

PETROGRAPHIE UND MINERALCHEMIE VON BETAFITEN
AUS DEM POLLESTAL (ZENTRALES ÖTZTAL, TIROL)

von

Patrick Gasteiger, Peter Tropper, Udo Haefeker & Richard Tessadri

Institut für Mineralogie und Petrographie
Universität Innsbruck, Innrain 52f, 6020 Innsbruck, Österreich

Abstract

In the central part of the Ötztal (Polles valley) metacarbonate lenses occur surrounded by metabasites and granitic rocks. These metacarbonates contain the following polymetamorphic mineral assemblage: diopside + tremolite + phlogopite + apatite + pyrite + calcite + dolomite. In one of the samples a vein occurs which contains the following mineral assemblage: diopside + tremolite + phlogopite + apatite + titanite + geikelite + Zr, and Nb-bearing accessory phases (zirconolite + zircon + Nb-bearing phase). Microprobe analysis revealed that the Nb-bearing phase betafite, which is part of the pyrochlor group $(\text{Ca},\text{U})_2(\text{Ti},\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6(\text{OH})$, occurs in this vein. According to the new pyrochlore nomenclature by ATENCIO et al. (2010) and in conjunction with micro-Raman investigations concerning the OH-content of the mineral it could be classified as an oxycalcibetafit with a high uranium content and no, or only very low amounts of OH in its structure.

Zusammenfassung

Im zentralen Bereich des Ötztales (Pollestal) treten Metakarbonatlinsen umgeben von Metabasiten und granitischen Gesteinen auf. Die Metakarbonate weisen folgende Paragenese auf: Diopsid + Tremolit + Phlogopit + Apatit + Pyrit + Geikelit + Kalzit + Dolomit. Eine Probe wird von einer Ader durchzogen die folgende Paragenese enthält: Diopsid + Tremolit + Phlogopit + Apatit + Titanit + Geikelit + Zr-, und Nb-Phasen (Zirkonolith + Zirkon + Nb-hältige Phase). Mikrosondenanalysen ließen auf das Nb-hältige Mineral Betafit, welches Teil der Pyrochlorgruppe $(\text{Ca},\text{U})_2(\text{Ti},\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6(\text{OH})$ ist. Nach der neuen Klassifikation der Pyrochlorgruppe von ATENCIO et al. (2010) als Oxycalcibetafit mit einem hohen Urangehalt klassifiziert werden kann. Mittels Mikro-Raman Spektroskopie wurde festgestellt, dass dieser Betafit keine bzw. nur sehr geringe Mengen an OH in seiner Struktur enthält.

1. Einleitung

Ziel dieser Untersuchungen war es, Metakarbonate aus dem zentralen Bereich des Ötztal-Stubai Kristallins (Pollestal) petrographisch als auch mineralchemisch zu beschreiben. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die seltenen auftretenden Zr- bzw. Nb-hältigen Akzessorien in den Metakarbonaten gelegt. Die von PURTSCHELLER & TESSADRI (1985) und KOZLIK (2011) abgeschlossenen Untersuchungen dienten hierbei als Grundlage. Die Metakarbonate aus dem Pollestal treten als Linsen umgeben von Granitgneis auf und haben eine komplexe polymetamorphe Geschichte erlebt (KOZLIK, 2011). Durch die dominierende variszische Metamorphose sind die Karbonate eklogitfaziell überprägt worden (KOZLIK, 2011). Wie schon von PURTSCHELLER & TESSADRI (1985) beschrieben wurde, treten in den Metakarbonaten aus dem Pollestal die seltenen Zr-hältigen Minerale Zirkonolith ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$) und Baddeleyit (ZrO_2) auf. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde mittels Elektronenstrahlmikrosonde und Mikro-Raman-Spektroskopie ein Augenmerk auf REE-hältige Minerale in einer Probe (PT 38-2) gelegt.

2. Geographischer Überblick

Die untersuchte Probe stammt aus dem Pollestal, ein Seitental des Ötztals (Bezirk Imst/Nordtirol). Das Pollestal zweigt ab der Ortschaft Huben bei Längenfeld in Richtung SSW ab und hat eine Länge von ca. 9 km. Begrenzt wird das Tal im Osten durch den Rettenbachferner sowie dem Skigebiet von Hochsölden und im Westen grenzt das Pitztal an.

3. Geologischer Überblick

Das Pollestal befindet sich im zentralen Ötztal Komplex (ÖC) welcher in den Ostalpen liegt und einen Teil des westlichen Austroalpinen Deckenstapels darstellt.

Lithologisch besteht der ÖC hauptsächlich aus polymetamorphen Basementgesteinen mit amphibolitfaziell (ca. 500-600°C und 4-8 kbar) metamorph geprägten mittel- bis feinklastischen Metasedimenten, Orthogneisen und Amphiboliten. Im ÖC kann man drei weitere auflagernde Einheiten unterscheiden (Abb. 1) nämlich das Brenner Mesozoikum, die Steinacher Decke, die Blaser Decke und die Matscher Decke. Mindestens drei Metamorphoseereignisse lassen sich im ÖC unterscheiden die jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt sind (Abb. 1) nämlich die Ordovizische Metamorphose, die Variszische Metamorphose (Karbon) und die eo-Alpine Metamorphose (Oberkreide).

