

**GEO-THERMOBAROMETRIE VON AMPHIBOLITEN
AUS DEM SÜDLICHEN ÖTZTALKOMPLEX (PFLERSCHTAL, SÜDTIROL, ITALIEN)**

von

Egon Bernabe & Peter Tropper

Institut für Mineralogie und Petrographie
Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften
Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich

Abstract

The Ötztal Complex is a polymetamorphic Austroalpine basement complex. The Variscan and Eo-Alpine metamorphic events in the central and northern Austroalpine Ötztal Complex (ÖC) and the Schneeberg Complex (SC) were studied by TROPPER & RECHEIS (2003) on a regional scale by means of P-T estimates, based on multi-equilibrium methods. Since these P-T estimates were all obtained from garnet-bearing metapelites, it was the aim of this study to obtain P-T conditions from adjacent metabasites and hornblende-gneisses from the southern ÖC north of the SC for comparison with metapelite thermobarometry, using conventional and multi-equilibrium geothermobarometry, semi-empirical methods and trace-element geothermometry (Zr-in-rutile). The area of investigation is located in the innermost Pflersch Valley. In this field area massive hornblende-gneiss and amphibolite bodies containing the mineral assemblage garnet + hornblende + plagioclase + rutile + ilmenite + titanite + epidote + chlorite + quartz occur. Garnet, amphibole and plagioclase show discontinuous growth zoning in agreement with the polymetamorphic evolution of these rocks, where the composition of garnet II and plagioclase II, show higher calcic components, indicating a P-accentuated Eo-Alpine metamorphic overprint. Geothermobarometry yielded Eo-Alpine P-T conditions of 550-650°C and 0.80-1.2 GPa thus placing the rocks in the epidote-amphibolite facies domain in accordance with the data of TROPPER & RECHEIS (2003). Trace-element thermometry (Zr-in-rutile) also confirms the Eo-Alpine temperatures.

Zusammenfassung

Der Ötztal Komplex ist ein polymetamorphes, austroalpines Grundgebirge. Ziel dieser Arbeit war es, P-T Daten aus den Metabasiten und Hornblende-Gneisen des südlichsten ÖC nördlich des Schneeberg Komplexes im Pflerschtal zu erhalten, um damit thermobarometrische Vergleiche mit schon von anderen Autoren untersuchten Metapeliten durchführen zu können. Dabei wurden die konventionelle Geothermobarometrie, Multi-Equilibrium Geothermobarometrie, semi-

quantitative Methoden (Ti-im-Amphibol) und auf Spurenelementen basierende Geothermometer (Zr im Rutil) verwendet. Granat, Amphibol und Plagioklas weisen, in Übereinstimmung mit dem polymetamorphen Charakter dieser Gesteine, eine diskontinuierliche Zonierung (variszische Kerne, eo-alpidisch gebildete Ränder) auf. Die thermobarometrischen Berechnungen ergeben 550-650°C und 0.80-1.2 GPa für die Metabasite. Die Thermometrie mittels Spurenelementen (Zr im Rutil) bestätigt die berechneten eo-alpinen Temperaturen. Die untersuchten Gesteine können somit, in Übereinstimmung mit den Daten von TROPPEL & REICHEIS (2003) der Epidot-Amphibolit Fazies zugeordnet werden.

Einführung und geologischer Überblick

Aus geologischer Sicht befindet sich das südtiroler Pflerschtal im Ötztal Komplex (ÖC). Der ÖC ist Teil des oberostalpinen Deckenstapels nach SCHMID et al. (2004) und zusammen mit anderen Einheiten Teil des Austroalpinen Deckenstapels welcher im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung über die jüngeren penninischen Einheiten geschoben worden ist (FRANK et al., 1987).

Im ÖC sind mindestens drei Metamorphoseereignisse erkennbar: die kaledonische Metamorphose, die variszische Metamorphose und die eo-alpidische Metamorphose.

Der kaledonischen Metamorphose wird die Bildung verschiedener Migmatitkörper zugeschrieben (Winnebachmigmatit im zentralen ÖC, Verpeilmigmatit und das Nauderer Gaisloch im Westen). Die Druck/Temperatur Bedingungen für die Teilaufschmelzung werden von HOINKES (1973) mit 650-685°C bei ca. 0.4 GPa festgelegt. Datierungen an Zirkonen aus dem Winnebachmigmatit ergeben ein Mindestalter der Anatexis von 490 Ma (KLÖTZLI CHOWANETZ et al., 1997). THÖNY et al. (2008) bestimmten ein Alter von 450-430 Ma für die Bildung der Migmatite anhand von U-Th-Pb Monazitdatierungen an der Mikrosonde.

Das variszische Metamorphoseereignis wird auf ein Alter zwischen 370-310 Ma datiert (HOINKES et al, 1997; THÖNY, 1999). Das früheste Stadium bilden Eklogite welche vor 370-350 Ma bei Temperaturen von 700-750°C und Drucken von >2 GPa gebildet wurden. Der variszische Druckhöhepunkt wurde ziemlich genau auf 356 ± 3 Ma datiert (MILLER & THÖNY, 1995), der Temperaturhöhepunkt fand etwas später, um 343 ± 3 Ma (SCHWEIGL, 1995) statt. Die meisten Eklogite wurden in weiterer Folge durch tektonische Aktivität gehoben und einer Druckabnahme unterzogen, was zu einer Umwandlung in Amphibolite geführt hat. Diese kommen noch als Linsen vor und zeigen Temperaturen von 620-670°C und Drucke von 1.7 bis 2.3 GPa, wie zum Beispiel im nördlichen ÖC (KAPFERER & TROPPEL, 2005). Die letzte Phase der variszischen Metamorphose weist noch P-T Bedingungen um die 570-650°C und 0.6-0.8 GPa auf (KAPFERER & TROPPEL, 2005, TROPPEL & HOINKES, 1996).

