

**DIE MINERALOGIE DER  
GRANAT-KORUND-PARAGENESE  
VON LÖLLING, SAUALPE, KÄRNTEN**

Hermine Lenitz<sup>1</sup>, Anton Beran<sup>1</sup>, Robert Seemann (†)<sup>2</sup> & Friedrich Koller<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mineralogie und Kristallographie, Universität Wien, Althanstraße 14, 1090 Wien

<sup>2</sup>Naturhistorisches Museum Wien, Mineralogisch-Petrographische Abteilung, Burgring 7, 1010 Wien

<sup>3</sup>Department of Lithospheric Research, Universität Wien, Althanstraße 14, 1090 Wien

**Abstract**

An unusual occurrence of a garnet-corundum-paragenesis is located near Lölling, Carinthia, in the Saualpe region which belongs to the Upper Austroalpine nappe system. This paragenesis occurs at the contact between an ultramafic body, consisting of serpentine and talc and the neighbouring staurolite-garnet-micaschists. Also marbles occur close to the metasomatic contact zones which consist of the paragenesis garnet + corundum + margarite + chlorite + epidote-clinozoisite and corundum + margarite + chlorite. In comparison with the almandine-rich garnets of the micaschists, the garnets of the contact zone, with sizes coming up to several centimetres, are enriched in grossular. The water content of these garnets amount to 90 wt.ppm. Corundum is partly free of inclusions and sporadically shows the colour of blue sapphire. The presence of sub-microscopic inclusions of diaspore in corundum has been established by IR spectroscopy.

The metasomatic contact zones evolved from the quartz-bearing staurolite-garnet-micaschist by progressive loss of  $\text{SiO}_2$  to the Si-deficient ultramafic rock. Desilification of plagioclase results in the formation of margarite with varying paragonite components. The marbles present an additional source for Ca which is required for the formation of grossular-rich garnet. In a further step of desilification corundum is formed. Fe provided by the almandine-rich garnets and the Fe-rich staurolites of the micaschists enables the formation of chlorite and epidote-clinozoisite.

**Zusammenfassung**

Ein ungewöhnliches Vorkommen einer Granat-Korund-Paragenese liegt bei Lölling, Kärnten, im Gebiet der zum Oberostalpinen Deckensystem gehörigen Saualpe. Diese Paragenese kommt am Kontakt eines ultramafischen, aus Serpentin und Talk bestehenden Gesteinskörpers zu den angrenzenden Staurolith-Granat-Glimmerschiefern vor. Auch Marmore finden sich nahe der metasomatischen Kontaktzone, die aus den Paragenesen Granat + Korund + Margarit + Chlorit + Epidot-Klinozoisit und Korund + Margarit + Chlorit aufgebaut werden. Im Vergleich mit den

Almandin-reichen Granaten der Glimmerschiefer, sind die Granate der Kontaktzone, die oft eine Größe von mehreren Zentimetern erreichen, reicher an Grossular. Der Wassergehalt dieser Granate beträgt etwa 90 ppm. Korund ist bereichsweise frei von Einschlüssen und zeigt vereinzelt die Farbe eines blauen Saphirs. Sub-mikroskopische Einschlüsse von Diaspor wurden im Korund IR spektroskopisch nachgewiesen.

Die metasomatischen Kontaktzonen entwickelten sich vom Quarz-führenden Staurolith-Granat-Glimmerschiefer durch fortschreitenden  $\text{SiO}_2$  Verlust zum Si-defizienten ultramafischen Gestein. Die Desilifizierung von Plagioklas führt zur Bildung von Margarit mit variierender Paragonit-Komponente. Die Marmore bilden eine zusätzliche Quelle für Ca, das für die Bildung Grossular-reicher Granate notwendig ist. In einem weiteren Schritt der Desilifizierung wird Korund gebildet. Fe wird von den Almandin-reichen Granaten und den Fe-reichen Staurolithen der Glimmerschiefer zur Verfügung gestellt und ermöglicht die Bildung der Chlorite und Epidot-Klinozoisite.

## Einleitung

Mit großer Wahrscheinlichkeit sind schon im 18. Jahrhundert Granate in ungewöhnlicher Größe von der Saualpe bekannt gewesen. Ursprünglich wurden Stuwalpe und Steiermark als Fundpunkte angegeben. Allerdings bestand schon lange der Verdacht, dass es sich beim steirischen Granat um Material von der Saualpe handelt; durch SEELAND (1878) wurde ein entsprechendes Vorkommen beim „Unteren Grabner“ bei Löffling in Kärnten lokalisiert. MEIXNER (1952) hat diesen Granat einem Glimmerschiefer-Almandin zugeordnet. (Eine ausführliche Beschreibung einer im Zeitraum 1797-1806 inventarisierten Dose aus einem Granat von der Saualpe in der Edelsteinsammlung des Naturhistorischen Museums in Wien geben NIEDERMAYR & BRANDSTÄTTER (1997) und können diese eindeutig dem Granat von Löffling zuordnen. Die Dose misst etwa 7,5 x 5,0 x 3,0 cm und ist bei einer mittleren Wandstärke von 2,4 mm aus einem Stück gearbeitet). Im Zuge geologischer Neuaufnahmen wurde von THIEDIG (1962) auf die im Zusammenhang mit den „klassischen“ Granat-Porphyroblasten stehenden – und im Saualpenraum bisher unbekannten – Korundvorkommen hingewiesen. MEIXNER (1967) gibt eine kurze Beschreibung der die Gesamtparagenese bestimmenden Minerale; diese sind Almandin (in zwei Generationen), Prochlorit, Ilmenit, Korund (auch in Form von Kristallen), Staurolith, Disthen, Spinell,  $\beta$ -Zoisit, Margarit (als große tafelige Kristalle), Bornit und Kupferkies. Im Zusammenhang mit der Bestimmung der „Granatdose“ wurden von NIEDERMAYR & BRANDSTÄTTER (1997) erste Mikrosondenmessungen der Saualpen-Granate durchgeführt. SEEMANN & KOLLER (1998) bestimmten deren mehrphasigen Zonarbau und geben auf Grundlage der Arbeiten von THIEDIG (1962) und MEIXNER (1967) eine erweiterte, zusammenfassende Beschreibung der Begleitminerale zur Granat-Korund-Paragenese. Die petrologisch orientierten Arbeiten von ECKE et al. (2003) und von RIESCO et al. (2005) behandeln die im Zusammenhang mit dieser Mineralparagenese stehenden genetischen Fragestellungen. LENITZ (2008) gibt in ihrer Dissertation eine detaillierte Übersicht über die Mineralchemie der Granat-Korund-Gesteine.

## **Geographischer Überblick**

Das Untersuchungsgebiet liegt innerhalb der sich von Norden nach Süden erstreckenden Saualpe, die im Westen vom Görtschitztal und im Osten vom Lavanttal begrenzt wird. Das Terrain dieses Gebietes ist durch sanft ansteigende Berge bis zu einer Höhe von etwa 2080 m charakterisiert. Die Gesteins- und Mineralproben der untersuchten Granat-Korund-Paragenese von Lölling stammen aus dem Gebiet des Pusygrabens ( $N\ 46^{\circ}54'35''$ ,  $E\ 14^{\circ}34'05''$ ) und liegen auf einer Seehöhe von 925 m. Der Pusygraben mit dem auch als Fundstelle angegebenen ehemaligen Gehöft ‚Unterer Grabner‘ (siehe oben) bildet die seitliche Fortsetzung des vom Görtschitztal nach Osten abzweigenden Löllinger Grabens. Lölling gehört zur Marktgemeinde Hüttenberg und ist ein von der historischen Eisenverarbeitung geprägter Ort, der in nächster Nähe zum Fundpunkt liegt.