Die Unterscheidung dieser Metamorphoseereignisse basiert hauptsächlich auf der Anzahl der im Gestein nachweisbaren Stadien des Mineralwachstums. Die Ordovizische Metamorphose ist durch die lokale Bildung von Migmatiten charakterisiert. Diese treten z.B. am Reschenpass (SCHWEIGL, 1995), im Winnebachsee-Gebiet (HOINKES, 1973, KLÖTZLI-CHOWANETZ et al., 1997, THÖNY et al., 2008) und im Verpeiltal (BERNHARD, 1994) auf. Es gibt von diesen Migmatiten nur wenige P-T Daten, die auf eine T-betonte Metamorphose von 670-750°C und Drucken von < 2.8 kbar (THÖNY et al., 2008) oder > 4 kbar (HOINKES, 1973) hinweisen. Während die Ordovizische Metamorphose nur sehr lokal begrenzt auftritt, ist die Variszische Metamorphose die dominante prä-Alpidische Metamorphose (HOINKES & THÖNI, 1993). Die Metamorphosebedingungen werden mit 500-650°C und 4-8 kbar angegeben (HOINKES & THÖNI, 1993, TROPPER & HOINKES, 1996, TROPPER & RECHEIS, 2003).

Von besonderer Bedeutung ist das Auftreten von Eklogiten im zentralen ÖC welche eine frühvariszische Hochdruckmetamorphose anzeigen. Die eklogitfaziellen Bedingungen werden mit < 730°C und < 27 kbar angegeben (MILLER & THÖNI, 1995).

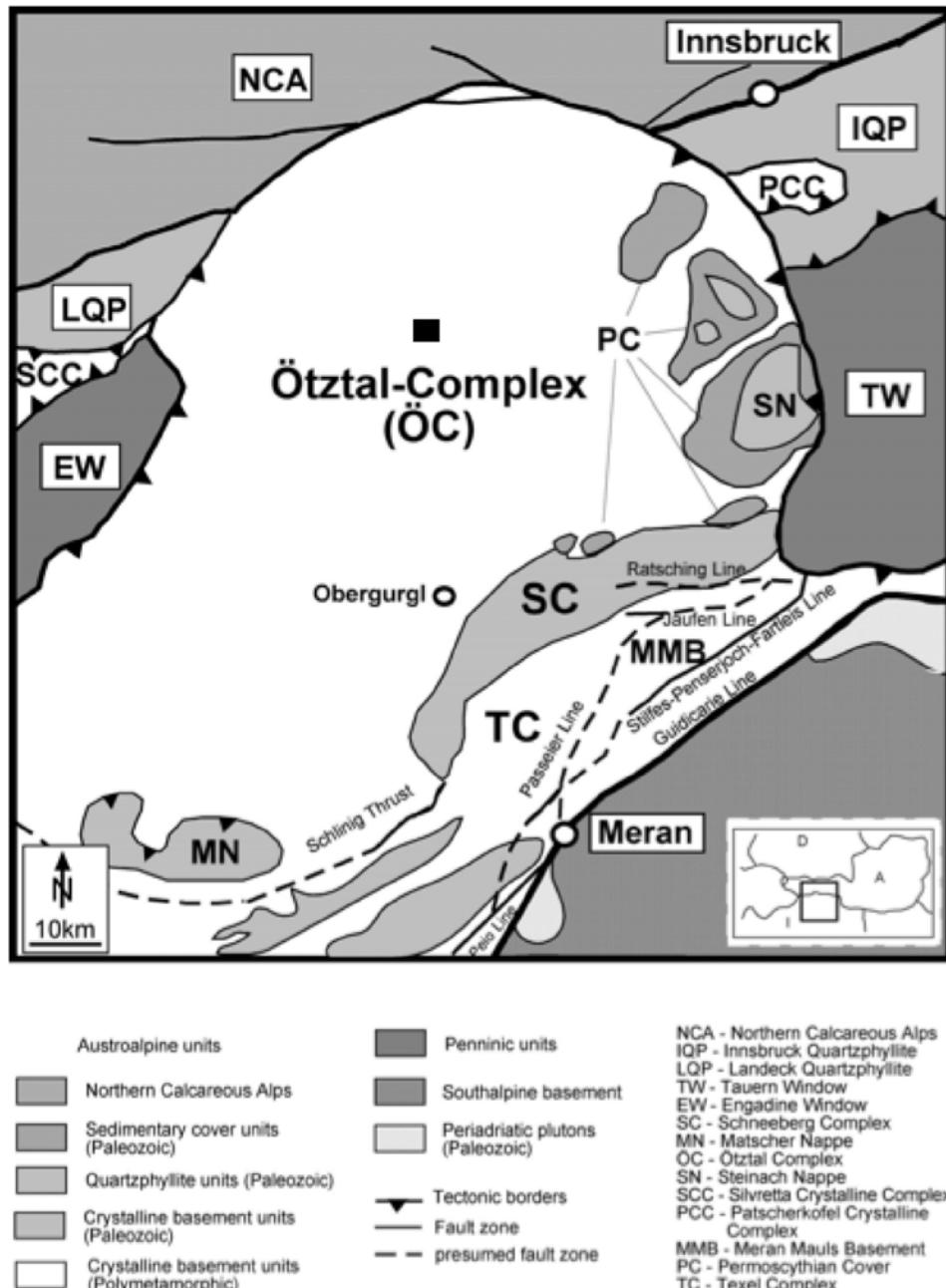


Abb. 1

Geologischer Überblick über die Kristallinkomplexe westlich des Tauernfensters (aus TROPPER & RECHEIS, 2003). Das schwarze Rechteck markiert den Bereich des Pollestales im zentralen ÖC.