Die eo-alpidische Metamorphose zeigt einen von NW nach SE hin ansteigenden Metamorphosegradienten an, wobei im SE, im Texel Komplex, P-T Bedingungen um die 600-650°C bei 1.1-1.2 GPa erreicht wurden (HOINKES et al., 1991; HÄBLER et al., 2006). Demzufolge sind im nordwestlichen Teil des ÖC grünschieferfazielle Bedingungen anzutreffen während eo-alpiner Staurolith nur im SE vorkommt. Entlang des Pflerschtales verläuft die Grenze zwischen dem ÖC und dem Schneeberg Komplex (SC), wobei die meisten Gesteine dem südlichen ÖC zuzuordnen sind.

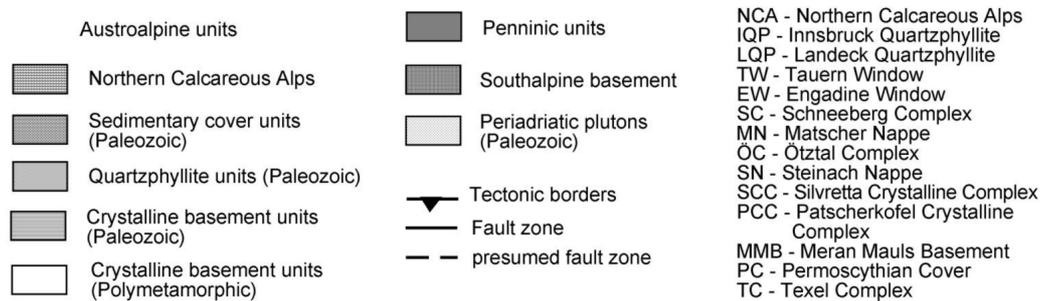
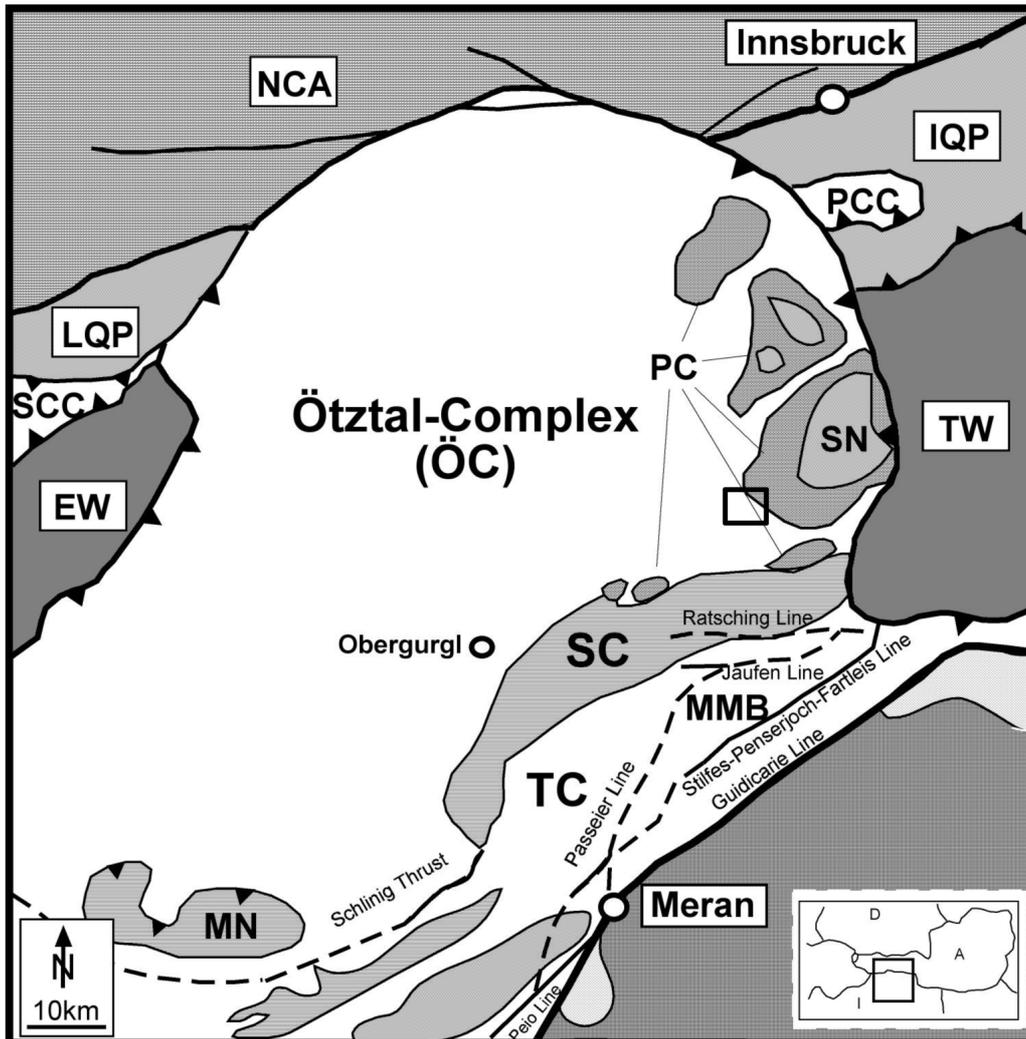


Abb. 1
 Geologischer Überblick über den ÖC nach TROPPEL & RECHEIS (2003).
 Das schwarze Feld bezeichnet die Lage des Arbeitsgebietes.