## **Geologischer Überblick**

Den geologischen Rahmen bildet das Koralpen-Wölz Deckensystem, das eine Vergesellschaftung von im genetischen Zusammenhang stehenden oberostalpinen Deckensystemen darstellt. Dabei handelt es sich um hoch- bis mittel-gradige metamorphe Einheiten, sowie um Einheiten paläozoischen Alters mit mittlerem bis niedrigem Metamorphosegrad, und um nicht-metamorphe permo-triadische bis kretazische Sedimente (SCHUSTER et al., 2004, MILLER et al., 2005). Das mächtige prä-alpine, paläozoische Grundgebirge der Saualpe wird aus Gesteinen der Eklogit- und oberen Amphibolit-Fazies aufgebaut. Die darüber liegende, und für die untersuchte Granat-Korund-Paragenese relevante Einheit der Plankogelserie setzt sich aus Gesteinen in Grünschiefer- und Amphibolit-Fazies zusammen.

Nach FRISCH et al. (1989) lässt sich die nach dem, nahe Hüttenberg gelegenen, Plankogel benannte Serie in zwei zum Teil intensiv verschuppte Teileinheiten untergliedern, nämlich in eine Serpentinit- und eine Manganquarzitserie. Die in der regionalen Verbreitung dominierende Serpentinitserie besteht vorwiegend aus Staurolith-Granat-Glimmerschiefern mit Einschaltungen von Serpentiniten, Marmoren und Granat-Amphiboliten mit einem tholeitbasaltischen Chemismus. Die Granat-Korund-Gesteine liegen im Kontaktbereich der Serpentinitkörper zum Glimmerschiefer. Die die Manganquarzitserie dominierenden Biotit-Plagioklas-Glimmerschiefer enthalten Einschaltungen von Amphiboliten mit alkalibasaltischem Chemismus, Silikatmarmoren und Spessartin-führenden Quarziten.

## **Probennahme und Arbeitsmethoden**

Die Gesteins- und Mineralproben der Granat-Korund-Gesteine stammen aus dem direkten Kontaktbereich zwischen dem Serpentinitkörper und dem Staurolith-Granat-Glimmerschiefer. Der Serpentinitkörper selbst, der umgebende Glimmerschiefer sowie die eingeschalteten Marmore und Amphibolite wurden ebenfalls beprobt. Um eine möglichst genaue Lokalisierung der Proben zu erreichen, wurde eine Detailkartierung im Gebiet des Pusygrabens im Maßstab etwa 1:15000 vorgenommen. In Tabelle 1 sind die Probennummern, die Bezeichnung und eine Kurzbeschrei-

*Tabelle 1: Probennummern, Bezeichnung und Kurzbeschreibung der Gesteinsproben sowie makroskopisch erkennbarer Mineralbestand.*

| Probennummern   | Bezeichnung und Beschreibung der Gesteinsproben                      | Makroskopisch erkennbarer Mineralbestand           |
|-----------------|--|--|
| 00-02a,b; 11-03 | <i>Granat-Korund-Kontaktgestein</i><br>dunkelgrün, massig-dicht      | <i>Granat, Korund, Chlorit,</i><br><i>Margarit</i> |
| 06-02a,b,g      | <i>Granat-Korund-Kontaktgestein</i><br>heller grün, massig-schiefrig | <i>Granat, Korund, Chlorit,</i><br><i>Margarit</i> |
| 03-03           | <i>Granat-Amphibolit</i><br>braun-dunkelgrün, massig                 | <i>Amphibol, Granat</i>                            |
| 08-03           | <i>Serpentinit</i><br>graugrün, massig-dicht                         | <i>Serpentin</i>                                   |
| 09-02           | <i>Staurolith-Granat-Glimmerschiefer</i><br>grau, stark geschiefer   | <i>Granat, Hellglimmer, Quarz</i>                  |
| 13-02           | <i>Marmor</i><br>weiß-grau, fein- bis grobkörnig                     | <i>Calcit, Hellglimmer, Graphit</i>                |

bung der ausgewählten und näher untersuchten Gesteinsproben sowie der makroskopisch erkennbare Mineralbestand des Probenmaterials zusammengefasst.

Für die mikroskopischen Untersuchungen wurden zahlreiche Dünnschliffe sowie einige Anschliffe angefertigt. Für die spektroskopischen Untersuchungen wurden von isolierten Granat- und Korundkristallen beidseitig polierte, frei-tragende Dünnschliffe hergestellt.

Die Analyse der Haupt- und Spurenelemente der Gesteinsproben wurde mittels Röntgenfluoreszenz-Analytik durchgeführt, wofür ein Philips PW 2400 Gerät zur Verfügung stand. Die Auswertung der Hauptelement-Analysen wurde mit dem Programm MAJORS (PETRAKAKIS & NAGL, 1993) vorgenommen, die der Spurenelement-Analysen mit dem Programm TRACES (PETRAKAKIS & NAGL, 1998). Für die meisten Spurenelemente wurde eine Nachweisgrenze von etwa  $</= 2 \text{ ppm}$  erreicht, für die Hauptelement-Oxide lag die Nachweisgrenze bei etwa  $</= 0,02 \text{ Gew.\%}$ .

Die Bestimmung des Chemismus einzelner Mineralkörper wurde an einer CAMECA SX 100 Elektronenstrahl-Mikrosonde bei 15 kV Arbeitsspannung und 20 nA Probenstrom durchgeführt; der Strahlenquerschnitt betrug 3  $\mu\text{m}$ , die Messzeit 20 sec. Es wurden sowohl natürliche Mineralstandards als auch synthetische Standards verwendet. Die analytischen Daten wurden PAP-korrigiert. Die unten diskutierte chemische Zusammensetzung einzelner Mineralphasen basiert auf einer Gesamtzahl von etwa 500 Punktanalysen. Für weitergehende Untersuchungen stand ein Raster-Elektronenmikroskop JEOL 6400 zur Verfügung, mit dem mittels rückgestreuter Elektronen entsprechende BSE-Bilder bei einer Arbeitsspannung von 15 kV erzeugt wurden.

Die IR spektroskopischen Untersuchungen wurden mit einem Perkin-Elmer FTIR Spektrometer 1760 X, unter Verwendung einer keramischen Lichtquelle und eines

TGS Detektors vorgenommen. Die Untergrund- und Probenmessungen erfolgten mit jeweils 25 ‘scans’ bei einer Auflösung von  $4\text{ cm}^{-1}$ . Die Größe des Messfeldes lag jeweils im Bereich weniger  $\text{mm}^2$ .

