

**FLUIDENTWICKLUNG UND SKAPOLITHBILDUNG
IN METAMORPHEN GESTEINEN DER SAUALPE**

von

Johann. G. Raith⁺ und Heinz Högelsberger⁺⁺

(eingelangt am 22. 6. 1994, angenommen am 8. 7. 1994)

Zusammenfassung

Im Bereich der höher metamorphen Anteile des Saualpenkristallins treten massive Skapolithgesteine als konkordante Einschaltungen in metaklastischen amphibolitfaziellen Gesteinen auf. Hinsichtlich der Mineralvergesellschaftung und der Mineralchemie lassen sich zwei Typen, eine Ca-ärmere metapelitische (Skapolith, Quarz, Epidot/Klinozoisit, Granat, Biotit, Kalzit, Rutil) und eine Ca-reichere kalksilikatische Paragenese (Skapolith, Aktinolith/Tremolit, Titanit) unterscheiden. Skapolithe der kalksilikatischen Paragenese sind durch höhere Cl-Gehalte ($X_{Cl} = 0,37 - 0,42$) von der metapelitischen ($X_{Cl} = 0,16 - 0,28$) zu unterscheiden. Die berechneten NaCl-Gehalte des damit koexistierenden Fluids sind damit ebenfalls unterschiedlich (X_{NaCl} Fluid Metapelite: 0,13 - 0,18; Kalksilikate 0,31 - 0,38). Alle Skapolithe sind Mischglieder der Marialith-Mejonit bzw. Marialith-Mizzonit-Reihe und zeigen innerhalb der beiden Gruppen sehr homogene Zusammensetzung. Die Kristallisation von Skapolith erfolgte syndeformativ bzw. syn- bis spätmetamorph im Bezug auf die eoalpidische Deformation und amphibolitfazielle Metamorphose.

⁺ Dr. Johann G. Raith
Institut für Geowissenschaften
Montanuniversität Leoben
A-8700 Leoben

⁺⁺ Dr. Heinz Högelsberger
Greenpeace Österreich
Auenbruggergasse 2
A-1030 Wien

Mehrere Typen von Flüssigkeitseinschlüssen kommen als meist sekundäre Einschlüsse in Quarz vor. CO₂-dominierte (max. 14 Mol % CH₄) ergeben recht unterschiedliche Dichten. Einschlüsse höherer Dichte (bis 1,13) dominieren in Skapolith-Quarzgesteinen, während solche niedrigerer Dichte (ca. 0,7 - 1,0) vor allem in jüngeren, skapolithfreien diskordanten Quarzgängen auftreten. Neben CO₂-reichen sind auch unter- und übersättigte H₂O-Salz Einschlüsse zu beobachten. Ihre Homogenisierungstemperaturen liegen zwischen 170 und 210° C. Die Salzgehalte der übersättigten Einschlüsse variieren zwischen 31-38 Gew. % NaCl-Äquiv.

Die Skapolithfelse werden als metamorph-metasomatische Gesteine gedeutet. Ihre Bildung erfolgte durch Zufuhr Na- und Cl-reicher, höchstwahrscheinlich retrograder, metamorpher Fluide im Zuge der eoalpidischen Metamorphose.

Einleitung

Skapolith, ein Tektosilikat mit der allgemeinen Formel X₄Y₁₂O₂₄Z (X = Ca, Na, K; Y = Al,Si; Z = CO₃, SO₄, Cl; SHAW, 1960) ist eines der wenigen metamorphen Minerale, das in größeren Mengen volatile Komponenten, wie Cl, CO₂ oder sulfatischen Schwefel, in seine Struktur einbauen kann. Diese Eigenschaft und die damit verbundene chemische Variabilität machen es zu einem geeigneten Studienobjekt, um Fragen der Art und Zusammensetzung der fluiden Phase, die bei der Bildung dieses Minerals herrschten, zu studieren. In Kombination mit Flüssigkeitseinschluß-Untersuchungen können somit wichtige Informationen über die Zusammensetzung der fluiden Phase, die während der Metamorphose wirksam ist, gewonnen werden.

Skapolithgesteine sind mehrfach aus dem Gebiet der Saualpe beschrieben worden (MEIXNER, 1940, 1952, 1953, 1968; CLAR et al. 1963, WEISSENBACH, 1963; KLEINSCHMIDT, 1970; WENINGER, 1976). Folgende Fundpunkte werden in der Literatur genannt: Grafenzeche bei St.Oswald, Gstettihütte, Beilsteingraben bei Lading, Breitofnerhütte, Gertrusk/Kaiserofen, Jakobpaulischwaig (E Gertrusk), Hüttenberger Erzberg, Andreaskreuz N des Hüttenberger Erzberges, S von Mosinz, Kirche St. Leonhard, Grube Käthe bei St.Leonhard, Krastal bei Griffen, Untergreutschach bei Griffen. Von den genannten Fundpunkten konnte trotz intensiver Suchtätigkeit nur mehr geeignetes Material von den Lokalitäten Grafenzeche und Gstettihütte aufgesammelt und untersucht werden. Die Ergebnisse der mikroskopischen, mineralchemischen und Flüssigkeitseinschluß-Untersuchungen werden nachfolgend kurz dargestellt und die Genese dieser ungewöhnlichen Gesteine wird diskutiert.

Geologische Situation

Die beiden genannten Vorkommen sind an den zentralen, höher metamorphen Anteil des Saualpenkristallins gebunden, der von schwächer metamorphen, ordovizisch-devonischen vulkano-sedimentären und Glimmerschieferreichen

Serien abgetrennt werden kann (PILGER & SCHÖNENBERG, 1975). Dieser ca. 4000 m mächtige Zentralabschnitt wird aus einer Abfolge von metapelitischen Gesteinen (Disthen-Flasergneise, Disthen-Stauroolith Schiefergneise, Zweiglimmergneise) aufgebaut, in die z.T. mächtige Eklogitkörper (z.B. Gertrusk, Kupplerbrunn) und untergeordnet auch Amphibolite, Marmore und Kalksilikatgesteine eingeschaltet sind (PILGER & SCHÖNENBERG, 1975).