Geographischer und lithologischer Überblick

Das untersuchte Gebiet befindet sich im Pflerschtal in Südtirol, Italien. Dieses erstreckt sich ca. 15 km von E nach W und mündet bei Gossensaß (1502 m) in das Wipptal. Untersucht wurde das Gebiet vom Parkplatz „Hölle“ (1465 m) hinauf bis zur Tribulaunhütte (2368 m), weiter zum Hohen Zahn (2924 m), zum Pflerscher Pinggl (2767 m), zum Sandesjöchl und dem Gogelberg (2276 m). Die Gesteine im Kartierungsgebiet sind hauptsächlich dem ÖC zuzuschreiben in der Umgebung des Sandesjoches und an der Grenze zu Österreich sind jedoch schon Einheiten des Brennermesozoikums aufgeschlossen (Abb. 1). Vom Liegenden zum Hangenden können im Arbeitsgebiet folgende Lithologien unterschieden werden:

A) *Paragneis I*: Biotit-Plagioklasgneis mitunter sehr quarzreich mit Quarzitlagen. Der stark mylonitisierte Paragneis besteht aus der typischen Paragenese Plagioklas + Biotit + Muskowit + Quarz.

B) *Metabasit-Komplex*: Ist sehr unterschiedlich aufgebaut und tritt in der Regel als Hornblende-gneis oder Bänderamphibolit auf. Teilweise findet man noch Relikte eines magmatischen Gefüges.

C) *Paragneis II*: Biotit-Paragneis entweder mineralarm oder mineralreich (mit Granat). Der Paragneis II im Hangenden des Metabasit-Komplexes ist im Vergleich zum Paragneis I nicht mehr so stark quarzführend. Schon im Handstück und unter der Lupe erkennt man die typische Paragenese Plagioklas + Biotit + Muskowit + Quarz ± Granat.

D) „*Grüne Schiefer*“: Sie stellen den Verwitterungshorizont an der Basis zum Brennermesozoikum dar. Das Gestein ist stark verwittert, blättrig und braun bis grün. Dieser 10 bis 15 m mächtige Horizont wurde von KROIS et al. (1989) schon erkannt und als metamorphe Verwitterungszone an der Basis des Brennermesozoikums (BMZ) bestimmt.

E) *Quarzit des Brennermesozoikums*: Die Basis des Brennermesozoikums wird von fast reinen Quarziten gebildet welche eine permische Transgression des Ablagerungsraumes bezeugen (DIETRICH, 1983).

F) *Unterer Dolomit des Brennermesozoikums*: Hangend zu den oben genannten Quarziten der Transgressionsserie liegen die mächtigen, triassischen Karbonate des Pflerscher Tribulans. Stratigraphisch wird es dem Ladin zugeordnet (DIETRICH, 1983).

Arbeitsmethoden

Die Messungen an der Elektronenstrahlmikrosonde erfolgten mit einer JEOL JXA-8100 SUPERPROBE am Institut für Mineralogie und Petrographie der Universität Innsbruck. Die Messbedingungen waren ein Probenstrom von 10 nA und eine Beschleunigungsspannung von 15 kV. Für die Zr-Messungen in Rutil wurden die Einstellungen der Mikrosonde von ZACK et al. (2004) optimiert, wodurch die Detektionslimits um den Faktor 4 verbessert werden konnten. (80 ppm anstatt von 20 ppm). Die Beschleunigungsspannung betrug 20 kV und die gewählte Spannung betrug 120 nA bei einem Strahldurchmesser von 5 µm. Die quantitativen Messungen erfolgten mit den wellenlängendispersiven WDX-Spektrometern, schnelle, qualitative Messungen wurden mit der energiedispersiven EDX-Analytik durchgeführt. Zahlreiche BSE (back-scattered electron) Bilder dienten zur Veranschaulichung der chemischen Zonierung der verschiedenen Minerale (Granat, Hornblende, Plagioklas). Die Mineralformeln wurden mit dem Programm NORM II (ULMER, 1993, schriftl. Mitt.) verrechnet.

Petrographie und Mineralchemie

Die am häufigsten auftretenden Formen sind der Hornblendegneis und der granatführende Bänderamphibolit. Alle als Amphibolgneis und Bänderamphibolit eingestuftes Gesteine stammen ausschließlich aus der Gegend nördlich des Hohen Zahnes an den Vastelgruben. Sie sind zum Teil stark mylonitisiert. Makroskopisch und im Handstück sind die Gesteine je nach Amphibolanteil, hellgrau-grünlich, teilweise oliv- bis dunkelgrün. Die Hauptparagenese ist Amphibol + Plagioklas + Titanit + Quarz. Des Weiteren treten untergeordnet und akzessorisch auch folgende Minerale auf: Granat + Muskowit + Epidot/Klinozoisit + Rutil + Ilmenit + Apatit + Zirkon. Die vollständigen mineralchemischen Daten sind in der Diplomarbeit von BERNABE (2009) zu finden, können aber natürlich auf Anfrage von Peter Tropper zur Verfügung gestellt werden.