## Ergebnisse

### Petrographie der Umgebungsgesteine

#### *Granat-Amphibolit*

Im frischen Bruch sind die meist stark verwitterten braunen Amphibolite (Probe 03-03) dunkel graugrün gefärbt. Es sind mehrere mm große Amphibole und chloritierte Granate erkennbar (Tabelle 1). Die Gesteine finden sich als Einschaltungen in den Staurolith-Granat-Glimmerschiefern, aber auch bruchstückartig sowohl in den Serpentiniten als auch in den Granat-Korund-Gesteinen. Im Dünnschliff zeigen die grünen Amphibole Einschlüsse von Klinozoisit, Chlorit und Hellglimmer. Quarz zeigt ein ungleichförmiges Gefüge mit xenomorphen Kornformen. Als akzessorische Gemengteile konnten Rutil, Titanit und Ilmenit beobachtet werden. Aus Mikrosondenanalysen ergibt sich für die Granate eine durchschnittliche Zusammensetzung von (Almandin 59, Pyrop 17, Spessartin 4, Grossular 20). Bei den Amphibolen handelt es sich um Klinoamphibole der Mischkristallreihe Magnesiohornblende-Ferrotschermakit (LEAKE et al., 1997), wobei mit abnehmendem  $\text{SiO}_2$  und zunehmendem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Gehalt die Amphibole Fe-reicher werden.

Die in Tabelle 2 angegebenen Spurenelemente der Amphibolite sprechen nach Diskriminations-Diagrammen verschiedener Autoren (vgl. z.B. WINCHESTER & FLOYD, 1977, PEARCE & NORRY, 1979, MESCHEDE, 1986) für ursprüngliche ‚mid-ocean ridge‘ Basalte tholeitischer Zusammensetzung. Für die genetische Zuordnung sind vor allem die Elemente Y, Nb, Zr, Cr sowie die  $\text{TiO}_2$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  Gehalte relevant.

#### *Serpentinit*

Der Serpentinit (Probe 08-03) ist ein graues bis dunkel graugrünes, dichtes Gestein mit manchmal erkennbarer leichter Schieferung. Im Dünnschliff zeigt sich ein faseriges Gemenge aus Chrysotil und Talk. Reliktisch können sehr vereinzelt Olivin, Pyroxen und Spinell beobachtet werden. Die Haupt- und Spurenelement-Gehalte des Serpentinit sind in Tabelle 2 angegeben. Auffällig sind die für Serpentinite typisch hohen Cr und Ni Gehalte, sowie die erhöhten Werte von Co, V, Zn und Zr.

#### *Staurolith-Granat-Glimmerschiefer*

Auffällig an diesem Glimmerschiefer (Probe 09-02) sind die gerundeten rotbraunen Granate, die sich in einer bräunlich- bis graugrünen Matrix aus Hellglimmer, Chlorit, Quarz und Feldspat befinden (Tabelle 1). Im Dünnschliff zeigt das Gestein neben den Granatkörnern idiomorphe Staurolithe. In der fein- bis mittelkörnigen Matrix können neben Quarz, Plagioklas, Muskovit und Chlorit, Biotit und Chloritoid nachgewiesen werden (Abb. 1). Unter erhöhten p,T-Bedingungen wandelt sich der

Tabelle 2: Röntgenfluoreszenz Analysen; Haupt- und Spurenelemente der Umgebungsgesteine sowie der Granat-Korund-Gesteine. Oxid-Gehalte in Gew.%, Spurenelement-Gehalte in ppm, LOI-Glühverlust; b.d. - unter der Nachweisgrenze.

| Probe                              | Granat-Korund-Gestein |        |       | Amphibolit | Serpentinit | Gl.schiefer |
|------------------------------------|-----------------------|--------|-------|------------|-------------|-------------|
|                                    | 00-02a                | 00-02b | 11-03 | 03-03      | 08-03       | 09-02       |
| <i>SiO<sub>2</sub></i>             | 29,7                  | 33,4   | 29,1  | 49,3       | 43,6        | 51,7        |
| <i>TiO<sub>2</sub></i>             | 1,4                   | 1,4    | 1,3   | 1,4        | 0,1         | 1,1         |
| <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | 32,1                  | 35,2   | 30,2  | 15,3       | 2,5         | 28,3        |
| <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | 14,5                  | 10,8   | 22,7  | 11,5       | 8,1         | 10,0        |
| <i>MnO</i>                         | 0,2                   | 0,1    | 0,1   | 0,2        | 0,1         | 1,0         |
| <i>MgO</i>                         | 7,4                   | 5,3    | 8,8   | 8,6        | 33,2        | 1,3         |
| <i>CaO</i>                         | 9,9                   | 6,3    | 3,9   | 10,8       | 0,6         | 0,4         |
| <i>Na<sub>2</sub>O</i>             | 0,1                   | 1,2    | 0,1   | 1,1        | b.d.        | 0,9         |
| <i>K<sub>2</sub>O</i>              | 0,4                   | 2,5    | 0,5   | 0,3        | b.d.        | 3,8         |
| <i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>  | 0,3                   | 0,2    | 0,1   | 0,1        | b.d.        | 0,1         |
| <i>LOI</i>                         | 4,0                   | 3,0    | 3,5   | 0,9        | 10,5        | 3,0         |
| <i>Summe</i>                       | 100,0                 | 99,4   | 100,3 | 99,5       | 98,7        | 101,6       |
| <i>Ba</i>                          | 91                    | 313    | 92    | 57         | 13          | 510         |
| <i>Ce</i>                          | 225                   | 201    | 225   | 2          | b.d.        | 77          |
| <i>Co</i>                          | 96                    | 97     | 177   | 44         | 87          | 22          |
| <i>Cr</i>                          | 222                   | 194    | 228   | 244        | 2584        | 158         |
| <i>Cu</i>                          | 21                    | 12     | 15    | 96         | 22          | 9           |
| <i>Ga</i>                          | 32                    | 36     | 38    | 17         | 5           | 38          |
| <i>Hf</i>                          | 6                     | 3      | 5     | 1          | 1           | 3           |
| <i>La</i>                          | 121                   | 101    | 127   | 9          | 7           | 56          |
| <i>Mo</i>                          | b.d.                  | b.d.   | b.d.  | b.d.       | b.d.        | b.d.        |
| <i>Nb</i>                          | 30                    | 32     | 27    | 1          | b.d.        | 26          |
| <i>Nd</i>                          | 101                   | 91     | 98    | 19         | b.d.        | 41          |
| <i>Ni</i>                          | 86                    | 105    | 182   | 100        | 1648        | 55          |
| <i>Pb</i>                          | 77                    | 76     | 22    | 25         | 4           | 28          |
| <i>Rb</i>                          | 28                    | 157    | 35    | 8          | 2           | 148         |
| <i>Sc</i>                          | 35                    | 24     | 31    | 45         | 12          | 24          |
| <i>Sr</i>                          | 1009                  | 2792   | 214   | 158        | 7           | 167         |
| <i>Th</i>                          | 36                    | 33     | 34    | 1          | b.d.        | 18          |
| <i>U</i>                           | 12                    | 18     | 6     | 1          | 1           | 4           |
| <i>V</i>                           | 270                   | 247    | 207   | 363        | 60          | 191         |
| <i>W</i>                           | 2                     | 4      | 1     | 3          | b.d.        | 7           |
| <i>Y</i>                           | 74                    | 47     | 53    | 36         | 13          | 28          |
| <i>Zn</i>                          | 45                    | 33     | 175   | 194        | 55          | 104         |
| <i>Zr</i>                          | 281                   | 231    | 191   | 77         | 25          | 156         |

Grünschiefer-fazielle Chloritoid in den für die untere Amphibolitfazies kritischen Staurolith um. Als akzessorische Gemengteile finden sich Apatit, Rutil, Ilmenit und Zirkon. Mikrosondenanalysen haben gezeigt, dass es sich beim Granat um Almandinreiche Mischkristalle handelt (Almandin 83, Pyrop 8, Spessartin 5, Grossular 4). Der Staurolith weist mit einem

$X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$  Verhältnis von

0,18/0,82 einen im Vergleich zu den unten diskutierten Stauolithen der Granat-Korund-Gesteine signifikant höheren Fe Gehalt auf.