In Analogie zu vergleichbaren kristallinen Serien im Bereich der Koralpe (FRANK et al., 1983), ist auch für diese Gesteine eine polymetamorphe Entwicklung angenommen bzw. bestätigt worden (THÖNI & JAGOUTZ, 1992). Für das prägende eklogit- und amphibolitfazielle Metamorphoseereignis konnte erst kürzlich ein altpaläozoisches Alter nachgewiesen werden (THÖNI & JAGOUTZ, 1992). Die P-T-Bedingungen der Eklogitbildung werden mit 580 - 630° C, 18 Kbar (MILLER, 1990) angegeben. Für die altpaläozoische amphibolitfazielle Überprägung werden ähnliche Temperaturen, aber wesentlich geringere Drucke (ca. 5 Kbar) abgeleitet.

Die Skapolith-Nebengesteine im Raum Grafenzeche sind üblicherweise Metapelite. Lokal sind geringmächtige Einschaltungen von Kalksilikatgesteinen und Pegmatoiden im Schichtverband anzutreffen. Die zum Großteil massiven Skapolith-Quarz-Gesteine können meist nur mehr als Rollstücke aufgesammelt werden. Lediglich von einem Fundpunkt, ca. 300 m oberhalb der Hauptfundstelle am Güterweg zur Grafenzeche, stehen die Skapolithgesteine im Schichtverband an. Eine wenige cm bis dm-mächtige und über 2 m verfolgbare Skapolith-Quarzlinse ist parallel zur Schieferung der benachbarten Biotit-Muskowit-Granatschiefer eingeregelt. Diese massiven Skapolithfelse stehen im unmittelbaren Kontakt mit geringmächtigen Pegmatoiden. In größeren Rollstücken ist eine deutliche Einregelung der oft bis zu 10 cm langen stengeligen Skapolithkristalle und eine Wechsellagerung Quarz-Granat-Biotit-Chlorit- und Skapolith-dominierter Lagen feststellbar.

Petrographie

Aufgrund der Mineralzusammensetzung lassen sich zwei Typen von Skapolithgesteinen unterscheiden (Tab. 1). Der häufigste Typ sind Skapolithgesteine in Assoziation mit Ca-führenden Metapeliten. In diesen ist Skapolith immer mit Quarz und häufig mit Granat, Biotit, Epidot/Klinozoisit, Kalzit und Chlorit vergesellschaftet. Plagioklas ist selten. Rutil ist das wichtigste Ti-Mineral. Sekundär tritt in diesen Proben stets Muskowit auf; dieser bildet Säume um ehemals sub- bis euhedrale Skapolithkristalle oder kommt entlang von Spaltrissen vor.

Die beobachtbaren poikiloblastischen Texturen belegen eine späte metamorph-metasomatische Bildung dieser Skapolithe. Große Skapolithe, die zur Ausbildung euhedralear Kristallgestalt tendieren, überwachsen eine ältere Paragenese bestehend aus Granat-Biotit-Epidot/Klinozoisit. Eine jüngere Klinozoisitgeneration bildet Säume um ältere Kerne, bzw. tritt gemeinsam mit Chlorit und Calcit

als Zwickelmineral auf. Eine besondere Textur stellen graphische Verwachsungen von Skapolith und Quarz dar. Dabei bildet Quarz unregelmäßige, wurmförmige, myrmekitähnliche Einwachsungen in Skapolith.

Der zweite Typ von Skapolithgesteinen ist mit Ca-reicheren Kalksilikatmineralen vergesellschaftet. Es handelt sich ebenfalls um massige, überwiegend aus langen stengeligen Skapolithen aufgebaute Gesteine, wobei diese Skapolithkristalle analog zur vorigen Gruppe Einregelung zeigen und oft euhedrale Kristallgestalt besitzen. Petrographisch ist diese Probe (SK 6562) durch das Fehlen von Quarz und das häufige Auftreten von Aktinolith/Tremolit und Kalzit gekennzeichnet. Die dominierende Ti-Phase ist Titanit, der z.T. einen mittels BSE-Verteilungsbildern nachweisbaren, chemisch komplexen Zonarbau zeigt. Die in der ersten Gruppe so häufig beobachtbare sekundäre Muskowitisierung fehlt in dieser Probe.

Probe	Skp	Qu	Plg	Kal	Chl	Mus	Sonstige
SK6562	+++		+	++			Trem, Tit
SK2	+++	+++		+	++	++	Rut
SK11	+++	+++	+	+	+	+	Gt, Bio
SK13	+++	++		++		++	
SK16	+++	+++		++	+	++	
SK20A	+++	++	+	++	++	++	Kz
SK20B	+++	+		+	++	+	Gt, Bio, Kz
SK20-1	+++	+++			+	++	Gt, Bio, Kz

Tab. 1: Petrographische Zusammensetzung der Skapolithgesteine von der Saualpe. SK 6562 eine kalksilikatische Paragenese, restliche Proben Ca-ärmere metapelitische Paragenesen. Skp = Skapolith, Qu = Quarz, Plg = Plagioklas, Kal = Calcit, Chl = Chlorit, Mus = Muskowit, Trem = Aktinolith/Tremolit, Tit = Titanit, Rut = Rutil, Gt = Granat, Bio = Biotit, Kz Epidot/Klinozoisit. +++ Hauptgemengteil, ++ Nebengemengteil, + Akzessorien.

