67105			82766	79984			74106	69347		
BOC	Li	15	3	12	80.0	12	8	4	33.3	16	4	12	75.0	29	11	18	62.1	21	3	18	85.0
	Mg	4161	663	3498	83.4	2412	1267	1146	48.2	1685	543	1146	66.6	2111	1267	844	40.3	2352	482	1870	79.3
	Fe^{2+}	6685	389	6296	94.7	4742	1244	3498	76.6	5130	1	5129	~100	5830	3498	2332	40.3	4664	466	4197	90.6
	Mn^{2+}	465	77	387	87.2	232	77	155	74.4	387	77	310	87.5	387	155	232	55.3	387	155	232	67.8
	Zn	47	0	47	~100	33	16	17	48.9	31	0	31	~100	36	17	19	52.4	34	0	34	~ 100
	Co	16	0	16	~100	12	0	12	~100	17	4	13	74.3	18	0	18	~100	31	20	11	32.5
	Σ	11389	1132			7443	2612			7270	629			8411	4948			7489	1126		

TEC: multivalente, Tetraederplätze einnehmende Kationen, mit Grösse und Verhalten ähnlich wie Si^{4+}: 0,26 Å (IV)

Die graphische Darstellung (Fig. 2) der prozentualen An- und Abreicherung (± Δ%) ermöglicht eine Visualisierung der Veränderung der einzelnen Elemente in den fünf untersuchten Fällen. Als Folgerungen drängen sich auf:

1. Alle jene Elemente, die ein positives Δ% aufweisen, müssen aus dem unveränderten Granit gelöst und wegtransportiert werden. Im Gegensatz dazu müssen die Elemente mit negativem Δ % dem veränderten Granit mit fluider Phase zugeführt werden.
2. Innerhalb einer bestimmten Gruppe verhalten sich die einzelnen Elemente ähnlich.
3. Die vier Gruppen unterscheiden sich in der Richtung und im Ausmass des Veränderungsprozesses deutlich voneinander.
   BOC: sehr starke Auslaugung
   TOC: deutlich schwächere Auslaugung
   ALC: schwankend zwischen Anreicherung und Verarmung
   TEC: mittlere Auslaugung
4. Die geochemischen Veränderungen erfolgen nicht bei allen fünf untersuchten Beispielen auf die gleiche Art. Probe GO 5 weicht in ihrem Verhalten deutlich von den vier anderen ab.

Wenn man nun die Summen der Elemente der einzelnen Kationengruppen für jedes Probenpaar miteinander vergleicht (Fig. 3), folgt:

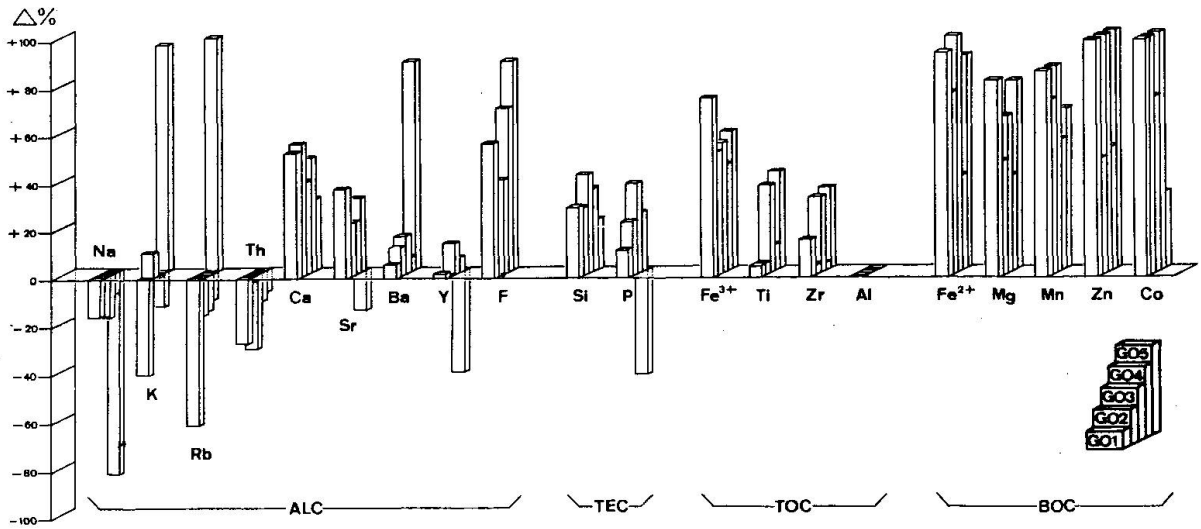

Fig. 2 Prozentuale Ab- (+), resp. Anreicherung (−) (Δ %) der Elemente für jedes Probenpaar, geordnet nach Kationengruppen, bei Al-Konstanz.