Die in Tabelle 2 angegebenen Haupt- und Spurenelemente zeichnen sich durch erhöhte Gehalte von Ba, Cr, Rb, Sr, sowie V, Zn und Zr aus. Daneben sind erhöhte Gehalte an Ce und La festzustellen. Unter Einbeziehung des  $\text{TiO}_2$  Gehaltes lassen sich aus Diskriminations-Diagrammen (vgl. z.B. FLOYD et al., 1989, GARCIA et al., 1991) die Glimmerschiefer von Tonschiefern und Grauwacken ableiten.

### Marmor

Der weiße bis hellgraue Marmor ist fein- bis grobkörnig ausgebildet (Probe 13-02). Hellglimmer, Quarz und Graphit sind makroskopisch erkennbar. Die Gesteinskörper finden sich zum Teil im direkten Kontakt mit den Granat-Korund-Gesteinen. Im Dünnschliff zeigen die unregelmäßig verzahnten Calcitkörper typische Druckverzwilligung. Geringe Mengen von Graphit sind lagenweise angereichert. Akzessorisch können idiomorphe Hämatit-Plättchen beobachtet werden.

### Petrographie der Granat-Korund-Paragenese

Dieses Gestein befindet sich im Kontaktbereich zwischen dem Serpentinit und dem Staurolith-Granat-Glimmerschiefer. Teilweise tritt es auch im Kontakt mit den Marmoren auf. Bei den Proben 00-02a, 00-02b und 11-03 handelt es sich um massig-dichte, grau- bis dunkelgrüne Gesteine, die durch das Auftreten mehrerer cm-großer, meist idiomorpher rotbrauner Granate charakterisiert sind. Die grau bis graublauen, ebenfalls oft cm-großen Korundkristalle sind makroskopisch unauffälliger. Margarit und Chlorit bauen die Matrix dieser Gesteine auf. Die Proben 06-02a,b,g haben einen identen Mineralbestand, sind jedoch heller gefärbt

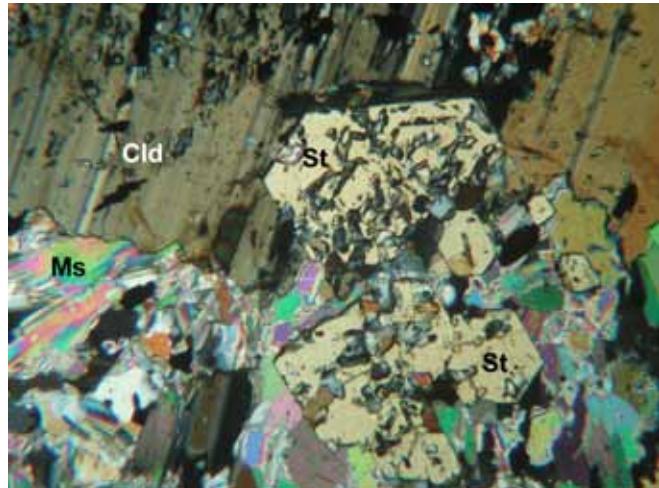


Abb. 1: Dünnschliff-Bild (+ Pol.) des Staurolith-Granat-Glimmerschiefers (Probe 09-02) mit idiomorphem Staurolith (St), Chloritoid (Cld) und Muskovit (Ms). Bildbreite 2 mm.

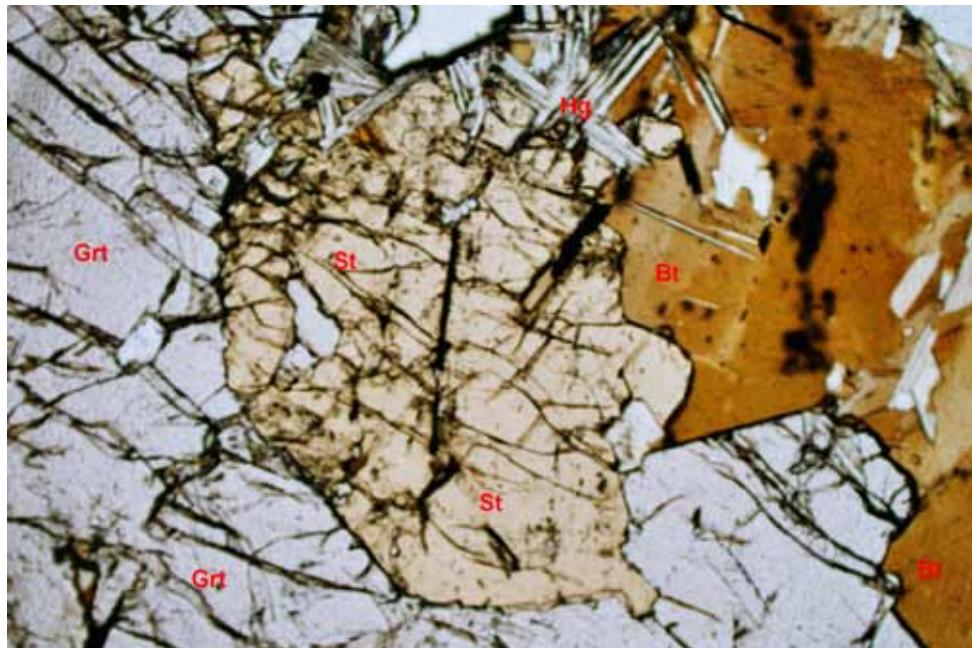


Abb. 2: Dünnschliff-Bild (// Pol.) der Granat-Korund-Gesteinsprobe 00-02b mit tektonisch stark beanspruchtem Granat (Grt) und Staurolith (St), sowie mit Margarit (Hg, Hellglimmer) und Biotit (Bt), der mit von Zirkon-Einschlüssen herrührenden pleochroitischen Höfen durchsetzt ist. Bildbreite 2 mm.

und weisen zum Teil schiefrige Strukturen auf (Tabelle 1). Es können Zonen von Granat-freien, nur aus Korund, Chlorit und Margarit bestehenden Gesteinen im dm-Bereich beobachtet werden. Diese grenzen dann an von Granat dominierten, Korund-armen, Chlorit und Margarit-führenden Gesteinszonen an. Vereinzelt treten noch kleinere, an Biotit angereicherte Gesteinspartien auf.

Im Dünnschliff konnte Staurolith als ein wesentlicher Nebengemengteil nachgewiesen werden. Ebenso wie die Staurolithe sind die Granate und Korunde von zahlreichen Rissen durchzogen, was auf eine starke tektonische Beanspruchung hinweist (Abb. 2). In den Granaten finden sich neben Staurolith als Einschlussminerale Chlorit, Epidot-Klinozoisit und Biotit, sowie Korund, Ilmenit und Rutil. Eine Besonderheit stellt das Auftreten von Allanit als Einschlussmineral im Granat dar. Bei den Korundkristallen ist eine lamellare Verzwillingung zu beobachten; zwischen einzelnen Körnern sind Chlorit und Margarit angereichert. Als Einschlüsse sind im Korund Epidot-Klinozoisit, Staurolith, Biotit und Ilmenit zu beobachten. Neben Chlorit und Margarit zeigt die Matrix Epidot-Klinozoisit sowie Biotit mit pleochroitischen Höfen um eingeschlossene Zirkone. Daneben sind Ilmenit, Rutil und Apatit akzessorisch in der Matrix verteilt.