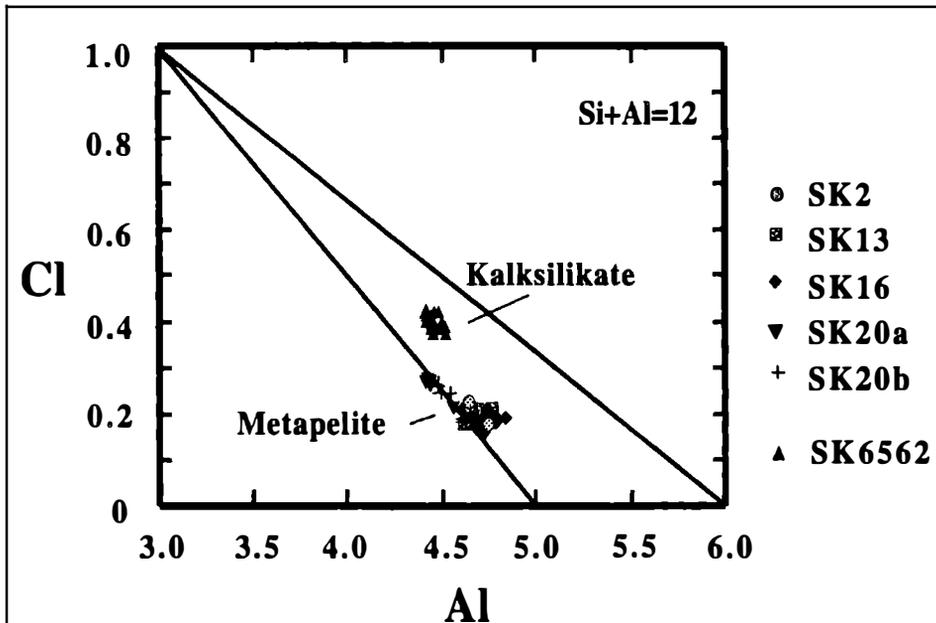


Abb. 1: Zusammensetzung der Skapolithe im Al-Cl-Diagramm. Linien geben die Mischungsreihe Marialith-Mizzonit bzw. Marialith-Mejonit an.

Mineralchemische Zusammensetzung von Skapolith

Mittels Elektronen-Mikrosonde (ETH-Zürich; University of Edinburgh) wurde die Zusammensetzung von Skapolithen dieser beiden unterschiedlichen Paragenesen bestimmt (Abb. 1). Eine Auswahl repräsentativer Proben ist in Tab. 2 aufgelistet. Wie aus diesen Analysen ersichtlich ist, handelt es sich bei den Skapolithen generell um SO_3 -freie, Cl-führende Glieder der Mischungsreihe Marialith-Mizzonit bzw. Marialith-Mejonit, wobei die Kalksilikat-Paragenese durch wesentlich höhere Cl-Gehalte gekennzeichnet ist. X_{Cl} ($X_{\text{Cl}} = 1 - X_{\text{CO}_2} - X_{\text{SO}_3}$) variiert in den metapelitischen Proben zwischen 0,17 und 0,28, in der kalksilikatischen Probe zwischen 0,38 und 0,42. Die Variation des Mineralchemismus kann im wesentlichen als Austauschreaktion von CaNa_{-1} mit $\text{CO}_2\text{Cl}_{-1}$ (Marialith-Mejonit) und untergeordnet von NaSi_{-1} mit CaAl_{-1} (Mizzonit-Mejonit) formuliert werden. Plagioklas, der nur selten (z.B. als Einschlußmineral in Quarz) mit Skapolith anzutreffen ist, ist immer An-ärmer als koexistierender Skapolith. Dies geht auch aus den in Tab. 2 angegebenen Anorthit-Äquivalent-Werten ($\text{EqAn} = (\text{Al}-3)/3$) von Skapolith, die direkt mit dem Anorthitgehalt von Plagioklas (X_{An}) verglichen werden können, hervor. Innerhalb einer Probe bzw. auch innerhalb der beiden Gruppen sind die Skapolithe auffällig homogen zusammengesetzt. Auch Zonarbau ist nicht nachweisbar.

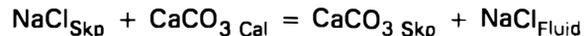
Skapolith	SK6562/8	SK6562/11	SK20B 2/4	SK20B 3/3	SK20A 1/2	SK16/2	SK16/5
SiO ₂	50,53	50,62	49,09	50,06	50,59	49,05	48,50
TiO ₂	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01
Cr ₂ O ₃	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	25,31	25,20	26,00	25,21	24,92	26,08	26,49
FeO	0,01	0,05	0,13	0,06	0,04	0,07	0,11
MnO	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,07
MgO	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
CaO	13,62	13,65	16,10	14,64	14,28	14,54	15,31
Na ₂ O	5,37	5,29	3,87	5,16	4,75	5,26	4,47
K ₂ O	0,74	0,72	0,60	0,55	0,77	0,36	0,61
Cl	1,68	1,49	0,73	1,03	1,11	0,85	0,67
SO ₃	0,01	0,03	0,00	0,02	0,04		
CO ₂	3,11	3,36	4,47	3,98	3,88	3,81	4,04
Summe	100,43	100,51	101,07	100,76	100,45	100,08	100,28
Si	7,546	7,562	7,388	7,531	7,593	7,377	7,300
Ti	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,003	0,001
Cr	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	4,454	4,438	4,612	4,469	4,407	4,623	4,700
Fe ²⁺	0,002	0,005	0,015	0,007	0,005	0,009	0,014
Mn	0,000	0,005	0,005	0,002	0,005	0,004	0,009
Mg	0,007	0,007	0,002	0,005	0,002	0,000	0,000
Ca	2,179	2,185	2,597	2,358	2,297	2,340	2,469
Na	1,556	1,532	1,130	1,505	1,381	1,530	1,304
K	0,141	0,137	0,115	0,105	0,147	0,068	0,118
Cl	0,424	0,377	0,185	0,262	0,284	0,217	0,017
S	0,000	0,002	0,000	0,002	0,005	0,000	0,000
CO ₂	0,576	0,620	0,815	0,735	0,711	0,783	0,830
X _{Al}	0,371	0,370	0,384	0,372	0,367	0,385	0,392
X _{Meonit}	0,562	0,567	0,676	0,594	0,601	0,605	0,654
Ca + Na + K	3,876	3,845	3,841	3,968	3,825	3,945	3,892
Eq _{An}	0,485	0,479	0,537	0,490	0,469	0,541	0,567