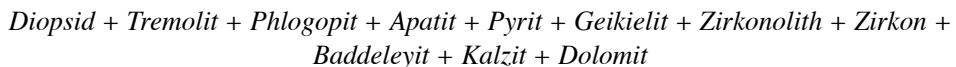
Die eo-Alpine Metamorphose weist im ÖC eine Metamorphosezonierung mit ansteigendem Metamorphosegrad von NW nach SO auf wie in Abb. 2 dargestellt (THÖNI, 1981, PURTSCHELLER et al., 1987, THÖNI & HOINKES, 1987, HOINKES et al., 1999). Im NW wurde maximal die untere Grünschieferfazies, im SE wurden amphibolitfazielle Bedingungen erreicht (HOINKES et al., 1991). Die T-Zunahme von < 300°C auf 550-600°C äußert sich durch das Auftreten der Indexminerale Stilpnomelan, Chloritoid, Granat und Staurolith in den Metapeliten. Diese Metamorphosezonierung ist auch an post-variszischen Diabasgängen, die im gesamten ÖC verbreitet auftreten und in den Permo-Mesozoischen Einheiten ersichtlich sind (PURTSCHELLER & RAMMLMAIR, 1982). Der Höhepunkt der eo-Alpinen Metamorphose westlich des Tauernfensters wird im TC(Texel-Complex) erreicht (HOINKES et al., 1991). Es kommt zur Bildung von Eklogiten. Die P-T Bedingungen werden von HOINKES et al. (1991) mit 11-12 kbar für den Druckhöhepunkt und 600-650°C für den Temperaturhöhepunkt angegeben. HABLER et al. (2006) ermittelten leicht erhöhte P-T Bedingungen von 540-620°C und 12-14 kbar.

4. Arbeitsmethoden

Zum Einsatz kam für die Proben eine Elektronenmikrostrahlsonde vom Typ JEOL 8100 SUPERPROBE mit 10 nA Probenstrom und 15 kV. Zur Untersuchung der strukturellen Eigenschaften von Mineralen bzw. zum Nachweis von OH in der Struktur eignet sich die Mikro-Raman-Spektroskopie und es wurde ein HORIBA JOBIN-YVON Labram- HR800 Spektrometer verwendet.

5. Petrographie

Anhand der Dünnschliffpetrographie und der BSE Bilder konnte in den Marmorproben aus dem Pollestal folgende Paragenese nachgewiesen werden (KOZLIK, 2011):



Die untersuchte Probe 38-2 weist die einfache Matrixparagenese Kalzit + Dolomit + Phlogopit + Pyrit auf und wird von einer Ader durchzogen (Abb. 2). In dieser Ader kam es zur Bildung der akzessorischen Minerale. Die Paragenese der Ader lautet:



Kalzit tritt als mehrere 100 µm grosse Kristalle mit häufigen Dolomitentmischungen in der Matrix auf. In der Ader tritt sehr häufig zonierter Klinopyroxen auf (Abb. 3). Die Matrix der Ader wird aus Phlogopit und Tremolit gebildet. Untergeordnet tritt Apatit auf.

Die Ti-, Zr- und Nb-hältigen Phasen sind engständig miteinander verwachsen (Abb. 4). Die Nb-Phase hebt sich durch ihre intensive weiße Färbung im BSE-Bild deutlich von den umliegenden Phasen ab (Abb. 5). Bei den umliegenden Phasen handelt es sich um die Zr-Phasen Zirkonolith, Zirkon, Baddeleyit und die Ti-Phase Geikielit. Neben Geikielit treten als weitere Ti-Phasen noch Rutil und Titanit auf.

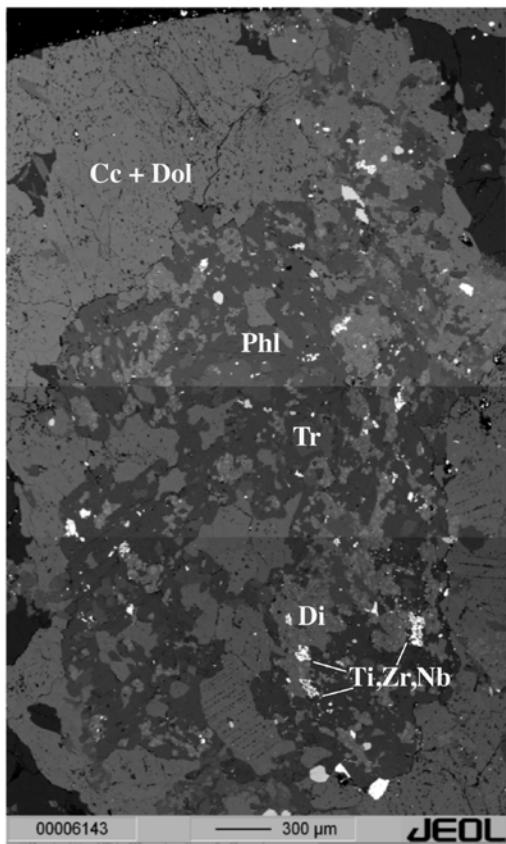


Abb. 2
BSE Bild der Probe PT 38-2 und der Ader.
Cc: Kalzit; Dol: Dolomit; Phl: Phlogopit;
Tr: Tremolit; Di: Diopsid;
Ti, Zr, Nb: Ti-Zr-Nb-Akzessorien.