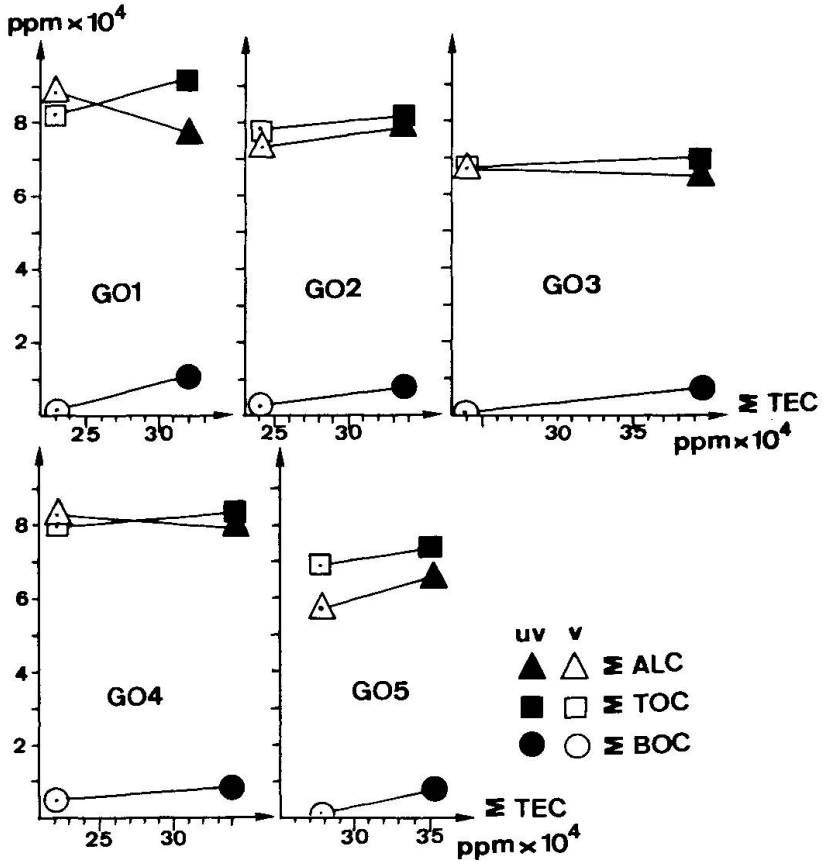

Fig. 3 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Summen der ALC, BOC und TOC bezüglich der Summe der TEC für jedes Probenpaar.

1. BOC, TOC und TEC werden *immer*, wenn auch in unterschiedlichen Mengen, gelöst und wegtransportiert.
2. ALC zeigen keine einheitliche Tendenz. Bei den Proben GO 1, GO 3 und GO 4 werden sie in den veränderten Proben angereichert, bei GO 2 und GO 5 zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten.

Um das Abweichen der ALC besser zu verstehen, werden die Konzentrationen der Elemente einzeln gegen die Summe der anderen drei Gruppen (BOC, TOC, TEC) aufgetragen (Fig. 4).

Daraus folgt:

1. Die Veränderungen der Elementkonzentrationen für die Probenpaare GO 1, GO 2, GO 3, GO 4 zeigen einen gleichmässigen Trend. Probe GO 5 hingegen zeigt ein vollständig anderes Bild.
2. Beim Vergleich der ersten vier Paare stellt man folgendes fest:
   a) Na, Rb und Th werden im veränderten Granit immer angereichert.
   b) K wird im veränderten Granit sowohl angereichert (Proben GO 1, GO 3 und GO 4) wie auch vermindert (Probe GO 2).