Tab. 2: Repräsentative Mineralanalysen von Skapolith und koexistierendem Plagioklas. Skapolith berechnet auf der Basis von Si + Al = 12 und Cl + CO₂ + SO₃ = 1; Plagioklas berechnet auf 8 Sauerstoffe pro Formel-

SK13/2	SK13/5	SK2/8	SK2/10	Plagioklas	SK20A 3/1	SK20A 3/2
48,68	48,72	48,88	48,25	SiO ₂	61,50	60,44
0,00	0,01	0,03	0,02	TiO ₂	0,01	0,01
0,00	0,00	0,00	0,00	Cr ₂ O ₃	0,02	0,02
26,61	26,42	26,16	26,76	Al ₂ O ₃	23,62	24,21
0,02	0,02	0,04	0,06	FeO	0,02	0,01
0,05	0,03	0,05	0,03	MnO	0,00	0,01
0,00	0,00	0,00	0,00	MgO	0,00	0,00
15,05	14,61	13,88	15,34	CaO	5,57	6,17
4,93	5,22	5,58	4,05	Na ₂ O	8,32	8,10
0,29	0,29	0,34	0,52	K ₂ O	0,39	0,20
0,73	0,83	0,88	0,68	Cl	0,00	0,00
				SO ₃	0,00	0,00
3,98	3,85	3,77	4,02			
100,34	100,00	99,61	99,73	Summe	99,45	99,17
7,297	7,321	7,358	7,257	Si	2,747	2,711
0,000	0,001	0,003	0,002	Ti	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	Cr	0,001	0,001
4,702	4,679	4,642	4,743	Al	1,244	1,280
0,003	0,003	0,005	0,008	Fe ²⁺	0,001	0,000
0,006	0,004	0,007	0,004	Mn	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	Mg	0,000	0,000
2,418	2,353	2,239	2,471	Ca	0,267	0,297
1,434	1,522	1,628	1,312	Na	0,721	0,704
0,055	0,056	0,065	0,100	K	0,022	0,011
0,186	0,210	0,225	0,174	Cl	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	S	0,000	0,000
0,813	0,790	0,775	0,826			
0,392	0,390	0,387	0,395	Ab	0,714	0,696
0,628	0,607	0,579	0,653	Or	0,022	0,011
3,907	3,930	3,930	3,883	An	0,264	0,293
0,567	0,560	0,547	0,581	X _{An}	0,264	0,293

Tab. 2 (Fortsetzung): einheit. SK 6562 Kalksilikat-Paragenese; restliche Proben Ca-reiche Metapelite. na = nicht analysiert. $X_{Me|pnit} = Ca/(Ca + Na + K)$; $EqAn = (Al-3)/3$.

Die Reaktion zwischen Skapolith in Koexistenz mit Calcit und einem Fluid kann folgendermaßen formuliert werden:



Unter Verwendung der von ELLIS (1978) für 750° C und 4 Kbar kalibrierten Daten, kann über die von ihm angegebene Beziehung $\ln_{\text{KD}} = -0,028 (X_{\text{Al Skp}})^{5,58}$ das X_{NaCl} der fluiden Phase berechnet werden. Für die Skapolithe aus der kalksilikatischen Paragenese variieren die X_{NaCl} -Werte zwischen 0,31 und 0,38. Die metapelitischen Proben ergeben deutlich geringere berechnete Fluidsalinitäten von 0,13 bis 0,18 X_{NaCl} .

Untersuchungen von Flüssigkeitseinschlüssen

Flüssigkeitseinschlüsse wurden in mehreren Skapolith-führenden (SK 2, 10, 12, 15, 17) und -freien Proben (SK 8) gefunden und mittels eines Linkam-Heiz-Kühltisches (Institut für Mineralogie und Kristallographie, Universität Wien) mikrothermometrisch untersucht. Das Wirtsmineral der Einschlüsse ist stets Quarz. Alle Einschlüsse sind sekundären Ursprungs und wurden entlang von verheilten Mikrorissen gebildet.

Mehrere Einschlußtypen, deren Charakteristika in Tab. 3 und Abb. 2 zusammengefaßt sind, können unterschieden werden. (a) In allen Proben treten < 5 bis 25 μm große, bei Raumtemperatur ein- oder zweiphasige CO_2 -Einschlüsse auf. Aufgrund der Schmelztemperaturen (T_m), die zwischen -59,2 und -56,9° C liegen, sind diese im wesentlichen als CO_2 , mit geringen Beimengungen von CH_4 (< 14 Mol. %) oder N_2 zu bestimmen. Die Homogenisierungstemperaturen ($=T_h$; V+L zu L) variieren zwischen -44,5 und +25,6° C (Abb. 2; Tab. 3), was berechneten Dichten von 0,7 bis 1,13 (HOLLOWAY, 1981) entspricht. Es ist auffällig, daß Einschlüsse höhere Dichte nur in skapolithführenden Proben vorkommen, während solche geringere Dichte in jüngeren, skapolithfreien Quarzgängen (SK 8) dominieren; letztere sind auch aus strukturellen Gründen - diese Gänge liegen diskordant zur Schieferung - als jüngere Quarzgeneration zu identifizieren.

