

# Die Granate in eklogitischen Reliktgesteinen des zentralen Tauernfensters (Penninikum, Ostalpen): Chemismus, Zonierung und Reaktionsgefüge

Von Robert STURM

## Schlagwörter:

Granat, Eklogit, Hochdruckparagenese, chemische Zonierung, Corona-Textur, Tauernfenster, Penninikum.

## Zusammenfassung:

Die Zusammensetzung und chemische Zonierung von Granaten in eklogitischen Reliktgesteinen nahe der Gamsgrube (Glocknerdecke) sowie unterhalb des Großen Margrötenkopfes (Rote Wand-Modereck-Decke) wurden im Detail untersucht. Zudem wurden eventuelle, im Zuge des Hebungprozesses entstandene Reaktionsgefüge einer näheren Betrachtung unterzogen. Generell sind die Granate beider studierten Proben durch für Eklogite typische, hohe Gehalte an Almandin (bis 65 %) und Grossular (bis 25 %) gekennzeichnet, während Spessartin (1 bis 15 %) und Pyrop (6 bis 14 %) in ihrer Konzentration zurücktreten. Die chemische Zonierung der Granate im Gamsgruben-Eklogit zeigt vom Kern zum Rand eine Abnahme des Spessartin- und Grossulargehaltes sowie eine Zunahme von Almandin und Pyrop (durchschnittlicher Trend: Kern:  $\text{Alm}_{58}\text{Gro}_{24}\text{Pyp}_5\text{Sps}_{13}$ , Rand:  $\text{Alm}_{63}\text{Gro}_{23}\text{Pyp}_{11}\text{Sps}_3$ ). Für den eklogitischen Prasinit aus dem Gebiet des Großen Margrötenkopfes tritt im Durchschnitt eine sehr ähnliche Entwicklung auf (Kern:  $\text{Alm}_{57}\text{Gro}_{23}\text{Pyp}_6\text{Sps}_{14}$ , Rand:  $\text{Alm}_{63}\text{Gro}_{21}\text{Pyp}_{12}\text{Sps}_4$ ). Zahlreiche Granate (Paragonite, Omphazite) im eklogitischen Reliktgestein nahe der Gamsgrube sind durch randliche Corona-Texturen charakterisiert, welche sich vornehmlich aus Epidot ( $\text{Al/Fe}^{3+}$ : 2,5:0,5 bis 2,0:1,0) sowie untergeordnet aus Albit, Magnetit und Ca-Mg-Hornblende zusammensetzen und den retrograden Abbau der Hochdruckphasen unter vermehrtem Einfluss von Fluidphasen anzeigen. Isokonzentrationskarten von jeweils repräsentativen Granatkristallen deuten darauf hin, dass das Granatwachstum vorwiegend entlang des prograden Abschnittes eines im Uhrzeigersinn verlaufenden Metamorphosepfades verlief.

## Einleitung

Das Tauernfenster stand in den letzten Jahrzehnten vermehrt im Blickpunkt des geowissenschaftlichen Interesses und gilt heute in Bezug auf petrographische, metamorphe, strukturgeologische und geochronologische Studien als eines der am besten untersuchten Gebiete der Alpen (z. B.: MILLER 1974; HOLLAND 1979; FRANZ & SPEAR 1983; DACHS 1990; INGER & CLIFF 1994). Grundsätzlich lässt sich die metamorphe Entwicklung des Fensters in drei Hauptstadien untergliedern (HOLLAND 1979): 1.) ein eklogitfazielles Ereignis (~20 kbar,

## Key Words:

Garnet, eclogite, high-pressure paragenesis, chemical zoning, corona texture, Tauern Window, Penninic.

## Abstract:

The garnets in eclogitic relics from the central Tauern Window (Penninic, Eastern Alps): Chemism, zoning and reaction textures. The composition and chemical zoning of garnets in eclogitic relics from the Gamsgrube (Glockner nappe) and the Großer Margrötenkopf (Rote Wand-Modereck nappe) were investigated in detail. Additionally, eventual reaction textures, which developed during exhumation of the rocks, were studied. In general, the garnets of both investigated samples are characterized by compositions typical for eclogites, with high contents of almandine (up to 65 %) and grossular (up to 25 %), but moderate concentrations of spessartine (1 to 15 %) and pyrope (6 to 14 %). Chemical zoning of garnets in the eclogitic relic from the Gamsgrube shows a decrease of spessartine and grossular contents and increase of almandine and pyrope contents from core to rim (average trend: core:  $\text{alm}_{58}\text{grs}_{24}\text{pyp}_5\text{sps}_{13}$ , rim:  $\text{alm}_{63}\text{grs}_{23}\text{pyp}_{11}\text{sps}_3$ ). Similar tendencies can be described for the garnets from the Großer Margrötenkopf (core:  $\text{alm}_{57}\text{grs}_{23}\text{pyp}_6\text{sps}_{14}$ , rim:  $\text{alm}_{63}\text{grs}_{21}\text{pyp}_{12}\text{sps}_4$ ). Numerous garnets (paragonites, omphacites) in the high-grade relics from the

Gamsgrube are marked by marginal corona textures which are mainly composed of epidote (Al/Fe<sup>3+</sup>: 2.5:0.5 to 2.0:1.0) and, to a minor extent, of albite, magnetite, and Ca-Mg-amphiboles. The textures indicate a retrograde decomposition of high-pressure phases under the increased influence of fluid phases (hydration). Isoconcentration maps of representative garnet crystals provide evidence that garnet growth mainly took place along the prograde part of a clockwise P-T path.