Amphibole: Die Amphibole aus dem Pflerschtal wurden mit dem Programm AMPH-IMA04 von MOGESSIE et al. (2004) normiert. Diese basiert auf der Klassifizierung nach LEAKE et al. (1997; 2004). Die untersuchten Amphibole sind ausnahmslos Ca-Amphibole. Bei den zonierten Amphibolen ist ein klarer Unterschied zwischen Kern und Rand sichtbar (Abb. 2). Die Kerne bestehen aus Hornblende/Edenit, während die Ränder hauptsächlich in das Tschermakit/Pargasit-Feld fallen (Abb. 3). Die nicht zonierten Amphibole fallen in beide Felder.

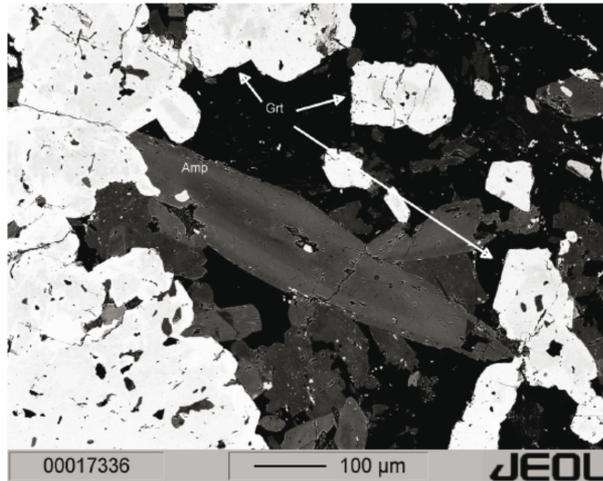


Abb. 2

BSE (backscattered electron) Bild eines zonierten Amphibols (Amp) neben Granat (Grt) aus den Metabasiten. Deutlich ist die chemische Zonierung mit dunklem Kern und hellen Rand erkennbar (Probe Eb-HT).

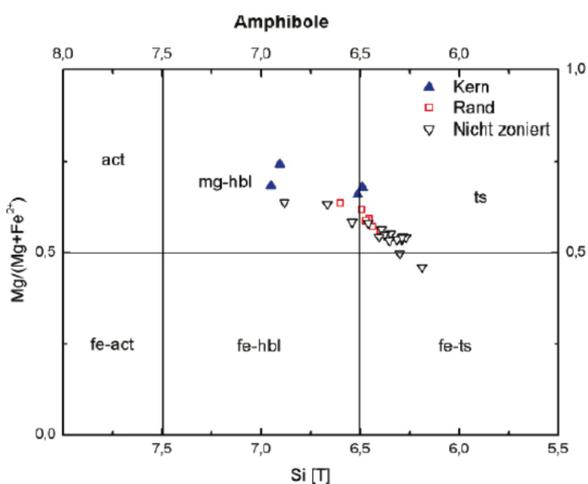


Abb. 3

Chemische Klassifikation der Amphibolanalysen nach LEAKE et al. (1997, 2004) für die Probe Eb-HT.

Die dominierenden Substitutionen sind in der Regel die Edenit- und Tschermakit Substitutionen. Die Mg-Hornblenden aus dem Pflerschtal weisen folgende Zusammensetzungen auf:

Probe E15b:	$\text{Na}_{0,2}\text{Ca}_{1,7}\text{Na}_{0,15}(\text{Fe},\text{Mg})_{3,9}\text{Al}_{0,9}\text{Si}_{6,5}\text{Al}_{1,4}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Probe e17b2:	$\text{Na}_{0,2}\text{Ca}_{1,6}\text{Na}_{0,20}(\text{Fe},\text{Mg})_{2,7}\text{Al}_{1,0}\text{Si}_{6,6}\text{Al}_{1,3}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Probe EbHT - Kern:	$\text{Na}_{0,2}\text{Ca}_{1,8}\text{Na}_{0,20}(\text{Fe},\text{Mg})_{4,1}\text{Al}_{0,6}\text{Si}_{6,9}\text{Al}_{1,0}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Um die chemische Zonierung in Amphibolen aus dem Pflerschtal zu erfassen, wurden auch Verteilungsbilder mittels Mikrosondenanalyse (WDS) erstellt, wobei gezeigt werden konnte dass in den Amphibolen aus dem Pflerschtal eine diskontinuierliche Zonierung vorliegt. Das Element Al zeigt eine deutliche Kern - Rand Zonierung. Der Kern ist Al-arm während der Rand deutlich Al-reicher ist. Am äußersten Rand des Kornes ist manchmal eine weitere, leichte Abreicherung von Al sichtbar. Weiters zeigen die Amphibole eine deutliche Mg-Zonierung. Der Rand ist klar Mg-arm während der Kern des Minerals deutlich an Mg angereichert ist.