(b) Neben CO_2 -reichen Einschlüssen treten außerdem in mehreren Proben sekundäre, wäßrige H_2O -Salz-Einschlüsse auf. Sowohl zweiphasige (L + V), als auch dreiphasige (L + V + Halit) Einschlüsse kommen vor. Die Homogenisierungstemperaturen (V + L zu L) liegen zwischen 155 und 215° C. Für die dreiphasigen Einschlüsse liegen die Auflösungstemperaturen des Halits (T_s) bei ca. 300° C, was berechneten Salzgehalten von etwas 36 Gew. % NaCl-Äquivalent entspricht. Lediglich in der skapolithfreien Probe SK 8 sind saline H_2O - CO_2 -Einschlüsse zu finden. Diese bis zu 50 μm großen herrlichen Einschlüsse sind bei Raumtemperatur vierphasig (H_2O_L - CO_{2L} - CO_{2V} -Halit). Sie geben ähnliche T_h -Werte, aber niedrigere Salzgehalte (31 Gew. % NaCl-Äquivalent) als die dreiphasigen Einschlüsse. Die Detailergebnisse der mikrothermometrischen Messungen sind Tab. 3 zu entnehmen.

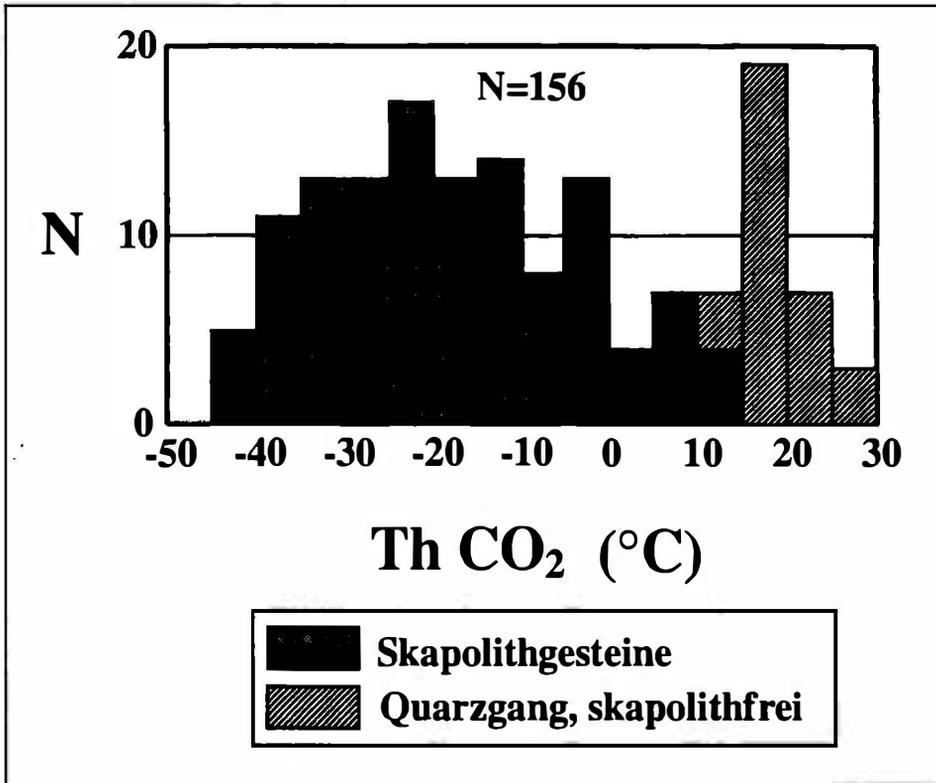


Abb.2: Histogramm der Homogenisierungstemperaturen von CO₂-Einschlüssen. Die beiden Häufigkeitsmaxima sind einerseits Skapolith-führenden, andererseits Skapolith-freien Proben zuzuschreiben.

Die Entstehung der Skapolithgesteine

Skapolith ist ein Mineral, das nur unter P-T-Bedingungen des metamorphen bzw. magmatischen Bereiches gebildet wird. Mit Hinblick auf das Auftreten in magmatischen Gesteinen sind Skapolithe in SiO₂-untersättigten Vulkaniten (BOIVIN & CAMUS, 1981) aber auch als Assimilationsprodukte in Vulkaniten (z.B. Vesuv, EVANS et al., 1969) beschrieben worden. Häufiger entsteht Skapolith allerdings im Zuge metamorpher Prozesse. Er ist ein häufiges Mineral des kontaktmetamorphen-metasomatischen Bereiches (magmatogene Skarne), wo er gemeinsam mit anderen Kalksilikat-Mineralen typischerweise im Mittel- bis Hochtemperaturbereich um einen Intrusionskontakt gebildet wird (HOVER GRANATH et al., 1983).

Im hochgradig metamorphen Milieu kann Skapolith ein wichtiges Mineral in kalksilikatischen Granuliten (MOECHER & ESSENE, 1990; HARLEY & BUIK,

1992), Metaanorthositen, aber auch Xenolithen (LOVERING & WHITE, 1969; JONES et al., 1983; STOLZ, 1987) sein und somit wichtige Informationen über die P-T-t-Entwicklung und die Fluidaktivität der unteren Kruste und z.T. des oberen Mantels liefern. In diesen Gesteinen dominieren zumeist (sulfatführende) Mejonite.