600 °C), welches bislang nur für die Eklogitzone im zentralen Tauernfenster sicher nachgewiesen werden konnte, 2.) ein glaukophan- bis eklogitfazielles Metamorphosestadium (10 bis 15 kbar, 400 bis 500 °C) und 3.) eine abschließende amphibolitfazielle Überprägung („Tauernkristallisation“; 6 bis 7 kbar, bis 550 °C). Für die Tauernkristallisation wird ein Alter von etwa 30 Ma angenommen (INGER & CLIFF 1994), während das zeitliche Auftreten der vorhergehenden Metamorphoseereignisse noch nicht genau festgestellt werden konnte, jedoch als kretazisch (65 bis 90 Ma) eingestuft wird (RAITH et al. 1980).

Im Großglocknergebiet wurden auf der Dokumentation von CORNELIUS & CLAR (1939) basierend erste Untersuchungen zur metamorphen Entwicklung von STURM & DACHS (1996), STURM et al. (1997) sowie STURM (1999) begonnen und in weiterer Folge von PROYER et al. (1999) und DACHS & PROYER (2001) fortgeführt. Gerade letztere Studien belegen eindeutig, dass die verschiedenen Deckeneinheiten der Oberen Schieferhülle (siehe unten) durch zum Teil signifikante Unterschiede bezüglich ihrer metamorphen Entwicklung gekennzeichnet sind.

Für die Rekonstruktion von P-T-Pfaden mit Hilfe von Hochdruck-Reliktgesteinen stellt Granat in den meisten Fällen die mit Abstand wichtigste Mineralphase dar, weil er einzelne Metamorphoseereignisse sowohl anhand seiner chemischen Zonierung als auch durch spezifische Einschlussphasen zu speichern vermag (SPEAR 1993). Oft können frühe metamorphe Stadien durch eine geothermobarometrische Analyse von Einschlüssen und koexistierender Granatphase hinreichend genau nachgewiesen werden, während eine Verifikation späterer Metamorphoseereignisse durch gezielte Studie von mit Granat im Gleichgewicht stehenden Randparagenesen ermöglicht wird. Die Verwendung von chemischen Zonierungsprofilen wurde in der Vergangenheit ebenfalls als vielfach geeignet für die Modellierung von Metamorphoseabläufen bewertet (SPEAR & SELVERSTONE 1983).

In der vorliegenden Studie wurden die Granate in eklogitischen Reliktgesteinen zweier in der Oberen Schieferhülle gelegenen Lokalitäten (Gamsgrube, Großer Margrötzenkopf; siehe nächstes Kapitel) einer detaillierten petrographischen und mineralchemischen Analyse unterzogen. An jeweils repräsentativen Kristallen wurden die chemischen Zonierungen durch Isoliniendarstellungen visualisiert. Eine mögliche Verwendung von chemischen Profilen zur Erstellung lokaler P-T-Pfade wurde in weiterer Folge diskutiert.

### **Geologie im Bereich der probierten Gebiete**

Das Tauernfenster stellt eines der interessantesten erdwissenschaftlichen Forschungsobjekte der Alpen insgesamt dar, treten in ihm doch mit dem Penninikum die tiefsten tektonischen Einheiten der Ostalpen zutage, welche ansonsten vom Ostalpinen Deckenstapel überlagert werden (Abb. 1A). Die Penninischen Decken selbst entstanden in einer als Folge der

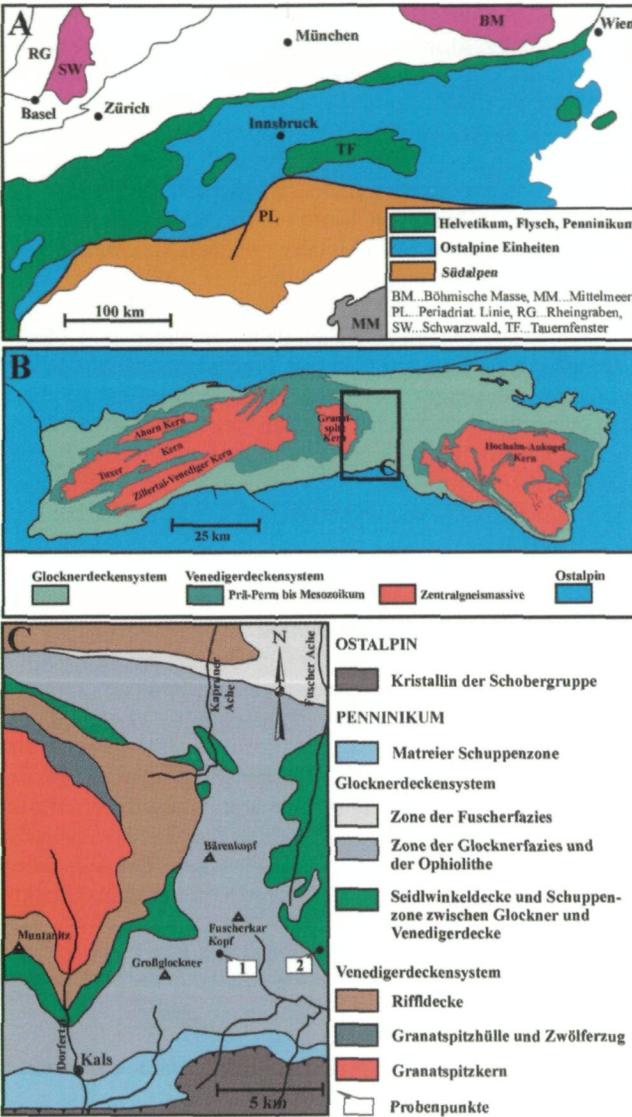


Abb. 1: A) Geologische Übersichtskarte der alpinen Großeinheiten (verändert, nach SELVERSTONE 1985) mit der Position des Penninischen Tauernfensters innerhalb des Ostalpinen Deckenkomplexes. B) Geologische Darstellung des Tauernfensters mit Gliederung in Glocknerdeckensystem (= Obere Schieferhülle) und Venedigerdeckensystem (= Zentralgneise und Untere Schieferhülle). C) Detaildarstellung des zentralen Tauernfensters laut geologischer Karte, Maßstab 1:50.000 (Blatt Grossglockner, Höck & PESTAL 1994). Änderungen der Nomenklatur und großtektonischen Zuordnung auf Basis von strukturgeologischen Ergebnissen sind bei KURZ et al. (1996) nachzulesen. Die Positionen der untersuchten Proben (1 = Probe 97/08, 2 = Probe 97/11) sind gekennzeichnet.