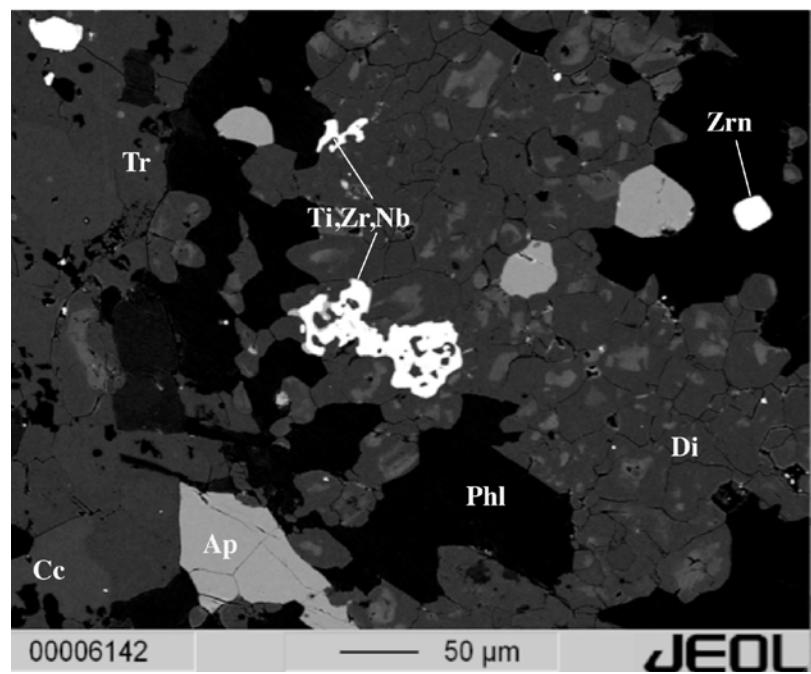


Abb. 3
BSE Bild der Probe
38-2, in der die
Zonierung der Klinopyroxene deutlich
sichtbar ist.
Cc: Kalzit; Phl: Phlogopit; Tr: Tremolit;
Di: Diopsid;
Ti,Zr,Nb: Ti-Zr-Nb-Akzessorien.

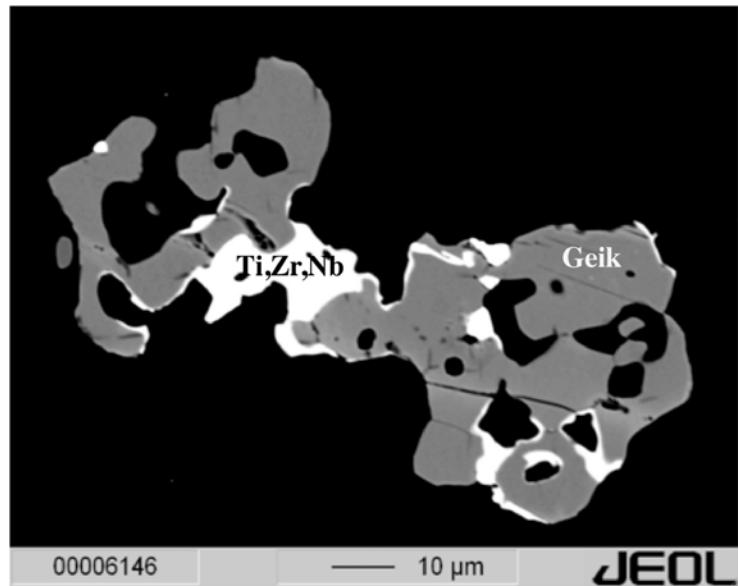


Abb. 4

Die Ti-Zr-Nb-Phasen (Ti,Zr,Nb) sind im BSE-Bild deutlich von Geikielit (Geik) durch ihre hellere Farbe zu unterscheiden. In diesem Bild kann die Nb-Phase aber nicht von Zirkon sowie Zirkonolith unterschieden werden.

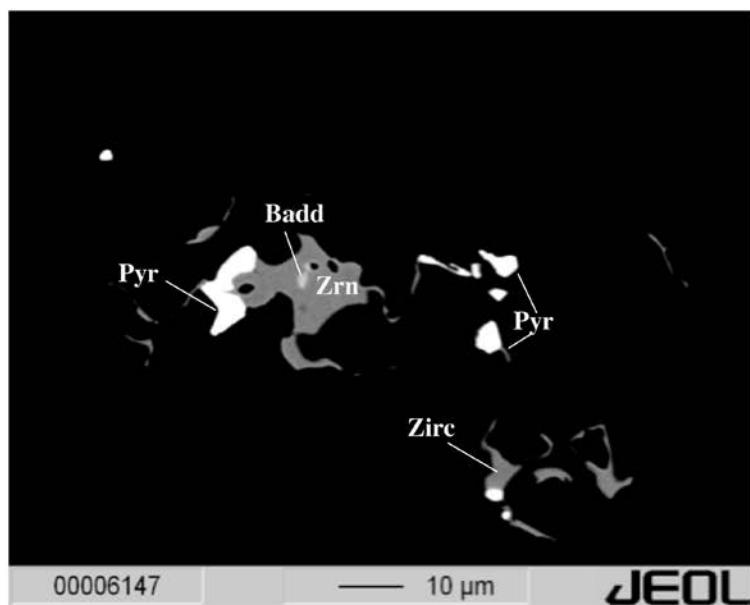


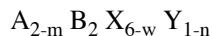
Abb. 5

Dieses BSE- Bild wurde noch weiter verdunkelt und deshalb ist hier der Unterschied zwischen der Nb-Phase Pyrochlor (Pyr) und Zirkon (Zrn) bzw. Zirkonolith (Zirc) sichtbar. Im Zirkon treten auch noch Einschlüsse von Baddeleyit (Badd) auf. Die Nb-Phase ist hier durch ihre weiße Farbe im Gegensatz zur grauen Farbe der Zr-Phasen leicht unterscheidbar.