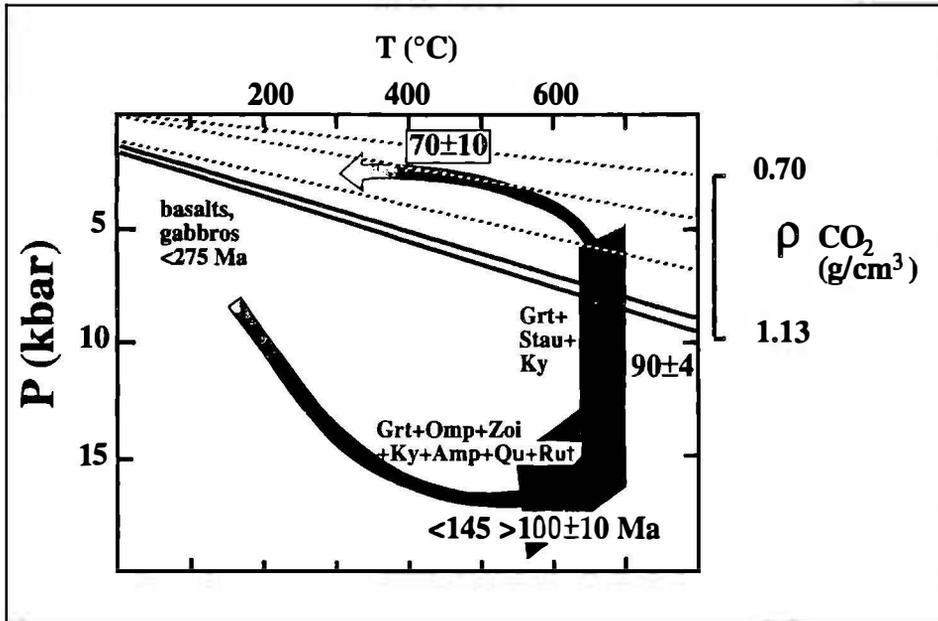


Abb. 3: P-T-t-Entwicklungspfad für metamorphe Gesteine der Saualpe und Abschätzung der P-T-Bedingungen des eklogit- bzw. amphibolitfaziellen Metamorphoseereignisses (THÖNI & JAGOUTZ, 1992; MILLER, 1990). Isochoren von CO₂-Einschlüssen zeigen, daß Einschlüsse mit höherer Dichte (schwarze Linien) synmetamorph im Bezug auf die amphibolitfazielle Metamorphose gebildet sein könnten und solche mit niedriger Dichte (strichlierte Linien) mit Sicherheit während der retrograden Abkühlung eingeschlossen worden sind. Berechnung der Isochoren nach HOLLOWAY (1981).

Skapolithe sind auch aus dem Bereich der Grünschiefer- und Amphibolitfazies bekannt. Diese bei niedrigeren Temperaturen gebildeten Skapolithe sind in fast allen Fällen Cl-führend, da Cl-freie Skapolithe unterhalb von 550° C nicht mehr stabil sind (OTTERDOM & WENK, 1983). Innerhalb dieser Gruppe sind regional-metamorphe Skapolithgesteine, für deren Entstehung isochemische Metamorphose aus Evaporiten diskutiert wird, von besonderem Interesse. Charakteristisch für diese Gesteine ist ihre stratiforme Ausbildung und die Vergellschaftung von Cl-reichem Skapolith mit anderen für Metaevaporite typischen Mineralen

wie Turmalin, Anhydrit, Lazulith usw. (WHITE, 1959; RAMSEY & DAVIDSON, 1970; SERDYUCHENKO, 1975; KWAK, 1977; MORA & VALLEY, 1989). Auch scheelitführende Skapolith-Kalksilikatgesteine, wie etwa aus der Bunten Serie des Moldanubikums beschrieben (BERAN et al., 1985), könnten eventuell in diese Gruppe einzuordnen sein. Skapolithbildung im Zuge allochemischer metasomatischer Prozesse wird von VANKO & BISHOP (1982) diskutiert; auch hier werden die großen Mengen an Cl-reichen wässrigen Fluiden, die für die Alteration des Humboldt-Lopolithes benötigt werden, von Evaporiten abgeleitet.

Für die Skapolithe aus dem Saualpenkristallin wurde folgende Genese diskutiert: MEIXNER (1952) erklärt die Skapolithbildung auf der Grafenzeche durch SiO_2 -Zufuhr und Verdrängung einer geringmächtigen Marmorlinse. Eine zeitliche Zuordnung wird nicht gegeben. Ebenfalls metasomatische Prozesse, die allerdings im Zusammenhang mit einer "pegmatitischen Durchtränkung" gesehen werden und die der variszischen Metamorphose zugeordnet werden, wurde von KLEINSCHMIDT (1970) für die Bildung der Skapolithe von Untergrutschach/Griffen diskutiert.

Folgende von uns gemachten Beobachtungen sprechen für eine allochemische metamorph-metasomatische Bildung im Zuge der eoalpidischen Metamorphose:

1. **Texturelle Beziehungen:** Skapolith ist parallel zur dominierenden Schieferung der Nebengesteine eingeregelt. Wesentlich ist auch die Beobachtung, daß er eine metapelitische Paragenese (Granat-Biotit usw.) poikiloblastisch überwächst und ein ausgezeichnet spätmetamorph kristallisiertes Gefüge aufweist.
2. **Chemische Homogenität:** Alle untersuchten Skapolithe sind chemisch ausgesprochen homogen und Hinweise auf eine reliktsche ältere Generation konnten nirgends gefunden werden. Skapolith ist also offensichtlich im Zuge eines einphasigen Prozesses gebildet worden.
3. **Altersdatierungen:** Unter Berücksichtigung neuer Altersdaten, die ein weiträumiges eoalpidisches Metamorphoseereignis belegen (THÖNI & JAGOUTZ, 1992) muß die amphibolitfazielle Metamorphose und damit auch die Skapolithbildung, als eoalpidisch eingestuft werden.