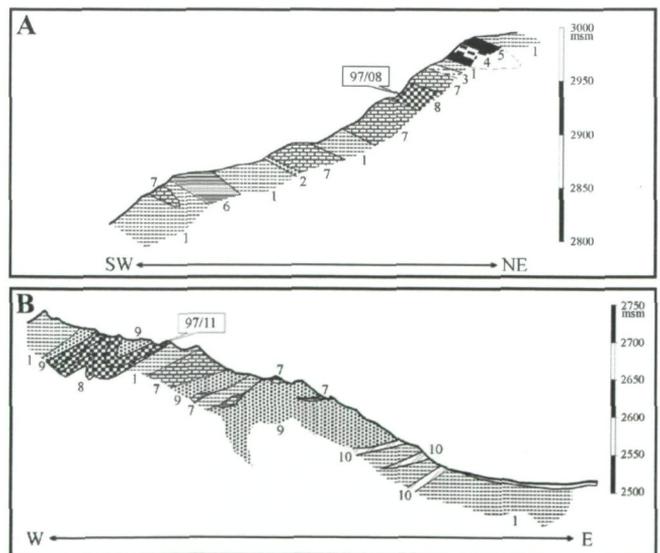
Schließung des Penninischen Ozeans gebildeten Subduktionszone in der späten Kreide beziehungsweise im Tertiär und lassen sich im Tauernfenster in zwei tektonostratigraphische Großeinheiten untergliedern (zum Beispiel: FRISCH et al. 1993). Im Liegenden befindet sich ein prävariszischer Gesteinskomplex (Venedigerdecken in Abb. 1B), welcher die Kruste des ehemaligen europäischen Kontinentalrandes repräsentiert und variszische Intrusiva granitischer, granodioritischer und tonalitischer Zusammensetzung („Zentralgneise“; Abb. 1B) enthält. Diese wiederum werden von den metamorphen Gesteinen der Unteren Schieferhülle umgeben sowie zum Teil von permomesozoischen Sedimenten bedeckt. Im Hangenden liegt ein mesozoischer Deckenstapel vor (Glockner-

erdecken in Abb. 1B beziehungsweise Obere Schieferhülle nach FRASL 1958), welcher ebenfalls als Teil des Kontinentalrandes oder des Penninischen Ozeanbodens anzusehen ist (zum Beispiel: MORTEANI 1974; HÖCK 1983; SELVERSTONE 1985). Die ozeanische Herkunft wird mit hoher Wahrscheinlichkeit durch das Auftreten basaltischer Metavulkanite und karbonatischer Glimmerschiefer (Bünderschiefer) belegt. Die in manchen geologischen Karten getrennt dargestellte Eklogitzone repräsentiert einen Metabasitreichen Abschnitt des europäischen Kontinentalrandes, welcher in größere Tiefen als die Gesteine der Oberen Schieferhülle subduziert wurde und als tektonische Einheit zwischen dem Venediger- und Glocknerdeckensystem eingeschaltet ist. In den vergangenen Jahren wurde die Deckengliederung des Tauernfensters auf der Basis umfangreicher tektonischer Studien neu diskutiert und teilweise auch modifiziert. Eine detaillierte Beschreibung der aktuellen Gliederung sowie ein Vergleich älterer und neuerer Deckennomenklaturen können bei KURZ et al. (1996) nachgelesen werden.

Die geographischen Positionen der beiden Untersuchungsgebiete sind in Abb. 1C dargestellt. Die erste Lokalität stellt ein im Bereich der Gamsgrube (ca. 1,5 km nördlich der Franz-Josefs-Höhe) verlaufender Gesteinszug dar, welcher auf Grund seines Gehaltes an feinkörnigen, retrograd überprägten Eklogitgesteinen bereits von CORNELIUS & CLAR (1939) ausführlich dokumentiert wurde. Ein Profil des „Eklogitzuges“ ist in Abb. 2A dargestellt und lässt erkennen, dass unterhalb der Hochdruckgesteine vor allem Granatglimmerschiefer, Kalkglimmerschiefer und für die Bündnerschiefer-Serie typische Grüngesteine zu Tage treten. Geologisch kann der Aufschluss im Bereich der Gamsgrube der Oberen Schieferhülle (Glocknerdecke sensu KURZ et al. 1996) zugeordnet werden. Der

**Abb. 2:** Geologische Profile durch die in den beiden Untersuchungsgebieten (A: Gamsgrube, B: Großer Margrötenkopf) zutage tretenden Gesteinseinheiten (vereinfacht nach CORNELIUS & CLAR 1939). Nummerierung:

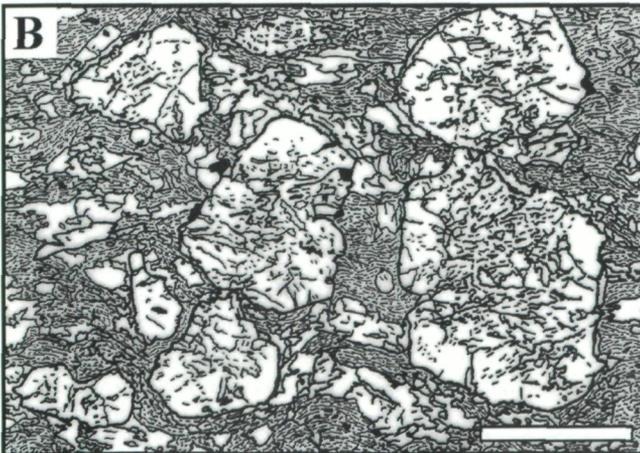
- 1...Kalkglimmerschiefer,
- 2...helle quarzitisches Glimmerschiefer,
- 3...Granatglimmerschiefer,
- 4...epidotreicher Prasinit,
- 5...Linsen von Epidosit,
- 6...dunkle, fast dichte schiefrige Prasinite,
- 7...helle grüne Prasinite,
- 8...eklogitischer Prasinit,
- 9...Granat-Chloritoid-Schiefer,
- 10...Karbonat-führender Quarzit.