Die Haupt- und Spurenelemente der Proben 00-02a, 00-02b und 11-03 sind in Tabelle 2 angegeben, wobei bei den Spurelementen Sr auffallend hohe Werte zeigt. Auffällig sind auch die erhöhten Gehalte an Ce, La und Nd, ebenso die Gehalte von Cr, V und Zr.

## Mineralogie der Granat-Korund-Paragenese

### *Granat*

#### *Die Zusammensetzung der Granate:*

Die Granate erreichen in den vorhandenen Proben Durchmesser bis zu 6 cm. Mit der Mikrosonde durchgeführte Messprofile zeigen eine deutliche Zonierung der Granate. Wie in Abb. 3 bei einem Granat der Probe 00-02b dargestellt, nehmen ausgehend von einem homogenen Kern (Almandin 73, Pyrop 11, Spessartin 6, Grossular 10), die Almandin-, Spessartin- und Grossular-Komponenten zum Rand hin leicht ab, während die Pyrop-Komponente etwas zunimmt (Alm 70, Prp 20, Sps 1, Grs 9). Des Weiteren, kann bei diesem Granat ab einem bestimmten Grenzbereich – bei Abfall der Almandin- und Pyrop-Komponenten – ein starker Anstieg der Grossular-Komponente beobachtet werden (Alm 60, Prp 17, Sps 1, Grs 22), was den Hinweis auf die Bildung einer zweiten Granat-Generation liefert. Signifikante Mikrosonden-Analysen von Granaten aus den verschiedenen Granat-Korund-Gesteinsproben sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Ein Granat der Probe 00-02a zeigt bei einem weniger stark ausgeprägtem Zonarbau, im Kernbereich die durchschnittliche Zusammensetzung (Alm 57, Prp 17, Sps 2, Grs 24), im Randbereich (Alm 59, Prp 21, Sps 1, Grs 19); dieser Granat entspricht in etwa der zweiten Granat-Generation des Granats der Probe 00-02b und zeigt eine ähnliche Zusammensetzung wie der Granat der eingeschalteten Amphibolite.

Ein Granat der Probe 11-03 kommt mit seiner Zusammensetzung (Alm 73, Prp 12, Sps 1, Grs 14) – wenn auch mit erhöhtem Grossular-Gehalt – einem Granat der ersten Generation nahe. Dieser Granat zeigt, analog zum Granat der Probe 00-02b, zum Rand hin eine signifikante Abnahme der Almandin-Komponente bei einer Zu-

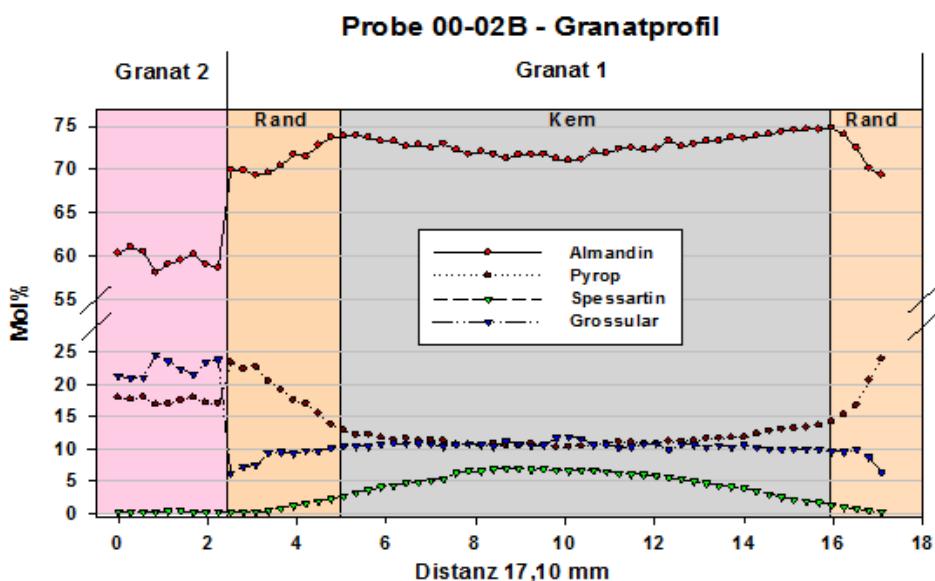


Abb. 3: Mikrosondenprofil eines zonar gebauten Granats der Probe 00-02b. Der mit Granat 2 bezeichnete äußerste Rand des Granats zeigt einen starken Anstieg im Grossular Gehalt bei gleichzeitiger Abnahme der Almandin Komponente.

Tabelle 3: Mikrosonden-Analysen ausgewählter Granate aus verschiedenen Granat-Korund-Gesteinsproben. Analysenwerte in Gew.%; b.d. - unter der Nachweisgrenze.

| Probe     | 00-02a |        | 00-02b |        | 11-03  |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $SiO_2$   | 38,84  | 38,93  | 38,37  | 38,26  | 37,47  | 38,15  | 37,80  |
| $TiO_2$   | 0,14   | 0,04   | 0,09   | 0,07   | 0,01   | 0,07   | b.d.   |
| $Al_2O_3$ | 21,98  | 21,91  | 22,12  | 21,85  | 21,50  | 22,36  | 21,87  |
| $Cr_2O_3$ | 0,01   | b.d.   | 0,05   | 0,01   | 0,01   | 0,04   | 0,02   |
| $FeO$     | 27,76  | 26,72  | 27,38  | 31,79  | 32,88  | 30,24  | 33,18  |
| $MnO$     | 0,33   | 1,00   | 0,20   | 0,20   | 2,47   | 0,34   | 0,13   |
| $MgO$     | 5,44   | 4,38   | 4,54   | 5,25   | 2,82   | 4,73   | 3,00   |
| $CaO$     | 6,97   | 8,83   | 8,08   | 3,36   | 3,46   | 5,27   | 5,14   |
| $Na_2O$   | 0,03   | 0,03   | 0,04   | 0,03   | 0,03   | b.d.   | 0,03   |
| $K_2O$    | 0,01   | b.d.   | b.d.   | 0,01   | 0,02   | 0,01   | 0,01   |
| Summe     | 101,51 | 101,84 | 100,87 | 100,83 | 100,13 | 101,21 | 101,18 |

nahme des Pyrop-Anteils (Alm 66, Prp 18, Sps 1, Grs 15). Der von SEEMANN & KOLLER (1998), sowie der von RIESCO et al. (2005) bestimmte Granat dieser Paragenese entspricht in seinem Chemismus und in seinem Zonarbau etwa dem Granat der Probe 11-03.