6. Mineralchemie

Bei der Mineralchemie wurde nur ein Augenmerk auf die Nb-Phase gelegt, die Analysen der Karbonate und Silikate sind in den Untersuchungen von KOZLIK (2011) und GASTEIGER (2013) ersichtlich und können auf Wunsch vom Koautor zur Verfügung gestellt werden. Vorläufige energiedispersive (EDS) Analysen mittels Mikrosonde liessen bereits darauf schliessen, dass es sich bei der Nb-Phase um eine Mineral der Pyrochlorgruppe handeln könnte. Die Nomenklatur der Pyrochlor-Supergruppe wurde im Jahr 2010 durch die CNMNC (Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification) neu überarbeitet. Die Nomenklatur erfolgte dabei anhand der Ionen an den A, B und Y Positionen. Dadurch wurde die Pyrochlor-Supergruppe in fünf Untergruppen unterteilt: Pyrochlor, Mikrolith, Roméit, Betafit und Elsmoreit (ATENCIO et al., 2010). Die Klassifikation erfolgt dabei folgendermassen: wenn $Nb + Ta > 2Ti$ und $Nb > Ta$ dann liegt die Pyrochlorgruppe vor, wenn $Nb + Ta > 2Ti$ und $Ta \geq Nb$ dann liegt die Mikrolithgruppe vor und wenn $2Ti \geq Nb + Ta$ gilt, dann wird das Mineral zur Betafitgruppe gezählt. Die Minerale kommen häufig als akzessorische Phasen in Karbonatiten, Nephelin-Syeniten und Pegmatiten vor (CAMARA et al., 2004).

Die allgemeine Formel der Pyrochlor-Supergruppe lautet:



Die vereinfachte Struktur in Richtung der [110]-Achse ist in Abbildung 6 zu sehen. In dieser Formel ist auf der A-Position ein 8-fach koordiniertes Kation und Elemente wie Na, Ca, Ag, Mn, Sr, Ba, Fe^{2+} , Pb^{2+} , Sn^{2+} , Sb^{3+} , Bi^{3+} , Y, Ce (und andere SEE), Sc, U, Th oder eine Leerstelle \square oder H_2O können die Position besetzen (ATENCIO et al., 2010). Der Radius des A-Position Kations reicht von 0.087 nm bis 0.155 nm (LUMPKIN & EWING, 1988). Die B-Position ist durch ein 6-fach koordiniertes Kation wie Ta, Nb, Ti, Sb^{5+} , W, V^{5+} , Sn^{4+} , Zr, Hf, Fe^{3+} , Mg, Al und Si besetzt (ATENCIO et al., 2010). Der Radius des B-Position Kations reicht von 0.040 nm bis 0.078 nm (LUMPKIN & EWING, 1988).

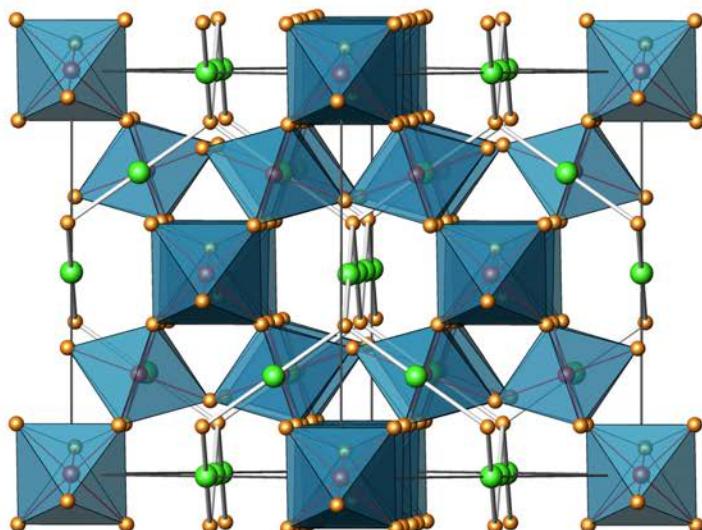


Abb. 6

Vereinfachte ideale Pyrochlor-kristallstruktur in Richtung der [110]-Achse. Die grünen Kugeln entsprechen dem Kation auf der A-Position, die orangen Kugeln zeigen die Y-Position an, die roten Kugeln entsprechen dem Kation auf der B-Position und die blauen Oktaeder zeigen das BO_6 Oktaeder an (ATENCIO et al., 2010).