zweite Probenpunkt liegt knapp unterhalb der Spitze des Großen Margrötzenkopfes, wo schon von CORNELIUS & CLAR (1939) auf das Vorkommen eines eklogitischen Prasinitis hingewiesen wurde (Abb. 2B). Die den Prasinit umrahmende Geologie wird hauptsächlich von Kalkglimmerschiefern und Chloritschiefern dominiert. Wie Abb. 1C zu entnehmen ist, kann die betreffende Lokalität der Seidlwinkeldecke (Rote Wand – Modereck Decke sensu KURZ et al. 1996), also ebenfalls der Oberen Schieferhülle zugeordnet werden.

### Analytische Methoden

Die für die vorliegende Studie relevante chemische Analyse der in den Grünsteinen enthaltenen reliktschen Granate erfolgte nach Herstellung polierter Mikrosondenschliffe am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Salzburg mit einer Elektronenstrahlmikrosonde des Typs Jeol JXA-8600 unter Verwendung des Wellenlängen-dispersiven Messsystems (3 Spektrometer, Kristalle: LiF, PET, TAP). Am Gerät wurden einheitlich eine Beschleunigungsspannung von



**Abb. 3:** Dünnschliffzeichnungen der beiden untersuchten Gesteinsproben. A) Eklogitischer Prasinit aus der Gamsgrube (97/08) mit größtenteils aus sehr feinem Symplektit bestehender Matrix, in welche die Hochdruckminerale (Granat, Paragonit, Omphazit, Na-Amphibol) eingebettet sind. B) Eklogitischer Prasinit unterhalb des Großen Margrötzenkopfes (97/11) mit symplektitischer beziehungsweise chloritischer Matrix und darin enthaltenem, reliktschen Granat, welcher deutliche Spuren eines randlichen retrograden Abbaues zeigt. Die in beiden Bildern gezeichneten Balken entsprechen jeweils 1 Millimeter.

15 kV, ein Strahlstrom von 20 nA sowie ein Durchmesser des Elektronenstrahls von ca. 1  $\mu\text{m}$  eingestellt. Die Zählzeiten für die Elementpeaks betragen jeweils 10 Sekunden, jene für den Hintergrund jeweils 3 Sekunden. Als Standards für die Hauptelementanalyse dienten natürlicher Quarz, Albit, Adular, Wollastonit, Pyrolusit, Rutil sowie synthetisches  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  und Fe. Die Korrektur der erhaltenen Analyserohdaten wurde systemintern nach der ZAF-Methode durchgeführt. Die nachfolgende Ermittlung der stöchiometrischen Formeln sowie Quantifizierung der Hauptkomponenten im Granat (Almandin, Pyrop, Spessartin, Grossular) erfolgte mit Hilfe eines in Microsoft Excel® erstellten Formelberechnungsprogrammes. Die chemische Zonierung im reliktschen Granat wurde im Detail für zwei Gesteinsproben (97/08, Gamsgrube; 97/11, Großer Margrötzenkopf) untersucht. Bei einem für die jeweilige Probe repräsentativen Granatkristall wurden dazu Punktanalysen nach Muster eines Rasters erstellt, wobei der Abstand zwischen zwei Messpunkten einheitlich auf 20  $\mu\text{m}$  eingestellt wurde. Die aus den Einzelmessungen gewonnene Information wurde in weiterer Folge zur Erstellung von Isokonzentrationskarten nach der Kriging-Methode für die vier oben beschriebenen Hauptkomponenten genutzt.

Zur Beschreibung eventueller, zum Beispiel im Zuge des Hebungsprozesses retrograd gebildeter Reaktionsgefüge wurden sowohl Dünnschliffphotographien angefertigt als auch Studien mit der Elektronenstrahlmikrosonde unter Einstellung des BSE-Modus (rückgestreute Elektronen) durchgeführt. Der Strahlstrom wurde zur besseren Unterscheidung einzelner Mineralphasen einheitlich von 20 auf 40 nA erhöht.

## Ergebnisse

### Petrographie der beiden untersuchten Gesteinsproben

Die Petrographie der eklogitischen Relikte aus den beiden Untersuchungsgebieten wurde bereits ausführlich von CORNELIUS & CLAR (1939), STURM et al. (1997) sowie DACHS & PROYER (2001) dokumentiert, sodass in der vorliegenden Studie zum allgemeinen Verständnis nur noch ein kurzer Überblick gegeben wird. Die im Bereich der Gamsgrube analysierte Gesteinsprobe (97/08) repräsentiert einen eher feinkörnigen eklogitischen Prasinit (Abb. 3A) mit der typischen Hochdruckassoziation Granat – Omphazit (Jadeit-Gehalt: 38 bis 45 %) – Paragonit – Na-Amphibol ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalt: 4 bis 7 %). Die im Zuge der Tauernkristallisation gebildete Matrixparagenese setzt sich hauptsächlich aus Epidot/Klinozoisit, symplektitischer Ca-Mg-Hornblende, Plagioklas (Albit-Gehalt: > 90 %), Chlorit, Quarz, Dolomit und Magnetit zusammen. Der reliktsche Granat hat zumeist seine idiomorphe Form vollständig erhalten (Abb. 7A) und besitzt eine Vielzahl von unterschiedlich großen Einschlüssen (Epidot, Na-Amphibol, Omphazit, Quarz, Plagioklas, Rutil, Ilmenit) mit konstanter oder