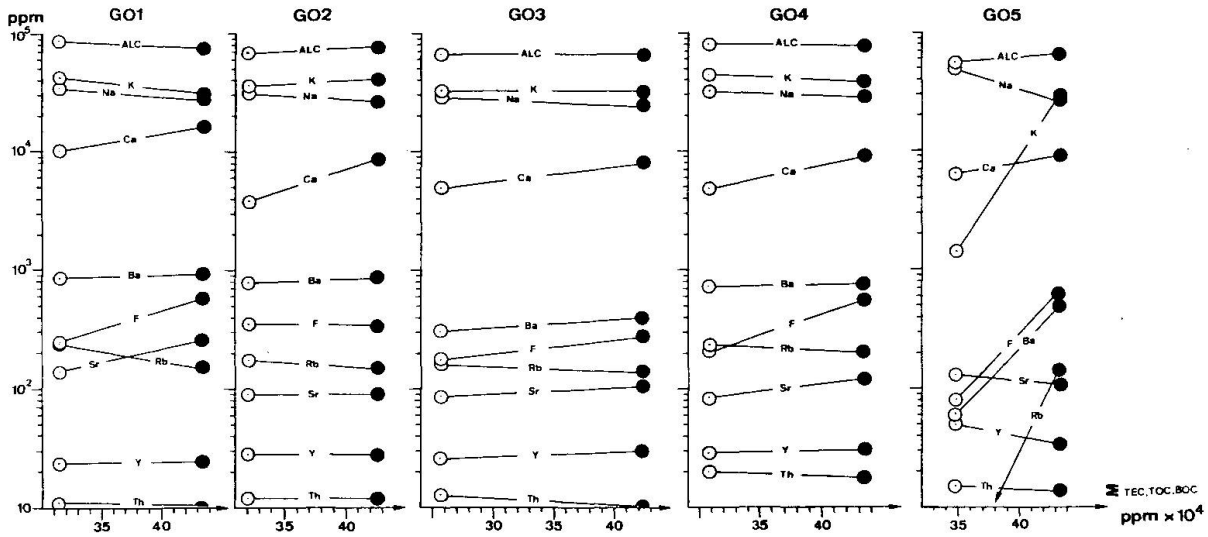

Fig. 4 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen der ALC-Gruppe bezüglich der Summe der TEC, TOC und BOC.

c) Ca, Ba, Sr, Y und F werden immer wegtransportiert.
d) Das Ausmass der Konzentrationsveränderung der einzelnen Elemente kann stark variieren.

Innerhalb der ALC sind zwei sich entgegengesetzt verhaltende Untergruppen festzustellen. Die interne Gruppierung der ALC entspricht ihrer Position im periodischen System. Während sich die Alkalien in den veränderten Graniten anreichern, werden die Erdalkalien aus ihnen weggeführt und verhalten sich somit ähnlich wie die BOC, TOC und TEC.

3. Probe GO 5 gehorcht den oben beschriebenen Tendenzen nicht mehr. Sowohl die Richtung des Transportes wie auch seine Intensität unterscheiden sich grundlegend.
   a) Na wird ebenfalls angereichert, jedoch in viel stärkerem Ausmass. In der gleichen Richtung bewegen sich auch Sr und Y, entgegengesetzt ihres Verhaltens in den Proben 1–4.
   b) K und Rb zeigen eine Inversion der Transportrichtung und verschwinden fast vollständig aus der veränderten Zone. Ebenfalls fast vollständig sind F und Ba wegtransportiert worden.

Es ist also möglich, die untersuchten Beispiele von hydrothermaler Zersetzung folgendermassen zu gliedern:

- Proben GO 1, GO 2, GO 3 und GO 4, welche unter ähnlichen physikochemischen Bedingungen verändert wurden. Diese Proben entsprechen dem «normalen» Prozess.
- Probe GO 5, bei der diese «normalen» Bedingungen nicht mehr gespielt haben. Die naheliegendste Erklärung dieser Abweichung ist eine lokale Variation der chemischen Zusammensetzung der zuerst eindringenden Lösung.

5. Diskussion

Die hydrothermale Veränderung des Granits kann wie folgt dargestellt werden:

Unveränderter Granit + Fluid 1 → veränderter Granit + Fluid 2

Auf die Mineralien bezogen lautet die gleiche Reaktion:

Qz + Plag + Bi + Erze + Fluid 1 → Ab + KF + Chl + Epi + Fluid 2

(Die Variation der Mineralchemie ist Gegenstand laufender Arbeiten. Diese sollten genauere Angaben über die einzelnen Mineralreaktionen erbringen.)