Die X-Position wird meistens durch O, aber auch durch OH bzw. untergeordnet F besetzt. In der Formel wird die Y-Position durch ein Anion besetzt, kann aber auch durch eine Leerstelle, H₂O oder ein großes einwertigen Kation besetzt werden (z.B. OH-, F, O, H₂O, K, Cs, Rb, □). Die Symbole m, n und w repräsentieren Parameter, welche die unvollständige Besetzung der A-, X- und Y-Position anzeigen (ATENCIO et al., 2010). Wobei die Parameter m = 0 bis 1.7, n = 0 bis 1 und w = 0 bis 0.7 variieren können (LUMPKIN & EWING, 1995).

Das Mineral Betafit gehört mit der allgemeinen Formel (Ca,U)₂(Ti,Nb,Ta)₂O₆(OH) zur Pyrochlor-Supergruppe. Die Nomenklatur der Betafite nach ATENCIO et al. (2010) erfolgt je nachdem, welches Kation auf der A-Position und welches Anion auf der Y-Position den höchsten Anteil aufweist.

	Zirc-10	Zirc-2	Zirc-4
MgO	-	-	-
Nb ₂ O ₅	27.30	29.26	26.24
FeO	0.98	0.84	1.20
CaO	18.95	18.93	18.53
PbO	0.50	0.39	0.33
ZrO ₂	0.35	0.07	0.10
Ta ₂ O ₅	5.50	1.65	5.48
TiO ₂	18.92	18.47	19.03
UO ₂	20.15	20.38	20.13
WO ₃	1.23	1.57	1.10
ThO ₂	6.73	7.29	6.59
Total	100.63	98.87	98.76

Berechnete Formelkoeffizienten basierend auf 4 Kationen:

Mg	-	-	-
Nb	0.885	0.957	0.866
Fe	0.059	0.051	0.074
Ca	1.456	1.468	1.450
Pb	0.010	0.008	0.007
Zr	0.012	0.003	0.004
Ta	0.107	0.032	0.109
Ti	1.020	1.005	1.045
U	0.321	0.328	0.327
W	0.023	0.030	0.021
Th	0.110	0.120	0.109
Total	4.003	4.001	4.011

Tabelle 1
Repräsentative Betafitanalysen aus dem Pollestal.

Bei einem Oxycalciobetafit ist Ca das dominierende Element auf der A-Position und bei einem Oxyuranobetafit nimmt Uran die dominante Stelle auf der A-Position ein. Charakteristisch für das Mineral ist der hohe Urangehalt ($U > 0.4$ Atome pro Formeleinheit). In Kanada und auf Madagaskar enthielten Betafite bis zu 29.8 Gew.% UO_2 , in Adamello (Italien) fanden sich sogar Betafite mit 29-34 Gew.% UO_2 (CAMARA et al., 2004).

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Elektronenstrahlmikrosondenanalysen der Probe PT 38-2 aufgelistet: Bei der Nb-Phase der untersuchten Probe PT 38-2 aus dem Pollestal handelt es sich nach ATENCIO et al. (2010) um einen Oxycalciobetafit mit erhöhten U-Gehalten mit der idealen Formel $Ca_2(Ti,Nb)_2O_6O$. Die Gesamtsumme variiert zwischen 98 und 100 Gew.%, wobei die meisten Summen zwischen 99 und 100 Gew.% liegen, was auf keine oder nur geringe Anwesenheit von OH schließen lässt. Anhand dieser Analysen wurde nachgewiesen, dass es sich um den Oxycalciobetafit handelt, da auf der A-Position Nb das verherrschende Element ist. Die Betafitanalysen wurden auf der Basis von 7 Sauerstoffen und 4 Kationen berechnet. Auffallend ist der hohe Gehalt von Uran.

7. Mikro-Raman-Spektroskopie

Neben der Elektronenstrahlmikrosonde wurden die Betafite auch mittels Mikro-Raman Spektroskopie untersucht. Die Ramanspektren wurden mittels eines Lasers (532.22 nm) in einem Bereich zwischen 100 und 2000 cm^{-1} aufgenommen (Abb. 7). Die gewonnenen Daten wurden anschließend mit den Daten aus der Arbeit von FROST & REDDY (2010) verglichen um die Anwesenheit von Betafit zu verifizieren.

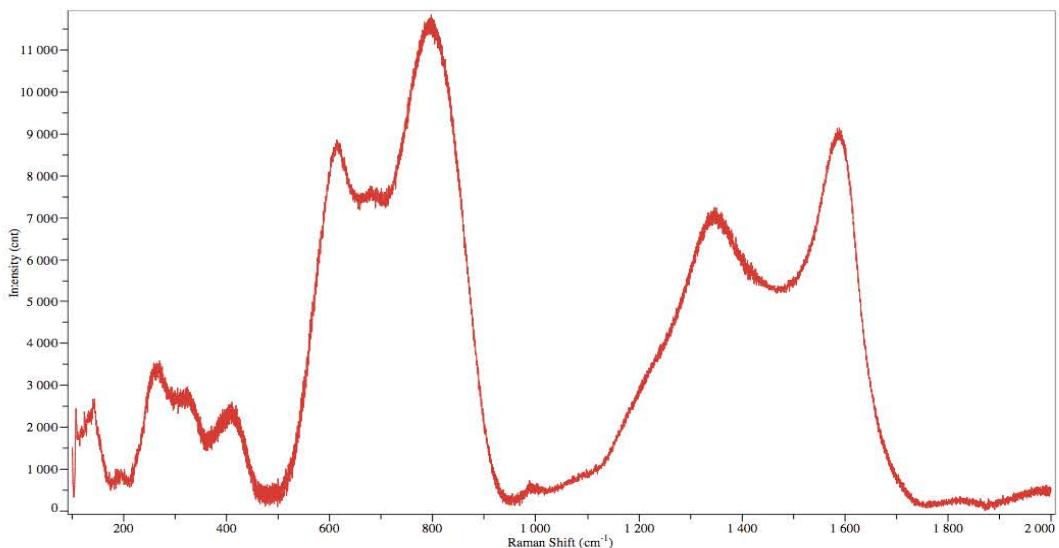


Abb. 7

Raman Spektrum der Probe 38-2 im Bereich zwischen 100 und 2000 cm^{-1} . Der Verlauf der Ramanbanden nach von FROST & REDDY (2010) lässt auf den Betafit schließen lassen.