Wie die X_{NaCl} -Abschätzungen des Fluids zeigen, sind für die Bildung der Skapolithe auf der Saualpe erhöhte Na- und Cl-Gehalte des Fluids notwendig. Mögliche theoretische Quellen solcher Fluide können einerseits internen (Evaporite), andererseits externen (zugeführte, salinare magmatische oder metamorphe Wässer) Ursprungs sein. Der Geländebefund, die spätmetamorphe Kristallisation von Skapolith und die Mineralparagenese machen eine evaporitische, aber auch eine magmatische (Pegmatite, Granite) Herkunft unwahrscheinlich. Metamorphe Prozesse sind die wahrscheinlichste Fluid-Quelle. Vor allem retrograde Mineralreaktionen, bei denen H_2O selektiv in Minerale eingebaut wird, können zu einem Anstieg der Salinität des Restfluids führen (CRAWFORD et al., 1979). Die in der Saualpe weit verbreitete retrograde Amphibolitisierung

der Eklogite kann ebenfalls nur mit entsprechender Fluidzufuhr vor sich gegangen sein. Es ist daher denkbar, daß sich spätmetamorphe, saline Restfluide im Zuge der eoalpidischen Metamorphose gebildet haben, die dann Ca-reiche Lithologien (Ca-reiche Metapelite, Marmore und Kalksilikatgesteine) skapolithisiert haben.

Diese metamorphen Fluide dürfen allerdings keineswegs als rein wäßrige Fluide aufgefaßt werden. Flüssigkeitseinschlüsse belegen die weite Verbreitung von CO_2 . Die variable Dichte dieser Einschlüsse zeigt, daß CO_2 über einen weiten P-T-Bereich der Metamorphose vorhanden war und eingeschlossen wurde. Die Isochoren der Einschlüsse mit der höchsten Dichte ($1,13 \text{ gcm}^{-3}$) zeigen einen Anstieg im P-T-Feld (Abb. 3), der in etwa die P-T-Box der amphibolitfaziellen Metamorphose schneidet; die Einschlüsse könnten also während dieses Ereignisses gebildet worden sein. Die CO_2 -Einschlüsse geringerer Dichte (Probe SK 8; ca. $0,7\text{-}1,0 \text{ gcm}^{-3}$) müssen im Zuge der späten retrograden Abkühlung eingeschlossen worden sein. Das Auftreten von CO_2 und $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ in getrennten Einschlüssen kann am einfachsten mit Entmischung erklärt werden.

Schlußfolgerungen

1. Die Skapolithe von der Grafenzeche und der Gstettihütte sind SO_3 -freie, Cl-führende Mischglieder der Marialith-Mejonit bzw. Marialith-Mizzonit-Reihe. Skapolith aus einer Ca-reicheren Kalksilikat-Paragenese ist von solchen aus Ca-ärmeren metapelitischen Paragenesen durch höhere Cl-Gehalte und damit durch höhere X_{NaCl} -Gehalte des ehemals koexistierenden Fluids, zu unterscheiden.
2. Mehrere Typen von CO_2 -hältigen und wäßrigen, sowie gemischten CO_2 - H_2O -Salz-Einschlüssen sind nachweisbar. Alle Einschlüsse werden als Reste metamorpher Fluide angesehen. CO_2 -Einschlüsse sind über einen weiten P-T-Bereich hinweg entstanden.
3. Die Skapolithgesteine der Saualpe repräsentieren metamorph-metasomatisch gebildete Gesteine, die durch die Reaktion Cl-reicher metamorpher Fluide mit Ca-reichen Lithologien entstanden sind. Sie bildeten sich synbis postmetamorph im Zuge der eoalpidischen, amphibolitfaziellen Metamorphose des Saualpenkristallins.

Danksagung

Diese Arbeit ist als Vortrag anlässlich des 2. Österreichischen Fluid-Info Treffens, das am 4. und 5. November 1993 in Leoben abgehalten wurde, präsentiert worden. Für die Hilfe bei der EMS-Analytik einiger Proben, durchgeführt an der ETH Zürich, sei R. Abart herzlichst gedankt. Dem Department of Geology and Geophysics, University of Edinburgh, sei für die Möglichkeit der Benützung der Mikrosonde unser Dank ausgesprochen. Abschließend möchten die Autoren Familie Lampersberger aus Eberstein im schönen Görtschitztal für ihre Gastfreundschaft und die logistische Unterstützung bei der (teilweise gefahrenvollen) Geländearbeit herzlichst danken.

Probe	CO ₂ -reiche Einschlüsse				Untersättigte wäßrige Einschlüsse				Übersättigte FI	
	Th(V+L=L)	n	Tm	n	Th(V+L=L)	n	Th(V+L=L)	n	Ts(L+S=S)	n
SK2	-19,3 ⇔ +14,8	26	-58,5 ⇔ -59,5	4	176 ⇔ 216	5	262	1	275	1
SK10	-36,4 ⇔ +5,0	28			168 ⇔ 184	8				
SK12	-44,4 ⇔ +20,0	42	-56,9 ⇔ -58,1	15	188 ⇔ 207	2	155 ⇔ 165	2	296 ⇔ 300	2
SK17	-44,5 ⇔ +9,3	34	-59,2 ⇔ -59,7	2						
SK8	+10,3 ⇔ +25,6	24					193 ⇔ 214	8	188 ⇔ 198	8

Tab. 3: Zusammenfassung der mikrothermometrischen Meßergebnisse an Flüssigkeitseinschlüssen der Proben SK 10, 12, 17. Werte in ° C; n = Anzahl der Messungen.