Die Fortsetzung des hydrothermalen Prozesses ist dann in den Zerrklüften zu finden:

Fluid 2 → Kluftmineralien + Fluid 3

Figur 5 zeigt schematisch diese Prozesse:

1. Eindringen des Fluid 1 in den leicht verschieferten Granit entlang dünner Spalten. Fluid 1 darf mit dem Granit nicht chemisch equilibriert sein.
2. Bildung von Mikrorissen im noch unveränderten Granit in unmittelbarer Nähe der sich öffnenden Zerrkluft (als Folge tektonischer Spannungen oder «Hydrofracturing»).
3. Zirkulation des Fluid 1 durch die Mikrorisse, welche zur Auslaugung des Granits führt. Bei der Reaktion von Fluid 1 mit dem sich zersetzenden Gestein bildet sich Fluid 2.
4. Die Zerrkluft öffnet sich weiter; Fluid 2 füllt den Hohlraum, und ein Teil der in Fluid 2 gelösten Stoffe kristallisieren zu Kluftmineralien aus.
5. Nach der Auskristallisation der Kluftmineralien aus Fluid 2 bleibt eine Restlösung (zum Teil in Flüssigkeitseinschlüssen konserviert) übrig. Diese Restlösung bezeichnen wir als Fluid 3.

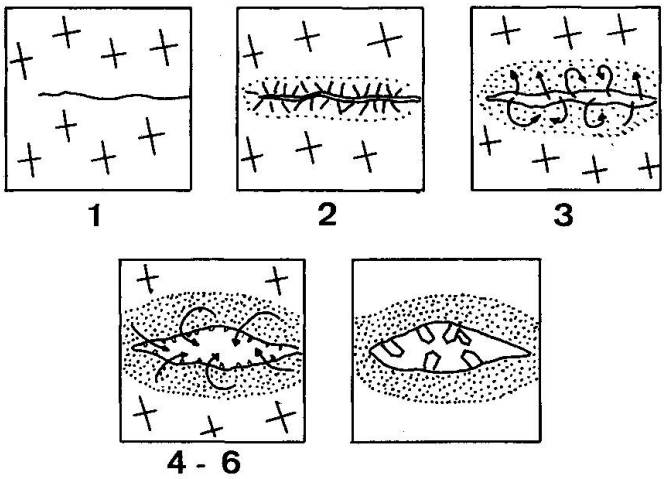

Fig. 5 Schematische Darstellung der hydrothermalen Veränderung und der Kluftbildung. Erläuterungen im Text.

6. Da sich das Wachstum der Kluftmineralien über lange Zeit hin erstreckt (Millionen von Jahren), ist es denkbar, dass Fluid 3 wieder im Granit zirkuliert. Daraus könnte sich eine konvektive Zelle entwickeln, welche über längere Zeit ohne neuen Fluidzufluss von aussen funktionieren kann (Bsp. EUGSTER und CHOU, 1979).
7. Es ist nicht notwendig, dass sich gleichzeitig mit der hydrothermalen Zersetzung eine Zerrkluft bildet. Probe GO 4 ist eine solche Situation, denn im Tunnelquerschnitt wurde keine Kluft, sondern nur veränderter Granit angefahren.

Das System Granit–Fluid kann:
- immer vollständig offen bleiben; d.h. Fluid 1 wird ständig zugeführt, verdünnt dabei kontinuierlich Fluid 2, welches dann die hydrothermal veränderte Zone wieder verlässt;
- nach der Injektion einer bestimmten Menge Fluid 1 vollkommen geschlossen bleiben und eine Konvektionszelle bilden;
- in einer ersten Phase offen sein (Eindringen von Fluid 1). Es folgt die Auslaugungsphase im geschlossenen System, und nach dem Auskristallisieren der Kluftmineralien können dann Restlösungen wieder offen zirkulieren.

Bei konstanter Granitchemie sind die Zusammensetzungen des Fluid 2, des veränderten Granits und der Kluftmineralien hauptsächlich eine Funktion des eindringenden Fluid 1.