Der Spektralbereich von 0 bis 500 cm⁻¹ zeigt fünf Banden bei 140, 200, 270, 315 und 405 cm⁻¹. Der Spektralbereich von 500 bis 1000 cm⁻¹ zeigt zwei Banden bei 605 und 800 cm⁻¹. Der Spektralbereich von 1000 bis 2000 cm⁻¹ zeigt wiederum zwei Banden 1345 und 1590 cm⁻¹. Oberhalb von 2000 cm⁻¹ wurde keine eindeutige Ramanbande beobachtet. Die Position der Ramanbanden stimmt mit den Daten aus FROST & REDDY (2010) sehr gut überein.

Die Auswertung mit der Elektronenstrahlmikrosonde ergab mögliche Hinweise auf die Anwesenheit von OH in der Probe, da einige Gesamtsummen zwischen 99 und 99 Gew.% lagen. Um die Anwesenheit von OH mittels Ramanspektroskopie nachzuweisen wurden auch Spektren im Bereich 3000-4000 cm⁻¹ gemessen da hier mögliche OH-Banden auftreten. Die Messung ergab keinen eindeutigen Nachweis für OH, die Möglichkeit ganz geringer OH Mengen (< 0.5 Gew.%) in der Struktur sind aber nicht ganz auszuschließen.

8. Interpretation

Anhand der durchgeföhrten Analysen an der Probe PT 38-2 aus dem Pollestal wurde im Rahmen dieser Untersuchung festgestellt dass es sich um einen OH-freien Oxycalcibetafit mit erhöhten U-Gehalten handelt. Die Mikro-Raman-Spektrskopie ergab dass es sich um ein Mineral der Betafitgruppe handelt und dass nur geringe Mengen von OH (< 0.5 Gew.%) in der Struktur auftreten.

Texturelle Beziehungen zwischen den Ti-, Zr-, Nb-hältigen Akzessorien lassen darauf schliessen, dass zuerst die Ti-reiche Phase Geikielit und die die Zr-Phase Baddeleyit, dann die Zr- Phasen Zirkonolith und Zirkon und zum Schluss der Betafit kristallisierten (Abb. 5). Die Zr- Phasen sind laut PURTSCHELLER & TESSADRI (1985) der variszischen Metamorphose zu zuordnen, nach KOZLIK (2011) könnte es sich auch um prä-variszisch kontaktmetamorph überprägte Metakarbonaten handeln. In der Literatur finden sich ähnliche Ti-, Zr-hältige Akzessorien in kontaktmetamorph überprägten Metakarbonaten, nämlich aus dem Bergell, dem Adamello und aus Stubenberg (GIERÈ, 1987, GIERÈ, 1990, TROPFER et al, 2005).

Nach KOZLIK (2011) ist das Auftreten von Betafit und den anderen Ti-Zr-hältigen akzessorischen Mineralen (Baddeleyit, Zirkonolith) ein Hinweis für eine prä-variszische Kontaktmetamorphose. Die Entstehung des Betafites kann hier als Mobilisation von HFSE- und REE-reichen Fluids gedeutet werden. Die Fluids zirkulierten wahrscheinlich entlang von Rissen im Gestein und dadurch kam es zur Bildung dieser akzessorischen Mineralien. Die nachfolgende variszische und eo-alpine Metamorphose hatten auf die Stabilität dieses Minerals wahrscheinlich keinen Einfluss.

Danksagung

Volker Kahlenberg wird für Abbildung 6 gedankt.

Literatur

ATENCIO, D., ANDRADE, B. M., CHRISTY, G. A., GIERÈ, R. & KARTASHOV, M. P. (2010): The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. - doi: 10.3749/canmin.48.3.673.