Literatur

- BERAN, A., GÖD, R., GÖTZINGER, M., ZEMANN, J. (1985): A scheelite mineralization in calc-silicate rocks of the Moldanubicum (Bohemian Massif) in Austria. - Mineral. Deposita, 20, 16 - 22.
- BOIVIN, P., CAMUS, G. (1981): Igneous scapolite-bearing associations in the Chaîne des Puys, Massif Central (France) and Atakor (Hoggar, Algeria). - Contrib. Mineral. Petrol., 77, 365 - 375.
- CLAR, E. FRITSCH, W., MEIXNER, H., PILGER, A., SCHÖNENBERG, R. (1963): Die geologische Neuaufnahme des Saualpen-Krisallins (Kärnten), VI. - Carinthia II, 73 (153), 23 - 51.
- CRAWFORD, M.L., FILER, J., WOOD, C. (1979): Saline fluid inclusions associated with retrograde metamorphism. - Bull. Mineral., 102, 562 - 568.
- ELLIS, D.E. (1978): Stability and phase equilibria of chloride and carbonate-bearing scapolites at 750° C and 4000 bar. - Geochim. Cosmochim. Acta, 42, 1271 - 1281.
- EVANS, B.W., SHAW, D.S., HAUGHTON, D.R. (1969): Scapolite stoichiometry. - Contrib. Mineral. Petrol., 24, 293 - 305.
- FRANK, W., ESTERLUS, M., FREY, I., JUNG, G., KROHE, A., WEBER, J. (1983): Die Entwicklungsgeschichte von Stub- und Koralpenkristallin und die Beziehung zum Grazer Paläozoikum. - Jahresber. 1982, Hochschulschwerpunkt S15, 263 - 292.
- HARLEY, S.L., BUICK, I.S. (1992): Wollastonite-scapolite assemblages as indicators of granulite pressure-temperature-fluid histories: The Rauer Group, East Antarctica. - J. Petrol., 33, 693 - 305.
- HOLLOWAY, J.R. (1981): Compositions and volumes of supercritical fluids in the earth's crust. In: Hollister, L.S., Crawford, M.L. (eds.): Short course in fluid inclusions: Applications to petrology. - Mineralogical Association of Canada, 6, 13 - 36.
- HOVER GRANATH, V.C., PAPIKE, J.J., LABOTKA, T.C. (1983): The North Peak contact metamorphic aureole, Utah: Petrology of the Big Horse Limestone Member of the Orr Formation. - Geol. Soc. Amer. Bull., 94, 889 - 906.
- JONES, A.P., SMITH, J.V., DAWSON, J.B., HANSEN, E.C. (1983): Metamorphism, partial melting, and K-metasomatism of garnet-scapolite-kyanite granulite xenoliths from Lashaine, Tanzania. - J. Geol., 91, 143 - 165.
- KLEINSCHMIDT, G. (1970): Schwarzer Skapolith von Untergreutschach bei Griffen, Saualpe (Kärnten). - Karinthin, 63, 168 - 198.
- KWAK, T.A.P. (1977): Scapolite compositional change in a metamorphic gradient and its bearing on the identification of meta-evaporite sequences. - Geol. Mag., 144, 343 - 354.
- LOVERING, J.F., WHITE, A.J.R. (1969): Granulitic and eclogitic inclusions from basic pipes at Delegate, Australia. - Contrib. Mineral. Petrol., 21, 9 - 52.
- MEIXNER, H. (1940): Neue Mineralfunde aus der Ostmark. - Carinthia II, 50 (130), 59 - 74.
- MEIXNER, H. (1952): Neue Mineralfunde in den österreichischen Alpen XII. - Carinthia II, 62, (142), 27 - 46.

- MEIXNER, H. (1953): Klassische und neuere Mineralvorkommen im Eklogitbereich der Saualpe. - Carinthia II, 63 (143), 132 - 139.
- MEIXNER, H. (1968): Neue Mineralfunde in den österreichischen Alpen XXII. - Carinthia II, 78 (158), 96 - 115.
- MILLER, C. (1990): Petrology of the type locality eclogites from the Koralpe and Saualpe (Eastern Alps), Austria. - Schweiz.Mineral.Petrogr.Mitt., 70, 287 - 300.
- MOECHER, D.P., ESSENE, E.J. (1990): Phase equilibria for calcic scapolite, and implications of variable Al-Si disorder for P-T, T-X_{CO2}, and a-X relations. - J. Petrol., 31, 997 - 1024.
- MORA, C.I., VALLEY, J.W. (1989): Halogen-rich scapolite and biotite: Implications for metamorphic fluid-rock interaction. - Amer. Mineral. 74, 721 - 737.
- OTERDOOM, W.H., WENK, H.-R. (1983): Ordering and composition of scapolite: field observations and structural interpretations. - Contrib.Mineral.Petrol., 83, 330 - 341.
- PILGER, A., SCHÖNENBERG, R. (1975): Geologie der Saualpe. - Clausthaler Geol. Abh. Sdbd., 1.
- RAMSAY, C.R., DAVIDSON, L.R. (1970): The origin of scapolite in regionally metamorphosed rocks of Mary Kathleen, Queensland, Australia. - Contrib. Mineral. Petrol., 25, 41 - 51.
- SERDYUCHENKO, D.P. (1975): Some Precambrian scapolite-bearing rocks evolved from evaporites. - Lithos, 8, 1 - 7.
- SHAW, D.M. (1960): The geochemistry of scapolite. - J. Petrol., 1, 218 - 260.
- STOLZ, A.J. (1987): Fluid activity in the lower crust and upper mantle: mineralogical evidence bearing on the origin of amphibole and scapolite in ultramafic and mafic granulite xenoliths. - Min. Mag., 51, 719 - 732.
- THÖNI, M., JAGOUTZ, E. (1992): Some new aspects of dating eclogites in orogenic belts: Sm-Nd, Rb-Sr, and Pb-Pb isotopic results from the Austroalpine Saualpe and Koralpe type-locality (Carinthia/Styria, southeastern Austria). - Geochim. Cosmochim. Acta, 56, 347 - 368.
- VANKO, D.A., BISHOP, F.C. (1982): Occurrence and origin of marialitic scapolite in the Humboldt Lopolith, NW. Nevada. - Contrib.Mineral.Petrol., 81, 277 - 289.
- WEISSENBACH, N. (1963): Die geologische Neuaufnahme des Saualpenkristallins (Kärnten). - Carinthia, 73 (153), 5 - 23.
- WENINGER, H. (1976): Mineralfundstellen in Steiermark und Kärnten. - Christian Weise-Verlag (München).
- WHITE, A.J.R. (1959): Scapolite-bearing marbles and calc-silicate rocks from Tungkillo and Millendella, South Australia. - Geol. Mag., 96, 285 - 307.