Die ähnliche tektonische Lage (± senkrecht zur alpidischen Schieferung) der fünf untersuchten Beispiele (ausgenommen Beispiel GO 4, wo keine Zerrkluft vorhanden ist) deutet auf ein gleichzeitiges Öffnen (gleiches Stressfeld) des Spaltensystems hin, und deshalb kann angenommen werden, dass innerhalb des die Proben umfassenden Gesteinskörpers die PT-Bedingungen zur Zeit des Beginns der hydrothermalen Prozesse gleich waren (400 °C, 3 kb, FREY et al., 1976). Das System Gestein–Fluid evoluierte retrograd von der Grünschieferfazies bis in die Zeolithfazies (Bildung von Laumontit und Stilbit im zersetzten Granit und in der Kluft).

Die wichtigste Randbedingung für Fluid 1 ist sein chemisches Ungleichgewicht mit dem Granit, da sonst keine Reaktion stattfinden würde. Dies bedingt, dass die Lösung vor der Reaktion nicht lange Zeit mit dem Gestein im Kontakt war, sondern dass sie während der Spaltenöffnung schnell von aussen eingedrungen sein muss.

Als zentrales Problem für die Interpretation der hydrothermalen Veränderung bleibt die Frage nach der Menge und der Zusammensetzung der mit dem Granit in Kontakt gekommenen ersten Lösung.

Angaben über die minimale Zusammensetzung des Fluid 1 bekommt man nur für jene Elemente, welche im veränderten Granit angereichert wurden (fast

ausnahmslos Alkalien). In Tabelle 3, unter Δ, sind diese Elemente mit einem Minuszeichen gekennzeichnet. Die Absolutwerte stellen die minimale Menge der im veränderten Granit zur Auskristallisation von Albit und K-Feldspat benötigten Kationen aus dem Fluid 1 dar. Über die Konzentrationen der anderen Elemente sind für das Fluid 1 keine Angaben möglich.

Umgekehrt liegen die Probleme für Fluid 2. Die in Tabelle 3 unter Δ mit positiven Vorzeichen angegebenen Werte stellen die minimale, zur Ausbalancierung des Konzentrationsgefälles innerhalb der Probenpaare erforderliche Zusammensetzung des Fluid 2 dar.

Diese Messwerte, gepaart mit geeigneten Modellen, sollten eine wesentlich bessere Charakterisierung der beiden Fluids und des Reaktionsverlaufes ermöglichen. Für vollständige Angaben fehlen uns jedoch noch grundlegende Daten über pH der Lösungen, Totalchlorinität (pCl), Art der Komplexe der verschiedenen Metallkationen in der Lösung (Hydroxi-, Chlorid-Komplexe), Grad der Dissoziation dieser Komplexe, Gleichgewichtskonstanten der einzelnen Mineralauflösungsreaktionen. Versuche um quantitative Aussagen über die Lösungszusammensetzungen zu erhalten, scheitern immer an der fehlenden Kenntnis dieser Parameter.

Trotzdem versuchen wir, einige qualitative Überlegungen anzustellen:

- Alkalien (Na, K, Rb) sind bezüglich dem Granit im Fluid 1 übersättigt. Fluid 1 ist also mit grosser Wahrscheinlichkeit eine Alkalichlorid-Lösung, wie es häufig bei metamorphen Fluids der Fall ist. Überschlagsrechnungen mit den Daten von Tabelle 2 zeigen, dass sich die Konzentrationen von NaCl und KCl durchaus im Rahmen von bekannten metamorphen Fluids (z. B. Daten aus Flüssigkeitseinschlüssen) bewegen (EUGSTER, 1981; POTY et al., 1974).
- Mit Ausnahme von Probe GO 5 stellt sich das Gleichgewicht zwischen Granit und Fluid für die Alkalien rasch ein. Dies erklärt die geringe prozentuale An- respektive Abreicherung.
- Alle anderen Elemente scheinen hingegen in Fluid 1 untersättigt zu sein. Die TOC, TEC und die Erdalkalien zeigen eine schwächere Untersättigung als die BOC, welche fast quantitativ weggeführt werden. Im veränderten Granit werden also keine Mineralien neugebildet, welche diese Kationen in grösseren Mengen einbauen.
- Die sehr starke Verarmung an K, Ba und Rb in Probe GO 5 wird eindeutig vom Verschwinden des K-Feldspates aus der veränderten Zone verursacht. Entsprechend zeigt die Anreicherung an Na und Sr die Neubildung von Albit an.
- Fluor wird in allen Proben abgereichert, wobei die Abreicherung in Probe GO 5 sehr viel stärker ist als in den «normalen» Fällen. Diese starke Abreicherung ist mineralogisch schwierig zu erklären. Als fluorhaltige Mineralien im Granit treten Biotit und Apatit auf. Da BOC und TOC (mit Biotit als Hauptlieferant dieser Kationen) sich sehr ähnlich wie in Proben 1–4 verhal-