- BERNHARD, F. (1994): Zur magmatischen und metamorphen Entwicklung im westlichen Ötztal-Stubai Kristallin (Bereich Feichten-Verpel, mittleres Kaunertal). - Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Graz, 314 S.
- CAMARA, F., WILLIAMS, C. T., DELLA VENTURA, G., OBERTI, R. & CAPRILLI, E. (2004): Non-metamict betafite from Le Carcarelle (Vico volcanic complex, Italy): occurrence and crystal structure. - Mineralogical Magazine, 68(6), 939-950.
- FROST, R. L. & REDDY, B. J. (2010): Raman spectroscopic study of the uranyl titanate mineral betafite $(\text{Ca},\text{U})_2(\text{Ti},\text{Nb})_2\text{O}_6(\text{OH})$ – Effect of Metamictization. - Radiation Effects and Defects in Solids, 165(11), 868-875.
- GASTEIGER, P. (2013): Petrographie und Mineralchemie von Betafiten aus dem Pollestal. – Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Innsbruck.
- GIERÉ, R. (1987): Titanian clinohumite and geikielite in marbles from the Bergell contact aureole. - Contributions to Mineralogy and Petrology, 96, 496-502.
- GIERÉ, R. 1990: Hydrothermal mobility of Ti, Zr and REE: examples from the Bergell and Adamello contact aureoles (Italy). - Terra Nova, 2, 60-67.
- HABLER, G., THÖNI, M. & SÖLVA, H. (2006): Tracing the high pressure stage in the polymetamorphic Texel Complex (Austroalpine basement unit, Eastern Alps): P-T-t-d constraints. - Mineralogy and Petrology, 88, 269-296.
- HOINKES, G. (1973): Die Anatexis des Winnebachgranites (Ötztaler Alpen, Österreich) am Beispiel eines Aufschlusses. - Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 20, 225-239.
- HOINKES, G. & THÖNI, M. (1993): Evolution of the Ötztal-Stubai, Scarl-Campo and Ulten basement units. - In: Raumer, J.F. & Neubauer, J.F. (eds.) Mesozoic geology in the Alps, Springer Verlag, 485-494.
- HOINKES, G., KOSTNER, A. & THÖNI, M., (1991): Petrologic constraints for Eoalpine eclogite facies metamorphism in the Austroalpine Ötztal basement. - Mineralogy and Petrology, 43, 237-254.
- HOINKES, G., KOLLER, F., RANTITSCH, G., DACHS, E., HÖCK, V., NEUBAUER, F. & SCHUSTER, R. (1999): Alpine Metamorphism of the Eastern Alps. - Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 79, 155-181.
- KLÖTZLI-CHOWANETZ, E., KLÖTZLI, U. & KOLLER, F. (1997): Lower Ordovician migmatisation in the Ötztal crystalline basement (Eastern Alps, Austria): linking U-Pb and Pb-Pb dating with zircon morphology. - Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 77, 315-324.
- KOZLIK, M. (2011): Petrologische Untersuchungen zu den Metakarbonaten des zentralen Ötztal-Stubai-Kristallins (Pollestal) - Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- LUMPKIN, G. R. & EWING, R. C. (1988): Alpha- decay damage in minerals of the pyrochlore group. - Phys. Chem. Minerals, 16, 2-20.
- LUMPKIN, G. R. & EWING, R. C. (1995): Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: Pyrochlore subgroup. - American Mineralogist 80, 732-743.
- MILLER, C. & THÖNI, M. (1995): Origin of eclogites from the Austroalpine Ötztal basement (Tyrol, Austria): geochemistry and Sm-Nd vs. Rb-Sr isotope systematics. - Chemical Geology, 122, 199-225.
- PURTSCHELLER, F. & RAMMLMAIR, D. (1982): Alpine metamorphism of diabase dikes in the Ötztal-Stubai metamorphic complex. - Tschermaks Mineralogisch Petrographische Mitteilungen, 29, 205-221.
- PURTSCHELLER, F., HAAS, R., HOINKES, G., MOGESSIE, A., TESSADRI, R. & VELTMAN, C. (1987): Eoalpine metamorphism in the crystalline basement. - In: Flügel, H.W. & Faupl, P. (eds.), Geodynamics of the Eastern Alps. Deuticke, Wien, 187-189.
- PURTSCHELLER, F. & TESSADRI, R. (1985): Zirconolite and baddeleyite from metacarbonates of the Oetztal-Stubai complex (northern Tyrol, Austria). - Mineralogical Magazine, 49, 523-529.

- SCHWEIGL, J. (1995): Neue geochronologische und isotopengeologische Daten zur voralpidischen Entwicklungsgeschichte im Ötztalkristallin (Ostalpen). - Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 138, 131-149.
- THÖNI, M. & HOINKES, G. (1987): The Southern Ötztal Basement: Geochronological and Petrological Consequences of Eoalpine Metamorphic Overprinting. - In: Flügel, H.W. & Faupl, P. (eds.), Geodynamics of the Eastern Alps, Deuticke, Wien, 379-406.
- THÖNI, M. (1981): Degree and evolution of the Alpine metamorphism in the Austroalpine unit W of the Hohe Tauern in the light of K/Ar and Rb/Sr age determinations on micas. - Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, 124, 111-174.
- THÖNY, W., TROPPER, P., SCHENNACH, F., KRENN, E., FINGER, F., KAINDL, R., BERNHARD, F. & HOINKES, G. (2008): The metamorphic evolution of migmatites from the Ötztal Complex (Tyrol, Austria) and constraints on the timing of the pre-Variscan high-T event in the Eastern Alps. - Swiss Journal of Geosciences, 101, 111-126.
- TROPPER, P. & HOINKES, G. (1996): Geothermobarometry of Al₂SiO₅-bearing metapelites in the western Austroalpine Ötztal-basement. - Mineralogy and Petrology, 58, 145-170.
- TROPPER, P. & RECHEIS, A. (2003): Garnet zoning as a window into the metamorphic evolution of a crystalline complex: the northern and central Austroalpine Ötztal-basement as a polymetamorphic example. - Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, 94, 27-53.
- TROPPER, P., RHEDE, D. & BERNHARD, F. (2005): W-Nb-bearing zirconolites from metasomatic veins in marbles from the Stubenberg Granite contact aureole (Styria, Austria). - Geophysical Research Abstracts, 7, 03968.

received: 07.07.2014
accepted: 10.07.2014