Granat: Die chemische Zusammensetzung der Granate variiert zwischen Kern und Rand ganz klar und es konnte mittels BSE Bildern (Abb. 4) und Röntgenverteilungsbildern eine diskontinuierliche Zonierung nachgewiesen werden. Das Element Ca zeigt eine Zonierung mit Abnahme der Konzentration in Richtung Rand. Granat zeigt auch eine deutliche Mg-Zonierung. Der Rand ist klar Mg-arm während der Kern des Minerals deutlich an dem genannten Element angereichert ist. Mn zeigt ebenfalls eine sehr deutliche Zonierung mit Anreicherung des Elementes an den Rändern. Die höhere Konzentration an MnO an den Rändern kann durch Diffusion oder Abbau von Mn-reichen Mineralen entstanden sein. Da gleichzeitig eine Abnahme von CaO und MgO auftritt, kann vermutet werden, dass nach dem Temperaturhöhepunkt der Metamorphose weitere retrograde Reaktionen mit Beteiligung der Grossular- und Pyropkomponenten stattgefunden haben müssen. Neben den polymetamorph gebildeten Granaten kommen aber auch rein eo-alpidische, monometamorph gebildete Granate vor. Die Granate in den Metabasiten aus dem Pflerschtal besitzen im Durchschnitt folgende Zusammensetzung $\text{Alm}_{54-65}\text{Sps}_{1-25}\text{Grs}_{9-30}\text{Pyr}_{7-14}$ (Abb. 5).

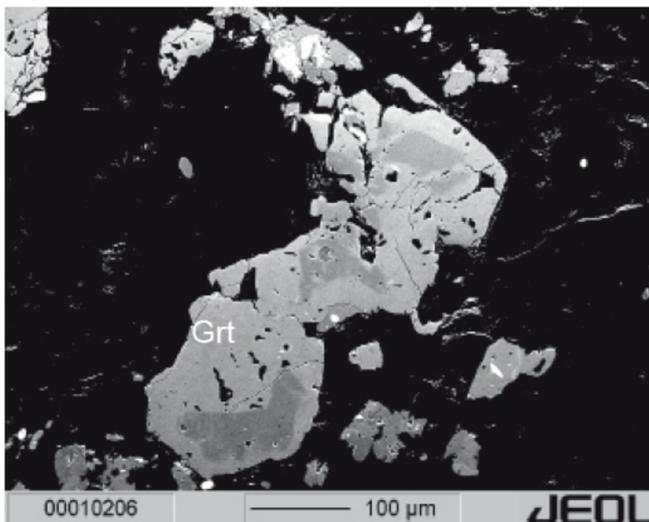
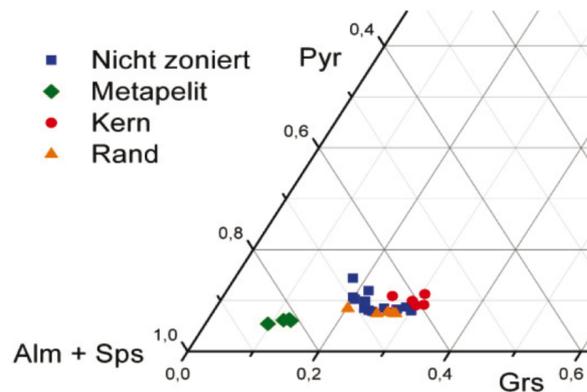


Abb. 4
BSE (backscattered electron) Bild eines diskontinuierlich zonierten Granats (Grt) aus den Metabasiten. Deutlich sind die reliktschen dunklen Kerne erkennbar (Probe Eb15b).

Abb. 5
 Darstellung der Granatchemismen aus dem Untersuchungsgebiet im ternären Pyrop – Grossular – Almandin+Spessartin Diagramm.
 Der Chemismus der unzonierten Granat entspricht dem der diskontinuierlich zonierten Randchemismen.



Plagioklas: Die Plagioklase weisen auch bereits im BSE Bild eine klare chemische Zonierung auf (Abb. 6). Der Chemismus reicht von XAn_{0-10} im Kern, XAn_{10-30} im inneren Rand bis XAn_{30-50} im äußeren Rand (Abb. 7).

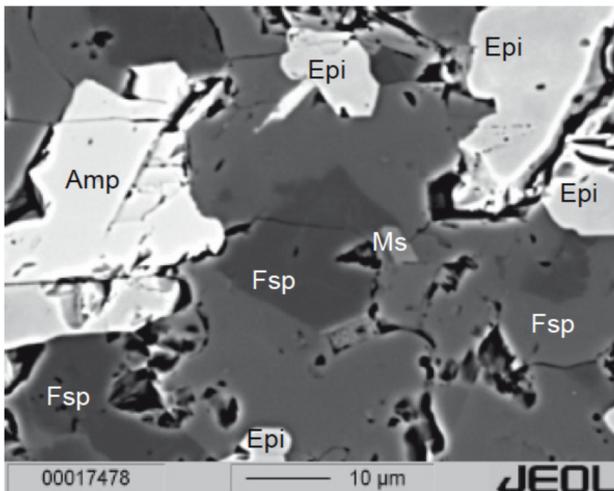
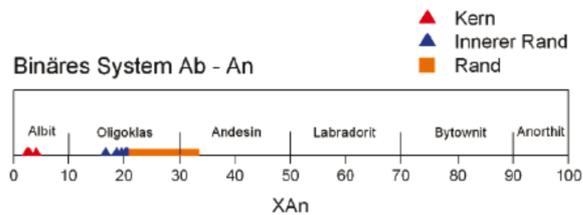


Abb. 6
 BSE (backscattered electron) Bild eines diskontinuierlich zonierten Plagioklases (Fsp) neben Amphibol (Amp) und Epidot (Epi) aus den Metabasiten. Deutlich ist die chemische Zonierung mit dunklem Kern und hellen Rand erkennbar (Probe Eb-HT).