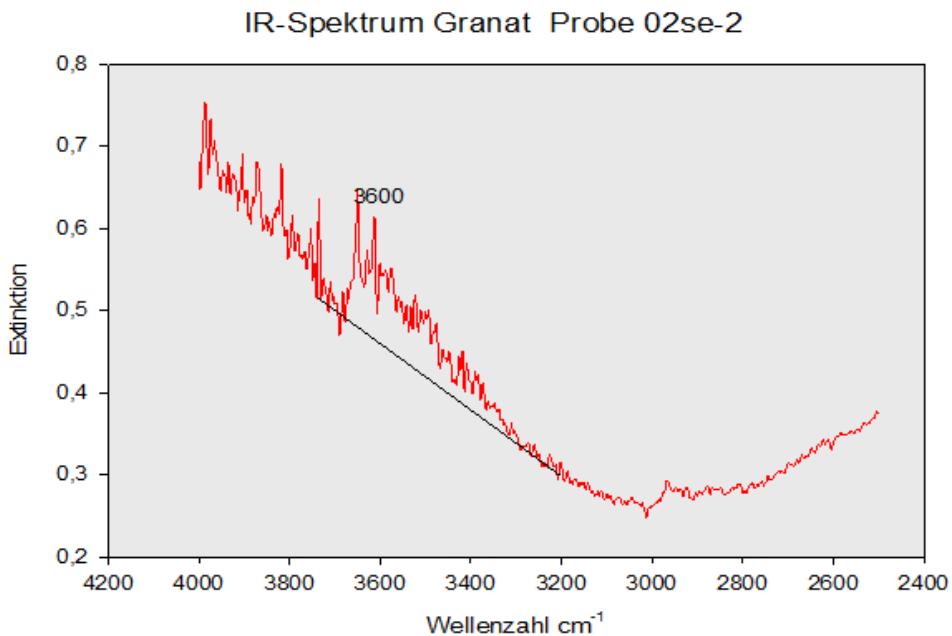


Abb. 4: IRSpektrum eines Granat-Kristallplättchens der Probe 00-02b im OH-Streckschwingungsbereich. Die Absorptionsbande mit dem Bandenmaximum bei  $3600 \text{ cm}^{-1}$  ist  $(O_4H_4)$  Gruppen zuzuordnen, die einzelne  $(SiO_4)$  Tetraeder der Granatstruktur ersetzen („Hydrogranat-Ersatz“).

### *Der Wassergehalt der Granate:*

Granate können je nach ihrer Zusammensetzung und Entstehung sehr unterschiedliche Wassergehalte aufweisen, wobei der Einbau von Hydroxylgruppen meist über den ‚Hydrogranat-Ersatz‘ erfolgt; dabei werden einzelne  $(\text{SiO}_4)^4-$  Tetraeder der Granatstruktur durch  $(\text{O}_4\text{H}_4)^4-$  Tetraeder ersetzt. Nach JOHNSON (2006) können Almandin-reiche Granate aus mittel- bis hoch-gradigen metamorphen Gesteinen bis zu etwa 500 ppm  $\text{H}_2\text{O}$  enthalten.

Die Bestimmung von kleinsten Wassermengen in nominell Wasser-freien Mineralen kann mit Hilfe der Infrarot (IR)-Spektroskopie an ausgewählten Kristallschnitten relativ einfach durchgeführt werden (LIBOWITZKY & BERAN 2004). In Abb. 4 ist das OH Spektrum eines 0,05 cm dicken Kristallplättchens eines mikroskopisch Einschluss-freien Granats von rosaroter Farbe und ausgezeichneter optischer Qualität der Probe 00-02b dargestellt. Die Lage der OH Bande bei einer Wellenzahl von  $3600 \text{ cm}^{-1}$  weist eindeutig auf die Anwesenheit einer Hydrogranat-Komponente hin. Aus der Intensität der OH Bande lässt sich ein  $\text{H}_2\text{O}$  Gehalt von etwa 90 ppm ableiten.

### *Korund*

Die meist hypidiomorph ausgebildeten Korundkörper erreichen in den vorhandenen Proben eine Größe bis zu etwa 2 cm. Im mikroskopischen Bereich lassen sich vereinzelt mm-große hell- bis dunkelblau gefärbte, weitestgehend Einschluss-freie Kristallbereiche nachweisen, sodass man von ‚blauen Saphiren‘ sprechen kann. Die blaue Farbe röhrt von der Absorption her, die durch den Ersatz des  $\text{Al}^{3+}$  durch die ‚färbbenden Übergangsmetallionen‘  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Ti}^{4+}$  bewerkstelligt wird. Abb. 5 zeigt das Dünnschliff-Foto eines von Chlorit umgebenen Saphirs der Probe 06-02g, in welchem Mikrosonden-Messpunkte eingetragen sind. Die dazugehörigen analytischen Daten mit den Gehalten an  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$  und  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sind in Tabelle 4 angegeben. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, zeigen die  $\text{TiO}_2$  Gehalte mit Werten zwischen 0,08 und 0,98 Gew.% eine sehr starke Variation, während die  $\text{FeO}$  und  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Gehalte relativ begrenzte Werte zwischen 0,22 und 0,63 Gew.%, bzw. 0,06 und 0,13 Gew.% aufweisen. Die Kristallbereiche mit der intensivsten blauen Farbe sind an die höchsten  $\text{TiO}_2$  Gehalte und auch an die höheren  $\text{FeO}$  Gehalte gebunden.

Wie weitere, zum Vergleich durchgeführte Mikrosonden-Messungen der farblosen Kristallbereiche derselben Probe (06-02g) gezeigt haben, liegen die  $\text{TiO}_2$  Gehalte zum Teil unter der Nachweisgrenze der Mikrosonde und erreichen maximal 0,04 Gew.%. Die  $\text{FeO}$  Gehalte liegen zwischen 0,18 und 0,24 Gew.%, die  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Gehalte zwischen 0,01 und 0,05 Gew.%. Bei den farblosen Korunden der Proben 11-03 und 00-02a erreichen die  $\text{TiO}_2$  Gehalte 0,04 Gew.%, die  $\text{FeO}$  Gehalte liegen leicht erhöht zwischen 0,26 und 0,58 Gew.% und die  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Gehalte erreichen 0,13 Gew%.

In den meisten Fällen, weisen die Korunde neben den Mineraleinschlüssen schwache bis deutliche Trübungen auf, die auf submikroskopische Einschlüsse hinweisen. Mittels der oben erwähnten IR Spektroskopie lassen sich OH Gruppen nicht nur wie bei den Granaten als Strukturbestandteile feststellen, es lassen sich auch submikroskopisch vorhandene Einschlüsse von OH-haltigen Mineralen auf Grund ihrer Bandenlagen erkennen und identifizieren. Bei der in Abb. 6 gezeigten Dar-

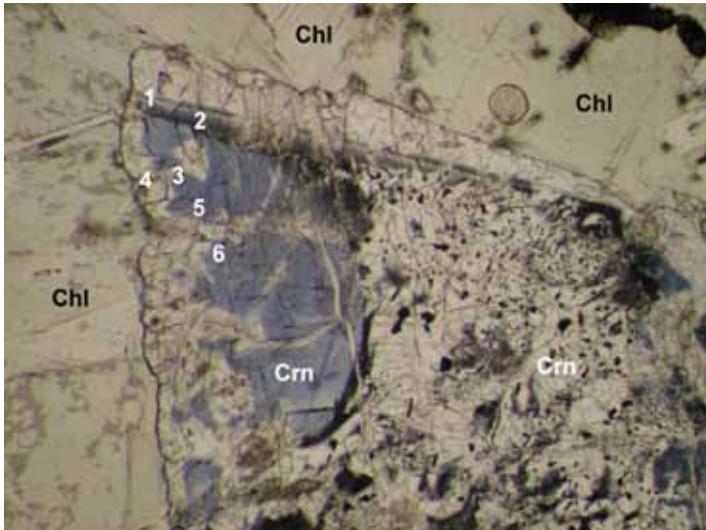


Abb. 5: Dünnschliffbild (// Pol.) von einem blau gefärbten „Saphir-Bereich“ eines von Klinochlor (Chl) umschlossenen Korundkristalls (Crn) der Probe 06-02g. Die mit 1 bis 6 bezeichneten Mikrosonden-Analysenpunkte entsprechen den in Tabelle 4 angegebenen analytischen Daten. Bildbreite 3 mm.