variabler Häufigkeit vom Kern zum Rand. Anisometrische Einschlussphasen zeigen in vielen Fällen eine einheitliche Regelung. Das untersuchte eklogitische Reliktgestein aus dem Gebiet des Großen Margrötzenkopfes (97/11; Abb. 3B) ist einerseits durch die Hochdruckparagenese Granat – Na-Amphibol ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalt: 4 bis 5 %) – Paragonit und andererseits durch die in der Matrix vorliegenden Mineralassoziation Chlorit – Mg-Ca-Hornblende – Plagioklas (Albit-Gehalt: > 90 %) – Epidot/Klinozoisit gekennzeichnet. Der Granat besitzt etwa die gleiche Größe wie in Probe 97/08, tritt jedoch in höherer Dichte im Gestein auf. Seine ursprüngliche Idiomorphie ist vielfach als Folge randlicher Abbaureaktionen (vornehmlich zu Chlorit) verloren gegangen (Abb. 3B). Das Mineral enthält für gewöhnlich eine Vielzahl von Einschlussphasen (Epidot, Glaukophan, Paragonit, Quarz, Ilmenit, Chlorit), die sich meist auf das Granatzentrum konzentrieren und – wie im Falle der Probe 97/08 – eine signifikante Regelung aufweisen können.

### Chemismus und Zonierung der Granate in den Hochdruckrelikten

Die Ergebnisse der chemischen Granatanalyse sind in den Abb. 4 bis 6 zusammengefasst. Grundsätzlich sind die untersuchten Granate in ihrer Zusammensetzung durch eine Dominanz der Almandin-Komponente ( $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) gekennzeichnet, deren Gehalt zwischen 55 und 65 % variiert. Der mengenmäßig an zweiter Stelle stehende Grossular ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) bewegt sich im Bereich zwischen 20 und 25 %, während Pyrop ( $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) und Spessartin ( $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) in ihrer Konzentrationen je nach Lage des Messpunktes und betrachteter Gesteinsprobe zwischen 6 und 14 % beziehungsweise 1 und 15 % schwanken können.

Die Granatkristalle im eklogitischen Reliktgestein aus der Gamsgrube (Probe 97/08) zeigen im Allgemeinen eine deutliche konzentrische Zonierung, welche relativ gleichmäßig vom Kern bis zum Rand verläuft und nur bei sehr vereinzelt Körnern durch Sprungstellen bezüglich der Konzentration einzelner Komponenten charakterisiert ist. Im Granatkern liegt eine durchschnittliche Zusammensetzung der Form  $\text{Alm}_{58}\text{Gro}_{25}\text{Pyp}_5\text{Sps}_{13}$  vor, welche am Rand in folgenden Chemismus übergeht:  $\text{Alm}_{63}\text{Gro}_{23}\text{Pyp}_{11}\text{Sps}_3$  (Abb. 4A). Die Visualisierung der chemischen Zonierung anhand von Isokonzen-

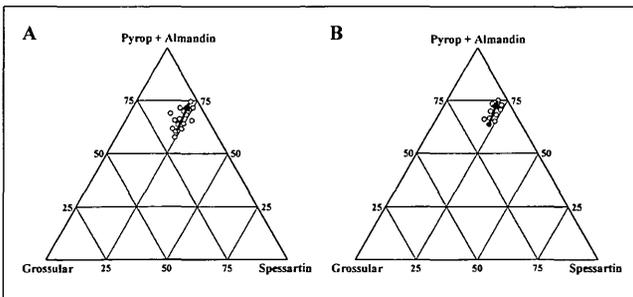
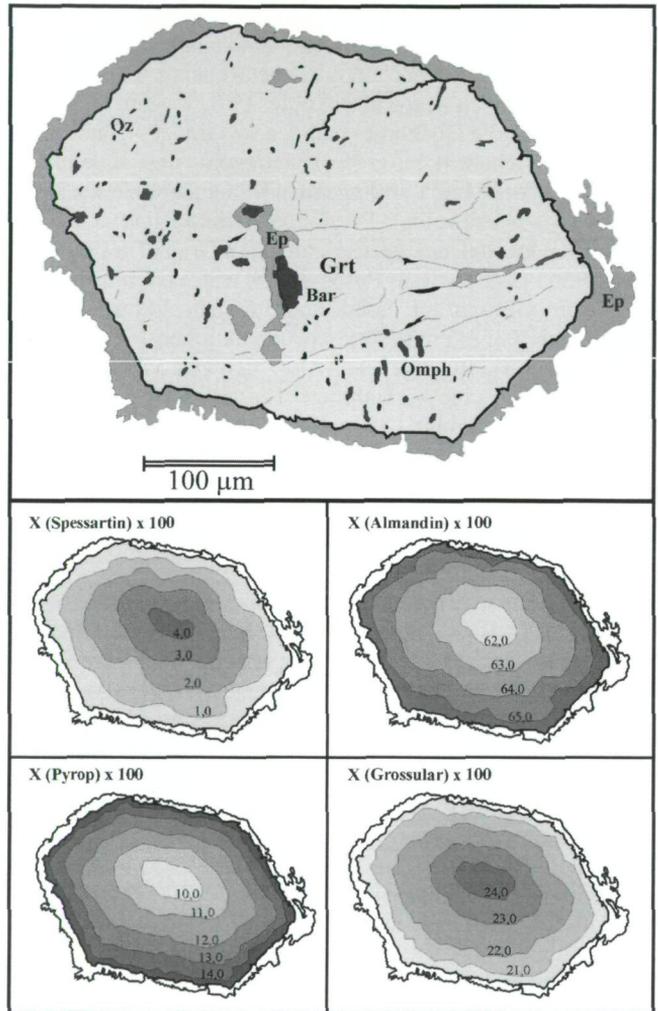


Abb. 4: Chemische Zusammensetzung der analysierten Granate (A: Probe 97/08, B: Probe 97/11). Die in den Dreiecksdiagrammen dargestellten Punkte repräsentieren Kern- und Randchemismen analysierter Kristalle, während die Pfeile einen daraus resultierenden durchschnittlichen chemischen Trend vom Granatkern zum Rand zeigen.