Abb. 7
 Darstellung der Plagioklaschemismen aus dem Untersuchungsgebiet im binären Albit - Anorthit Diagramm.



Titanit kommt in den Amphiboliten aus dem Pflerschtal reichlich vor. Der Al-Gehalt streut zwischen 0.058 und 0.083 apfu, Fe zwischen 0.0059 und 0.010 apfu und (F+OH) zwischen 0.057 und 0.075 apfu.

Ilmenit ist ein in häufig vorkommendes Mineral. Die allgemeine Formel lautet FeTiO_3 . Für Fe können auch Mg (Geikilit) und Mn (Pyrophanit) eingebaut werden. Die Ilmenite aus dem Pflerschtal sind fast reine Fe-Ilmenite und weisen nur 0.002 apfu Mg und 0.033 apfu Mn auf.

Rutil: Die Rutilite aus den Pflerscher Metabasiten sind fast reines TiO_2 . Andere Elemente sind nur in Spuren anwesend.

Epidot: Die Vertreter der Epidot-Gruppe aus dem Pflerschtal besitzen die durchschnittliche Zusammensetzung $\text{Ep}_{59.39}$.

Geothermobarometrie

Ti-Gehalt in Amphibolen: Der Ti-Gehalt in Amphibolen kann in magmatischen Gesteinen als Geothermometer verwendet werden (OTTEN, 1984), denn dieser ist stark temperaturabhängig. Bei sinkender Temperatur nimmt der Ti-Gehalt ab. Für die Berechnungen wurde die Formel $\ln(\text{Ti [apfu]}) = (2603/T) - 1.70$ verwendet. Die TiO_2 Gehalte variieren zwischen 0.34 und 0.67 Gew.% und die errechneten Temperaturen variieren von 590 bis 630°C.

Für alle konventionellen geothermobarometrischen Berechnungen wurde das Softwarepaket „PET - petrological elementary tools for mathematica, Version 5.0.1“, (DACHS, 1997) verwendet.

Granat - Hornblende Thermometer: Dieses Geothermometer wurde von GRAHAM & POWELL (1984) empirisch kalibriert und beruht auf dem Austauschgleichgewicht: Fe-Pargasit + Pyrop = Pargasit + Almandin. Bei einem angenommenen Druck von 0.9 GPa erhält man bei drei Mineralpaaren eine Temperatur von 500 - 520°C und beim vierten Paar eine Temperatur von 595°C.

Hornblende - Plagioklas Thermometer: Dieses für Granat-Amphibolite sehr gut geeignete Geothermometer wurde von HOLLAND & BLUNDY (1994) entwickelt. Die Basis wird von zwei Austauschreaktionen zwischen Hornblende und Plagioklas gebildet:

- (1) Albit + Tremolit \Leftrightarrow Edenit + Quarz (Edenit - Tremolit Thermometer)
- (2) Edenit + Albit \Leftrightarrow Richterit + Anorthit (Edenit - Richterit Thermometer)

Der geringe Anorthitgehalt und die Anwesenheit von Quarz in den Proben aus dem Pflerschtal kann sich für die Anwendung des Thermometers (2) als problematisch erweisen. Aus diesem Grund wird darauf verzichtet. Bei einem angenommenen Druck von 0.9 GPa erhält man mit diesem Geothermometer, wie erwartet, etwas höhere Temperaturen zwischen 620 und 650°C.

Granat - Amphibol - Plagioklas Geobarometer: Grundlage für dieses Geobarometer bilden folgende Net-Transfer Reaktionen (KOHN & SPEAR, 1990):

- (3) Anorthit + Tremolit \Leftrightarrow Grossular + Pyrop + Tschermakit + Quarz
- (4) Anorthit + Fe-Aktinolith \Leftrightarrow Grossular + Almandin + Fe-Tschermakit + Quarz

Bei einer angenommenen Temperatur von 600°C erhält man Drucke zwischen 0.85 GPa und 1.0 GPa.

Kombiniert man die Ergebnisse des Amphibol - Plagioklas Thermometers und des Granat - Amphibol - Plagioklas Barometers erhält man für die vier analysierten, koexistierenden Mineralpaare aus den Pflerscher Metabasiten $P = 0.8 - 1.1 \text{ GPa}$ und $T = 580 - 660^\circ\text{C}$.

Zr im Rutil Geothermometer: Rutil ist ein wichtiger Träger von HFSE (high field strength elements) wie Zr, Hf, Ta und Nb. Die Temperaturabhängigkeit des Zr-Gehaltes im Rutil wurde von ZACK et al. (2004) und WATSON et al. (2006) untersucht und empirisch kalibriert. Der Zr-Gehalt in den an der Mikrosonde messbaren Rutilen variiert zwischen 56 ppm und 109 ppm (Tab. 1). Die daraus resultierenden Temperaturen schwanken mit der Kalibration nach ZACK et al. (2004) zwischen 482°C und 590°C , mit der Kalibration nach WATSON et al. (2006) zwischen 513°C und 657°C .