Tabelle 4: Mikrosonden-Daten von den in Abb. 5 mit 1 bis 6 bezeichneten Messpunkten von „färben den Übergangsmetallionen“ innerhalb des blauen „Saphir-Bereichs“ eines Korundkristalls der Probe 06-02g. Analysenwerte in Gew.%.

|           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| $TiO_2$   | 0,08 | 0,11 | 0,31 | 0,18 | 0,98 | 0,37 |
| $Cr_2O_3$ | 0,10 | 0,13 | 0,11 | 0,10 | 0,08 | 0,06 |
| $FeO$     | 0,27 | 0,22 | 0,55 | 0,55 | 0,57 | 0,63 |

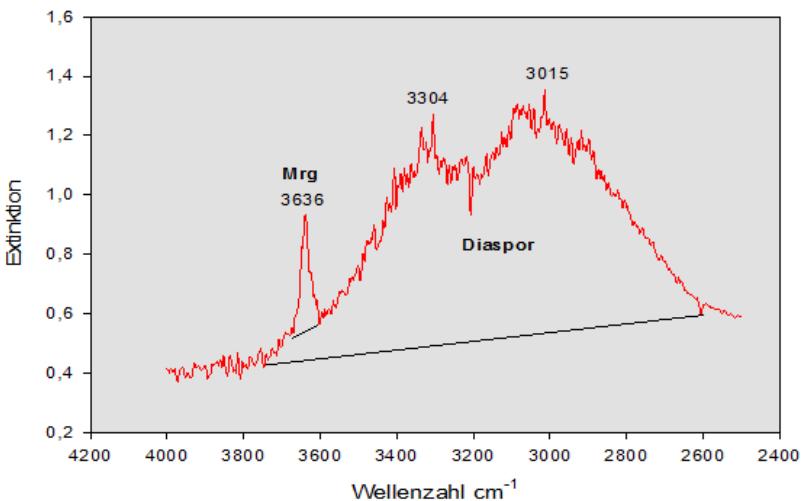


Abb. 6: IR Spektrum eines Korund-Kristallplättchens der Probe 06-02a im OH Strettwangungsbereich. Die relativ scharfe Absorptionsbande mit dem Bandenmaximum bei  $3636\text{ cm}^{-1}$  ist der OH Bande des Margarits zuzuordnen, die extrem breite Bande mit dem Bandenmaximum bei etwa  $3015\text{ cm}^{-1}$ , der OH Absorption des Diaspors.

stellung handelt es sich um die OH Spektren von feinstkörnigen Einschlusmineralen in einem 0,05 cm dicken Korund-Plättchen der Probe 06-02g, die sich über die OH Bandenlage bei 3636  $\text{cm}^{-1}$  als Margarit und über die extrem breite OH Bande mit einem Bandenmaximum bei etwa 3000  $\text{cm}^{-1}$  als Diaspor,  $\text{AlO(OH)}$  identifizieren lassen. Wie in Abb. 7 in einem BSE-Bild gezeigt wird, reichert sich Diaspor auch randlich an Korund-Körnern an.

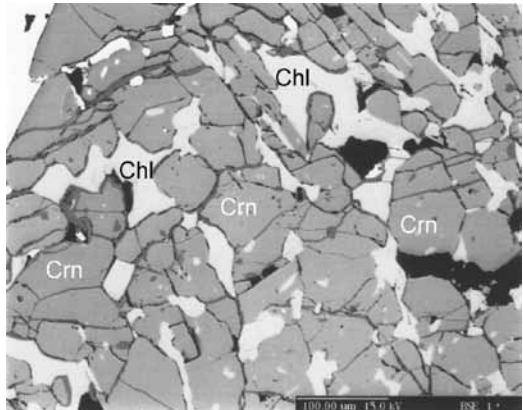


Abb. 7: BSE-Bild einer Durchwachsung von Korund (Crn) mit Klinochlor (Chl) aus der Probe 11-03. Die dunklen Ränder um die Korunde sind auf die Bildung von Diaspor zurückzuführen. Bildbreite 600  $\mu\text{m}$ .

### Hellglimmer (Margarit) und Biotit

Neben Margarit, der eine relativ variable Zusammensetzung aufweist und dessen Korngröße den cm-Bereich erreicht, finden sich als weitere Glimmerminerale der Matrix untergeordnet Biotit und Muskovit. Margarit und Biotit treten als relativ häufige Einschlüsse im Korund auf, Biotit findet sich neben Muskovit auch als Einschlusmineral im Granat.

In Tabelle 5 sind ausgewählte Mikrosonden-Daten von Margariten der Proben 00-02a, und 06-02a, sowie von Biotiten der Proben 00-02b und 11-03 zusammenge-

Tabelle 5: Mikrosonden-Analysen ausgewählter Margarite und Biotite aus verschiedenen Granat-Korund-Gesteinsproben. In der letzten Spalte ist die Analyse eines Biotit-Einschlusses in einem Granat der Probe 11-03 angegeben. Analysenwerte in Gew.%; b.d. - unter der Nachweisgrenze.

| Probe                   | Margarit |       |        |       | Biotit |       |       |
|-------------------------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
|                         | 00-02a   |       | 06-02b |       | 00-02b | 11-03 |       |
| $\text{SiO}_2$          | 30,99    | 31,52 | 30,58  | 30,25 | 36,26  | 34,95 | 35,43 |
| $\text{TiO}_2$          | 0,14     | 0,15  | 0,14   | 0,07  | 1,05   | 0,92  | 0,97  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 50,92    | 50,53 | 50,94  | 51,16 | 19,97  | 21,14 | 20,58 |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 0,04     | 0,03  | 0,01   | 0,02  | 0,05   | 0,02  | 0,04  |
| $\text{FeO}$            | 0,58     | 0,79  | 0,84   | 0,33  | 14,86  | 14,75 | 15,80 |
| $\text{MnO}$            | b.d.     | 0,01  | 0,02   | b.d.  | b.d.   | 0,02  | 0,01  |
| $\text{MgO}$            | 0,33     | 0,54  | 0,59   | 0,19  | 13,97  | 14,20 | 13,98 |
| $\text{CaO}$            | 11,96    | 11,01 | 10,51  | 12,55 | b.d.   | b.d.  | 0,02  |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 1,38     | 2,03  | 1,78   | 0,72  | 0,72   | 0,98  | 0,76  |
| $\text{K}_2\text{O}$    | b.d.     | 0,01  | 0,01   | 0,05  | 7,99   | 8,09  | 8,04  |
| Summe                   | 96,34    | 96,62 | 95,42  | 95,34 | 94,87  | 95,07 | 95,63 |

fasst. Die Margarite enthalten durchwegs eine relativ hohe Paragonit-Komponente, ein Muskovit-Anteil tritt nur sehr selten auf. Die Margarite der Probe 00-02a liegen in ihrer Zusammensetzung zwischen (Margarit 83, Paragonit 17, Muskovit 0) und (Mrg 75, Pg 25, Ms 0), bei einem mittleren  $X_{\text{Mg}}$  Wert von 0,58; die Zusammensetzung der Margarite der Probe 06-02a liegen bei einem identen  $X_{\text{Mg}}$  Wert, zwischen (Mrg 90, Pg 9, Ms 1) und (Mrg 77, Pg 23, Ms 0). Der durchschnittliche  $X_{\text{Mg}}$  Wert der Biotite der Proben 00-02b und 11-03 liegt bei 0,63.