Abb. 5: Oben: Übersichtsdarstellung des im Detail chemisch analysierten Granates im eklogitischen Prasinit aus der Gamsgrube mit seinen Einschlussphasen sowie einer typischen, infolge retrograder Abbaureaktionen entstandenen Corona aus Epidot.

Unten: Isokonzentrationskarten der vier Granatkomponenten Spessartin, Almandin, Pyrop und Grossular. Abkürzungen: Grt...Granat, Ep...Epidot, Omph...Omphazit, Bar...Barroisit, Qz...Quarz.



trationskarten wurde an einem Granatkorn vorgenommen, welches in relativ homogener Art und Weise von Einschlüssen (vor allem Epidot/Klinozoisit, Omphazit und Quarz) durchsetzt ist und von einer typischen, durch retrograde Umwandlungsreaktionen entstandenen Epidot-Corona umgeben wird (Abb. 5, oberes Übersichtsbild). Wie die Isolinien darstellungen der Abb. 5 zeigen, nimmt der Spessartingehalt im analysierten Kristall in Richtung Kern gleichmäßig von < 1 % auf > 4 % zu. Eine Zunahme kann auch für die Grossular Komponente dokumentiert werden (< 21 % auf > 24 %), wohingegen Almandin- und Pyropgehalt einer deutlichen Abnahme unterliegen (> 65 % auf < 62 %; > 14 % auf < 10 %).

Die Granate des eklogitischen Prasinit auf dem Großen Margrötzenkopf (Probe 97/11) sind ebenfalls durch eine konzentrische chemische Zonierung ohne größere, durch Diffusionsprozesse hervorgerufene Unstetigkeiten gekennzeichnet.

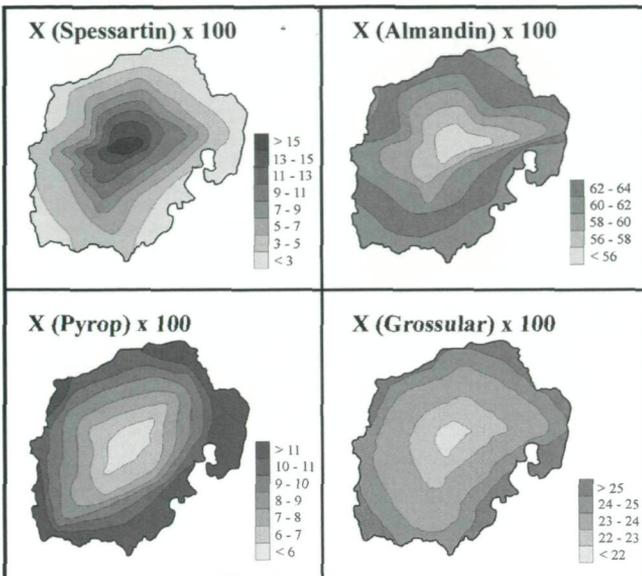


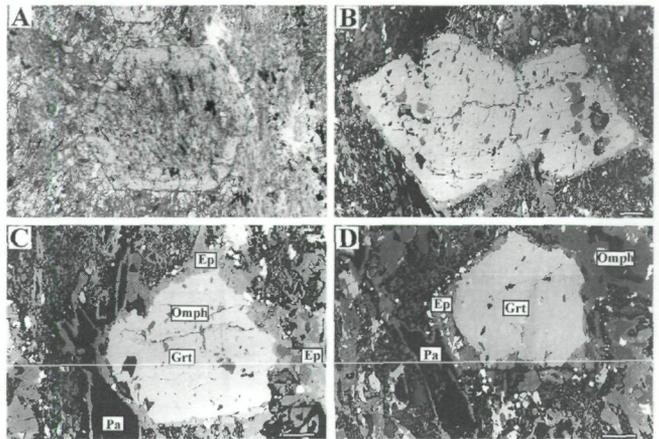
Abb. 6: Isokonzentrationskarten der vier Granatkomponenten für einen repräsentativen Kristall (Durchmesser etwa 1 mm) des eklogitischen Prasinitis im Bereich des Großen Margrötzenkopfes.

Die durchschnittliche Zusammensetzung im Granatkern lautet  $\text{Alm}_{57}\text{Gro}_{23}\text{Pyp}_6\text{Sps}_{14}$  und geht gegen den Rand hin allmählich in  $\text{Alm}_{63}\text{Gro}_{21}\text{Pyp}_{13}\text{Sps}_4$  über (Abb. 4B). Der für die Isokonzentrationsdarstellungen der einzelnen Komponenten herangezogene Kristall hat bereits einen fortgeschrittenen randlichen Abbau zu Chlorit erfahren, welche jedoch die Zonierung nur in geringer Weise beeinflusst hat (Abb. 6). Der Spessartingehalt zeigt in Richtung zum Granatkern einen sehr starken Anstieg von < 3 % auf > 15 %, während alle anderen Komponenten mehr oder weniger deutlich in ihrer Konzentration abnehmen (Almandin: 64 % auf < 56 %; Pyrop: > 11 % auf < 6 %; Grossular: > 25 % auf < 22 %). Almandin lässt am äußersten Rand des analysierten Kristalls einen leicht inversen Trend erkennen, welcher mit einer Abnahme seines Gehaltes von 64 % auf etwa 62 % beziffert werden kann.