ten, kann man annehmen, dass Biotit in allen Proben in gleichem Masse abgebaut wird. Dies hätte eine «normale» Fluorabreicherung zur Folge. Normativer Apatit wird in Probe GO 5V sogar angereichert. Folglich sollte auch Fluor angereichert werden. Im weiteren ist bekannt, dass Fluor bei Fluid-Festkörperreaktionen eine ausgeprägte Tendenz aufweist, in die festen Phasen eingebaut zu werden (MUNOZ und EUGSTER, 1969).
Das «anomale» Verhalten von GO 5 könnte mit einer wesentlichen Änderung des HF-Gehalts in Fluid 1 erklärt werden. Als Folge der starken Fluorverarmung des veränderten Granits bildete sich in der Kluft 5 Fluorit.

- Das Auskristallisieren der Kluftmineralien aus Fluid 2 führt zur Entstehung von Fluid 3. Flüssigkeitseinschlüsseanalysen an Kluftquarzen (STALDER, 1980, POTY et al., 1974) zeigen, dass Fluid 3 im wesentlichen wiederum eine schwach konzentrierte Alkalichloridlösung ist.

Die Stofftransportphänomene bei der hydrothermalen Veränderung des Zentralen Aaregranits sind schematisch in Figur 6 dargestellt.

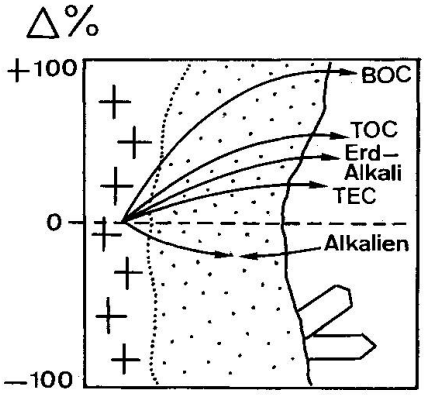

Fig. 6 Schematische Darstellung der Richtung und Intensität des Transports der einzelnen Kationengruppen bei der hydrothermalen Veränderung von Granit um eine alpine Zerrkluft.

Verdankung

Wir danken Ruth Mäder für die Fluor-Bestimmungen und Christine Paust für die Reinschrift des Manuskripts.

Literaturverzeichnis

EUGSTER, H.P. (1981): Metamorphic solutions and reactions. In: chemistry and geochemistry of solutions at high temperatures and pressures. (Rickard and Wickman ed.) Physics and Chemistry of the earth, Vol. 13-14, p. 461-507, Pergamon Press.

EUGSTER, H.P. (1983): Granites and hydrothermal ore deposits. In press (Min. Mag., March 1985).

EUGSTER, H.P. and CHOU, I-MING (1979): A model for the deposition of cornwall-type magnetite deposits: Econ. Geol. 74, p. 763–774.

EUGSTER, H.P. and GUNTER, W.D. (1981): The compositions of supercritical metamorphic solutions. Bull. Minéral. 104, p. 817–826.

FREY, M., JAEGER, E. und NIGGLI, E. (1976): Gesteinsmetamorphose im Bereich der Geotraverse Basel–Chiasso, SMPM 56, p. 649–659.

MULLIS, J. (1983): Einschlüsse in Quarzkristallen der Schweizer Alpen und ihre mineralogisch- geologische Bedeutung. Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. 72 (1/2), p. 5–19.

MUNOZ, J.C. and EUGSTER, H.P. (1969): Experimental Control of fluorine reactions in hydrothermal systems. Am. Min. 54, p. 943–959.

POTY, B.P., STALDER, H.A. und WEISBROD, A.M. (1974): Fluid Inclusions studies in Quartz from Fissures of Western and Central Alps, Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 54, 2/3, p. 717–752.

STALDER et al. (1980): Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels N2, Repof AG, Gurtnellen.

WÜTHRICH, H. (1965): Rb-Sr-Altersbestimmungen am alpin überprägten Aarmassiv. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 45, p. 875–971.

Manuskript eingegangen: 22. Mai 1984.