Probe	Zr [ppm]	T1 [$^\circ\text{C}$]*	T2 [$^\circ\text{C}$]**
E17b_rutil1	78	547	544
E17b_rutil2	47	482	513
E17b_rutil3	56	504	524
Eb-HT_rutil5	69	531	537
Eb-HT_rutil3	76	543	543
Eb-HT_rutil1	109	590	657
Eb-HT_rutil8	67	527	535

* Kalibration nach ZACK et al. (2004)

** Kalibration nach WATSON et al. (2006)

Tabelle 1

Ergebnisse der Zr-in-Rutil Geothermometrie.

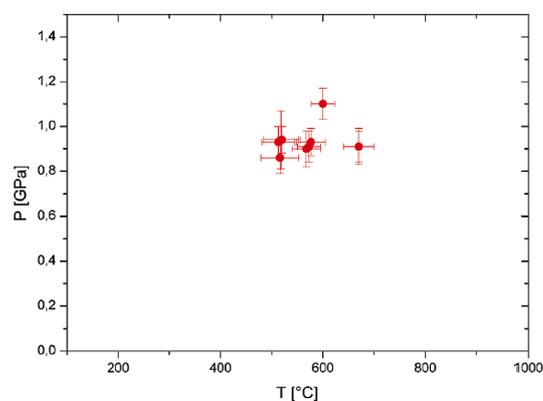
Multi-equilibrium Geothermobarometrie: Für eine festgestellte Mineralparagenese können durch Verwendung intern konsistenten Datensätze alle möglichen Reaktionen berechnet werden, die sich im Falle eines Gleichgewichts miteinander verschneiden. Aus dem Schnittpunkt der verschiedenen Reaktionskurven können in weiterer Folge die P-T Bildungsbedingungen des Gesteines abgelesen werden. Das Software-Paket THERMOCALC v.3.21 basiert auf dem Datensatz von HOLLAND & POWELL (1998). Die Aktivität der Endglieder wird mit dem Hilfsprogramm AX berechnet (HOLLAND, 2003, schriftl. Mitt.). Dabei wurden ein Druck von 1.0 GPa und eine Temperatur von 550°C angenommen. Zur Bestimmung der P-T Bedingungen der Metabasite aus dem Pflerschtal wurden folgende Reaktionen (5-8) verwendet:

- (5) $3 \text{ Tr} + 10 \text{ Pyr} + 24 \text{ Czo} \Leftrightarrow 15 \text{ Ts} + 12 \text{ An} + 4 \text{ Grs}$
- (6) $3 \text{ Ts} + 2 \text{ Pyr} + 4 \text{ Grs} + 12 \text{ Qz} \Leftrightarrow 3 \text{ Tr} + 12 \text{ An}$
- (7) $5 \text{ Ts} + 3 \text{ Grs} + 11 \text{ Qz} \Leftrightarrow 3 \text{ Tr} + 13 \text{ An} + 2 \text{ H}_2\text{O}$
- (8) $3 \text{ Tr} + 5 \text{ Alm} \Leftrightarrow 3 \text{ Act} + 5 \text{ Pyr}$

Abkürzungen: Tr: Tremolit; Pyr: Pyrop; Czo: Klinozoisit; Ts: Tschermakit; An: Anorthit; Grs: Grossular; Qz: Quarz; Alm: Almandin; Act: Aktinolith.

Die Berechnung mit der Software THERMOCALC v. 2.31 ergibt für die Pflerscher Metabasite P-T Bedingungen von 0.8-1.2 GPa und $550-650^\circ\text{C}$ (Abb. 8).

Abb. 8
Darstellung der P-T Ergebnisse mittels Multi-Equilibrium Geothermobarometrie aus den Metabasiten (Probe Eb-HT).



Diskussion der thermobarometrischen Ergebnisse

Die Variszische und die Eo-Alpine Metamorphose im zentralen und nördlichen ÖC und im Schneeberg Komplex (SC) wurden von TROPPEL & RECHEIS (2003) auf regionalem Maßstab, mittels Interpretation der verschiedenen chemischen Zonierungen in Granaten und Berechnung der P-T Bedingungen mittels Multi-equilibrium Methoden, untersucht. Die eo-alpinen P-T Bedingungen der Proben aus dem ÖC und des nördlichen SZ reichen von 469°C und 0.42 GPa im nördlichen ÖC und bis zu 556°C und 0.88 GPa im südlichen ÖC an der Grenze zum SC. Die Daten stammen allerdings gänzlich aus granatführenden Metapeliten. Die in dieser Arbeit gewonnenen Daten aus den thermobarometrischen Berechnungen ergeben für die Metabasite eo-alpine Metamorphosebedingungen von 550-650°C und 0.8-1.2 GPa (Tab. 2), die sehr gut mit den bereits vorhandenen Daten aus dem südlichen ÖC (HOINKES, 1986; TROPPEL & RECHEIS, 2003) übereinstimmen.

Methode	P [GPa]	T [°C]
Ti-Gehalt in Amphibolen	-	590-630
Grt-Hbl Thermometer	-	520-595 ⁺
Hbl- Plag Thermometer	-	620-650 ⁺
Grt-Amp-Plag Barometer	0.85-1.0	580-660
Zr im Rutil Thermometer	-	480-570 ⁺⁺
THERMOCALC v. 2.31	0.8-1.2	550-650

⁺Bei einem Druck von 0.9 GPa.