### Randliche Abbaureaktionen des Granats

Wie bereits in Abb. 5 schematisch angedeutet wurde, sind einzelne Granate in der Gesteinsprobe der Gamsgrube (97/08) von einem Reaktionssaum umschlossen, welcher sich hauptsächlich aus Epidot sowie untergeordnet aus Albit, Ca-Mg-Hornblende und Magnetit zusammensetzt. BSE-Photographien dieser Corona-Texturen sind in den Abb. 7B – D dargestellt. Ähnliche Reaktionssäume sind in vielen Fällen um in der Matrix liegende Paragonit- und Omphazitkristalle ausgebildet (Abb. 7C, D). Chemisch unterscheidet sich der die Corona aufbauende Epidot von jenem im Granat und in der Matrix durch einen signifikant erhöhten Gehalt an  $\text{Fe}^{3+}$  mit Al- $\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnissen zwischen 2,5:0,5 und 2,0:1,0. Die ebenfalls im Saum zu beobachtenden Phasen von Albit, symplektiti-

Abb. 7: A) Dünnschliffphotographie eines idiomorphen Granats (Größe: 1,5 mm) in Probe 97/08 mit Einschlussreichem Kernbereich und eher Einschlussfreiem Rand. B – C: BSE-Bilder typischer um Granat (Grt), Omphazit (Omph) und Paragonit (Pa) verlaufender Reaktionssäume aus Epidot (Ep) sowie untergeordnet aus Albit, Ca-Mg-Hornblende und Magnetit (helle Phasen in der Epidot-Corona von Bild D). Die in den Photos gezeichneten Balken entsprechen jeweils 100 Mikrometer.



scher Hornblende und Magnetit deuten auf eine allgemeine retrograde Abbaureaktion der Form



unter Einfluss einer Fluidphase und zunehmend oxidierenden Bedingungen hin.

### Diskussion

Im Allgemeinen können bei den Granaten der untersuchten Proben vom Rand in Richtung Kern sowohl ein typischer glockenförmiger Anstieg der Spessartinkomponente als auch eine kontinuierliche Verringerung der Almandin- und Pyropkonzentrationen beobachtet werden. Die Grossularkomponente verhält sich zwar im Durchschnitt bei beiden Proben etwa gleich (Abb. 4), zeigt jedoch bei den im Detail analysierten Granaten der Abb. 5 und 6 konträre Tendenzen. Im Granat der Probe 97/08 nimmt der Grossulargehalt vom Rand zum Zentrum hin deutlich zu, im entsprechenden Kristall der Probe 97/11 ist hingegen eine Abnahme erkennbar. Die aus den Analysen gewonnenen und in Abb. 4 dargestellten Zusammensetzungen können als charakteristisch für eklogitische Granate klassifiziert werden, welche stets Almandin-reich (60 bis 70 mol%) sind und einen Grossulargehalt zwischen 20 und 30 % besitzen. Pyrop (bis 15 %) und Spessartin (5 bis 20 %) dagegen treten in ihrer Bedeutung meist etwas zurück (z. B.: DACHS 1986; STURM et al. 1997; STURM 1999; DACHS & PROYER 2001). Ähnliche Angaben werden auch für Granate in Hochdruckgesteinen der Westalpen gemacht (siehe Überblick in CARSWELL 1990). Der Einfluss von Einschlussphasen und randlich koexistierenden Mineralen auf die chemische Zonierung ist bei beiden analysierten Granaten als insignifikant zu bewerten (< 0,5 %), kann jedoch den Studien von TRACY et al. (1976) und SPEAR et al. (1990) zufolge vor allem bei aufsteigenden metamorphen Bedingungen und verstärkt eintretenden Diffusionsprozessen einen nicht unwesentlichen Effekt besitzen.

Chemische Zonierung im Granat tritt im Allgemeinen in zwei Formen auf (SPEAR 1993): 1.) als Wachstumszonierung, bei welcher einzelne Zonen wechselnde externe Bedingungen (Druck, Temperatur, etc.) widerspiegeln, und 2.) als Diffusionszonierung, welche eine Modifikation der existierenden Granatzusammensetzung infolge von Diffusionsprozessen hervorruft und ebenfalls von externen Faktoren (hauptsächlich Temperatur) gesteuert wird. Letztere Form der Zonierung spielt vor allem bei hochtemperierten Metamorphoseereignissen (Granulit-Fazies) eine entscheidende Rolle. Auf Basis einer Wachstumszonierung im Granat, welche im Laufe nachfolgender Überprägungen möglichst unverändert geblieben ist, stellten SPEAR und SELVERSTONE (1983) eine Methode vor, mit deren Hilfe Druck- und Temperaturänderungen während des Granatwachstums als Funktion der lokalen Konzentrationen von Almandin, Grossular und Spessartin dargestellt werden ( $T = T(X_{\text{Alm}}^{\text{Grt}}, X_{\text{Sps}}^{\text{Grt}}, X_{\text{Gro}}^{\text{Grt}})$ ;  $P = P(X_{\text{Alm}}^{\text{Grt}}, X_{\text{Sps}}^{\text{Grt}}, X_{\text{Gro}}^{\text{Grt}})$ ). Eine Anwendung dieses Modells wurde bislang unter anderem von SELVERSTONE et al. (1984) beschrieben. Analog zur Studie von SELVERSTONE et al. (1984) ist bei beiden Granaten vom Kern zum Rand eine Abnahme des Verhältnisses  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  zu verzeichnen. Dies führt unter Einbeziehung der übrigen, oben ausführlich dargestellten Tendenzen zu dem Schluss, dass das Granatwachstum am prograden Ast eines im Uhrzeigersinn verlaufenden P-T-Pfades erfolgte. Diese Aussagen sind allerdings auf Grund zahlreicher Einschränkungen (Diffusion, Ungleichgewichte während des Wachstums) mit Unsicherheiten behaftet.

### Literatur:

- CARSWELL, D. A. (1990): Eclogite Facies Rocks. – 396 S., Blackie and Son Ltd., Glasgow, London.
- CORNELIUS, H. P. & E. CLAR (1939): Geologie des Großglocknergebietes (I. Teil). – Abhandlungen der Zweigstelle Wien, Reichsstelle für Bodenforschung (Geologische Bundesanstalt), 25.:1–305, Wien.
- DACHS, E. (1986): High-pressure mineral assemblages and their breakdown products in metasediments south of the Grossvenediger, Tauern Window, Austria. – Schweizerische Mineralogisch-Petrographische Mitteilungen, 66.:145–161, Zürich.
- DACHS, E. (1990): Geothermobarometry in metasediments of the southern Grossvenediger area (Tauern Window, Austria). – Journal of metamorphic Geology, 8.:217–230, Boston.
- DACHS, E. & A. PROYER (2001): Relics of high-pressure metamorphism from the Grossglockner region, Hohe Tauern, Austria: Paragenetic evolution and P-T-paths of retrogressed eclogites. – European Journal of Mineralogy, 13.:67–86, Stuttgart.
- FRANZ, G. & F. S. SPEAR (1983): High pressure metamorphism of siliceous dolomites from the Central Tauern Window, Austria. – American Journal of Science, 283.:396–413, New Heaven.
- FRASL, G. (1958): Zur Seriengliederung der Schieferhülle in den Mittleren Hohen Tauern. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 101.:323–472, Wien.
- FRISCH, W., G. VAVRA & M. WINKLER (1993): Evolution of the Penninic basement of the Eastern Alps: 349–360. – In: RAUMER, F. J. & F. NEUBAUER (1993): Pre-Mesozoic Geology of the Alps. – Springer-Verlag, Heidelberg.

- HÖCK, V. (1983): Mesozoic Ophiolites and non-ophiolitic metabasites in the central part of the Tauern Window (Eastern Alps, Austria). – *Ofioliti*, 8/1.:103–126, Rom.
- HÖCK, V. & G. PESTAL (1994): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, 153 Grossglockner. – Geologische Bundesanstalt, Wien.
- HOLLAND, T. J. B. (1979): High water activities in the generation of high pressure kyanite eclogites of the Tauern Window, Austria. – *Journal of Geology*, 87/1.:1–27, Chicago.
- INGER, S. & R. A. CLIFF (1994): Timing of Metamorphism in the Tauern Window, Eastern Alps: Rb-Sr-ages and Fabric Formation. – *Journal of metamorphic Geology*, 12.:695–707, Boston.
- KURZ, W., F. NEUBAUER & J. GENSER (1996): Kinematics of Penninic Nappes (Glockner Nappe and Basement-cover Nappes) in the Tauern Window (Eastern Alps, Austria) during Subduction and Penninic-Austroalpine Collision. – *Ecolgae geologiae Helvetiae*, 89.:573–605, Basel.
- MILLER, CH. (1974): On the metamorphism of the eclogites and high-grade blueschists from the Penninic terrain of the Tauern Window, Austria. – *Schweizerische Mineralogisch-Petrographische Mitteilungen*, 54.:371–384, Zürich.
- MORTEANI, G. (1974): Petrology of the Tauern Window, Austrian Alps. – *Fortschritte in der Mineralogie*, 52.:195–220, Berlin.
- PROYER, A., E. DACHS & W. KURZ (1999): Relics of high-pressure metamorphism from the Großglockner region, Hohe Tauern, Austria: The textural and mineral chemical evolution of retrogressed eclogites. – *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 90.:43–55, Wien.
- RAITH, M., CH. MEHRENS & W. THÖLE (1980): Gliederung, tektonischer Bau und metamorphe Entwicklung der penninischen Serien im südlichen Venedig-Gebiet, Osttirol. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 123/1.:1–37, Wien.
- SILVERSTONE, J. (1985): Petrologic constraints on imbrication, metamorphism and uplift in the SW Tauern Window, Eastern Alps. – *Tectonics*, 4.:687–704, Amsterdam.
- SILVERSTONE, J., F. S. SPEAR, G. FRANZ & G. MORTEANI (1984): High-pressure metamorphism in the SW Tauern Window, Austria: P-T paths from hornblende – kyanite – staurolite schists. – *Journal of Petrology*, 2.:501–531, Oxford.
- SPEAR, F. S. (1993): *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths.* – 799 S., Mineralogical Society of America Monograph, Washington, D. C.
- SPEAR, F. S. & J. SILVERSTONE (1983): Quantitative P-T paths from zoned minerals: Theory and tectonic applications. – *Contribution of Mineralogy and Petrology*, 83.:348–357, Heidelberg.
- SPEAR, F. S., M. J. KOHN, F. FLORENCE & T. MENARD (1990): A model for garnet and plagioclase growth in pelitic schists: Implications for thermobarometry and P-T path determinations. *Journal of metamorphic Geology*, 8.:683–696, Boston.
- STURM, R. (1999): Untersuchung reliktscher Hochdruckparagenesen in Gesteinen des Dorfertales (Kaiser Tal, Osttirol). – *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Nationalpark Hohe Tauern*, 5.:7–21, Matriel.
- STURM, R. & E. DACHS (1996): Mineralchemische Untersuchungen von eklogitfazialen Reliktparagenesen in Grüngesteinen des Großglocknergebietes (Tauernfenster, Österreich). – Beihefte zum *European Journal of Mineralogy*, 8/1.:281, Stuttgart.
- STURM, R., E. DACHS & W. KURZ (1997): Untersuchung von Hochdruckrelikten in Grüngesteinen des Großglockner-Gebietes (zentrales Tauernfenster, Österreich): Erste Ergebnisse. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 3/4.:345–363, Stuttgart.
- TRACY, R. J., P. ROBINSON & A. B. THOMPSON (1976): Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts. – *American Mineralogist*, 61.:762–775, Washington, D. C.