⁺⁺Kalibrationen nach ZACK et al. (2004) und WATSON et al. (2006)

Tabelle 2
Geothermobarometrische Ergebnisse aus den Metabasiten.

Literatur

- BERNABE, E. (2009): Petrologische und thermobarometrische Untersuchungen am Pflerscher Metabasit-Komplex (Pflerschtal, Südtirol, Italien). - Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 125 S.
- DACHS, E. (1997): PET: petrological elementary tools for mathematica. - *Computers & Geosciences*, 24, 219-235.
- DIETRICH, H. (1983): Zur Petrologie und Metamorphose des Brennermesozoikums (Stubai Alpen, Tirol). - *Mineralogy Petrology*, 31, 235-257.
- FERRY, J.M. & WATSON, E.B. (2007): New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. - *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154, 429-437.
- FRANK, W., HOINKES, G., PURTSCHHELLER, F. & THÖNI, M. (1987): The Austroalpine unit west of the Hohe Tauern: the Ötztal-Stubai complex as an example for the Eo-Alpine metamorphic evolution. - In FLÜGEL, H.W. & FAUPL, P. (eds.) *Geodynamics of the Eastern Alps*, Franz Deuticke Verlag Wien, 280-320.
- GRAHAM, C.M. & POWELL, R. (1984): A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schist, Southern California. - *Journal of Metamorphic Geology*, 2, 13-31.
- 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 Winnebachgranits (Ötztaler Alpen, Österreich) am Beispiel eines Aufschlusses. - *Tschermaks Mineralogische Petrographische Mitteilungen*, 20, 225-239.
- HOINKES, G. (1986): Eoalpine metamorphism of the Austroalpine Schneeberg-Complex and the adjacent Ötztal crystalline basement (summary). - *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 66, 135-138.
- 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., THÖNI, M., LICHEM, C., BERNHARD, F., KAINDL, R., SCHWEIGL, J., TROPPER, P. & COSCA, M. (1997): Metagranitoids and associated metasediments as indicators for the pre-Alpine magmatic and metamorphic evolution of the western Ötztal Basement (Kauertal, Tirol). - *Schweizerische Mineralogische Petrographische Mitteilungen*, 77, 299-314.
- HOLLAND, T.J.B. & BLUNDY, J. (1994): Non ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. - *Contributions to Mineralogy Petrology*, 116, 433-447.
- HOLLAND, T.J.B. & POWELL, R. (1998): An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. - *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 309-343.
- KAPFERER, N. & TROPPER, P. (2005): The metamorphic evolution of variscan eclogites from the northern Ötztal Complex (Tirol, Eastern Alps). - *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 150, 63.
- KLÖTZLI-CHOWANETZ, E., KLÖTZLI, U. & KOLLER, F. (1997): Lower Ordovician migmatization 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.
- KOHN M.J. & SPEAR, F.S. (1990): Two new barometers for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont. - *American Mineralogist*, 75, 89-96.
- KROIS, P. (1989): Die basalen klastischen Gesteine im Brennermesozoikum (Stubai Alpen/Tirol). - *Geologisch Paläontologische Mitteilungen der Universität Innsbruck*, 16, 63-65.
- LEAKE, B.E. et al. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee in amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission of New Minerals and Mineral Names. - *American Mineralogist*, 82, 1019-1037.
- LEAKE, B.E. et al. (2004): Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. - *American Mineralogist*, 89, 883-887.

- 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.
- MOGESSIE, A., ETTINGER, K., LEAKE, B. E. & TESSADRI, R. (2001): AMPH-IMA97: a hypercard program to determine the name of an amphibole from electron microprobe and wet chemical analyses. - *Computers and Geosciences*, 27, 1169-1178.
- OTTEN, M.T. (1984): The origin of brown hornblende in the Artfjället gabbro and dolerites. - *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86, 189-199.
- SCHMID, S.M., FÜGENSCHUH, B., KISSLING, E. & SCHUSTER, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. - *Eclogae Geologicae Helveticae*, 97/1, 93-117.
- SCHWEIGL, J. (1995): Neue geochronologische und isotopengeologische Daten zur voralpidischen Entwicklungsgeschichte im Ötztalkristallin (Ostalpen). - *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt Wien*, 138, 131-149.
- THÖNY, W.F. TROPPEL, P., SCHENNACH, F., KRENN, E., FINGER, F., KAINDL, R., BERNHARD, F. (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.
- TROPPEL, P. & HOINKES, G. (1996): Geothermobarometry of Al₂SiO₅-bearing metapelites in the western Austroalpine Ötztal-basement. - *Mineralogy Petrology*, 58, 145-170.
- TROPPEL, P. & RECHEIS, A. (2003): Garnet zoning as a window into the metamorphic evolution of a crystalline complex: the northern and central Austroalpine Ötztal-Complex as a polymorphic example. - *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 94, 27-53.
- WATSON, E. B., WARK, D.A., THOMAS, J.B. (2006): Crystallization thermometers for zircon and rutile. - *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151, 413-433.
- ZACK, T., MORAES, R & KRONZ, A. (2004): Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. - *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 471-488.

received: 06.07.2012

accepted: 17.07.2012