### *Staurolith*

Der Staurolith stellt einen wesentlichen Nebengemengteil der Granat-Korund-Gesteine dar. Darüber hinaus findet er sich als Einschlusssmineral sowohl im Granat als auch im Korund. Die Formel des komplex zusammengesetzten Stauoliths wird üblicherweise auf 23 O Atome bezogen und auf folgende Weise angegeben:  $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{O},\text{OH})_2/(\text{SiO}_4)_4$  oder in der Form  $4\text{Al}_2(\text{O}/\text{SiO}_4)\cdot\text{AlFe}_2\text{O}_3\text{OH}$ .

Tabelle 6 enthält ausgewählte Mikrosonden-Daten der Matrix-Staurolithe (Probe 00-02b), sowie ausgewählte Analysendaten von in Korunden eingeschlossenen Stauolithen (Probe 06-02a). Die Zusammensetzung der Staurolithe entspricht in bester Näherung der oben angeführten idealen Formel. Das  $X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$  Verhältnis der Matrix-Staurolithe beträgt etwa 0,24/0,76, das  $X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$  Verhältnis der Einschluss-Staurolithe 0,27/0,73. Die als Einschlüsse in den Korunden vorkommenden Staurolithe zeigen also im Vergleich zu den Matrix-Staurolithen etwas niedrigere Fe Gehalte und weisen außerdem signifikant höhere Ti und Cr Gehalte auf.

*Tabelle 6: Mikrosonden-Analysen ausgewählter Staurolithe als Nebengemengteil der Granat-Korund-Gesteine (00-02b) sowie als Einschlusssmineral in einem Korund der Probe (06-02a). Analysenwerte in Gew.%; b.d. - unter der Nachweisgrenze.*

| Probe                   | 00-02b |       |       | 06-02a |       |       |
|-------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| $\text{SiO}_2$          | 28,17  | 27,14 | 27,48 | 27,25  | 27,83 | 27,81 |
| $\text{TiO}_2$          | 0,43   | 0,50  | 0,47  | 0,47   | 0,88  | 0,70  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 52,59  | 53,28 | 53,30 | 53,33  | 54,42 | 54,92 |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 0,06   | 0,05  | 0,04  | 0,02   | 0,23  | 0,19  |
| $\text{FeO}$            | 13,93  | 13,99 | 13,78 | 13,84  | 12,03 | 12,02 |
| $\text{MnO}$            | 0,03   | 0,01  | 0,01  | 0,01   | 0,14  | 0,14  |
| $\text{MgO}$            | 2,40   | 2,40  | 2,41  | 2,44   | 2,49  | 2,44  |
| $\text{CaO}$            | b.d.   | 0,02  | 0,01  | 0,01   | 0,01  | b.d.  |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,01   | 0,04  | 0,01  | 0,01   | b.d.  | 0,02  |
| $\text{K}_2\text{O}$    | b.d.   | 0,02  | 0,01  | b.d.   | 0,01  | b.d.  |
| Summe                   | 97,62  | 97,45 | 97,52 | 97,38  | 98,04 | 98,24 |

## *Chlorit*

Bei den Chlorit-Mineralen der Matrix handelt es sich durchwegs um Klinochlore, die neben Margarit die feinkörnige Grundmasse aufbauen. Außerdem kommen Chlorite als Einschlüsse im Granat und im Korund vor. Die allgemeine Formel des Klinochlors kann in der Form  $(OH)_2(Mg,Fe^{2+},Al)_3(AlSi_3O_{10}) \cdot (Mg,Fe^{2+},Al)_3(OH)_6$  angegeben werden. Dominiert der  $Fe^{2+}$  Gehalt wird der Chlorit als Chamosit bezeichnet.

In der Probe 00-02a haben sowohl die Chlorite der Matrix wie auch die in den Granaten und Korunden eingeschlossenen Chlorite eine einheitliche Zusammensetzung. Dabei liegen die  $MgO$  Werte zwischen etwa 19,4 und 21,2 Gew.%, die  $FeO$  Werte zwischen 16,4 und 18,4 Gew.%. Die  $Al_2O_3$  Gehalte liegen zwischen 23,3 und 24,3 Gew.%.

Ein etwas anderes Verhalten zeigen die Chlorite der Proben 11-03 und 06-02a. Bei einem relativ einheitlichen Chemismus der Matrix-Chlorite der Probe 11-03, der dem Chemismus der Klinochlore der Probe 00-02a entspricht, zeigen die in den Granaten eingeschlossenen Chlorite eine variable Zusammensetzung mit  $MgO$  Werten zwischen 11,9 und 24,1, mit  $FeO$  Werten von 15,2 bis 25,6 und  $Al_2O_3$  Werten von 15,5 bis 23,7 Gew.%. Die Matrix-Klinochlore der Probe 06-02a sind wieder einheitlich zusammengesetzt. Auch die in den Korunden dieser Probe eingeschlossenen Klinochlore zeigen eine einheitliche Zusammensetzung. Die in den Granaten eingeschlossenen Chlorite sind – wie in der Probe 11-03 – in ihrem Chemismus variabel, wobei die  $MgO$  Werte zwischen 9,4 und 22,2, die  $FeO$  Werte zwischen 15,7 und 25,9 und die  $Al_2O_3$  Gehalte zwischen 22,8 und 31,6 Gew.% liegen.

## *Epidot-Klinozoisit*

Neben Margarit und Klinochlor stellen Epidot-Klinozoisit Mischkristalle nur untergeordnet auftretende Matrixminerale dar. Sie finden sich aber auch als Einschlussminerale in Granat und Korund, wobei vor allem auf das Auftreten von Allanit im Granat der Probe 00-02b hervorzuheben ist. Der aus 10 Mikrosonden-Punktmessungen bestimmte mittlere  $La_2O_3$  Gehalt liegt bei 3,23 Gew.%, der  $Ce_2O_3$  Gehalt bei 6,55 Gew.%. Entsprechend einem  $FeO$  Gehalt von 8,08 Gew.% beträgt das Verhältnis Epidot/Klinozoisit (Ep 61, Kzo 39). Die Zusammensetzung des entsprechenden „reinen“ Matrixminerals liegt bei den Proben 00-02a und 00-02b zwischen (Ep 10, Kzo 90) und (Ep 15, Kzo 85). Auch die in den Granaten eingeschlossenen Minerale zeigen eine ähnliche Zusammensetzung. Der Gehalt an „Seltenen Erden“ ist also an Epidot-reiche Mischkristalle gebunden. Die Matrix-Mineralphasen der Proben 06-02a und 06-02b zeigen mit Zusammensetzungen zwischen (Ep 3, Kzo 97) und (Ep 15, Kzo 85) eine vergleichbare Variabilität. Die Matrix-Klinozoisite der Probe 11-03 liegen zwischen (Ep 8, Kzo 92) und (Ep 36, Kzo 64). Die mittlere Zusammensetzung der in Korunden dieser Probe eingeschlossenen Klinozoisite ist (Ep 37, Kzo 63) und steht somit dem Epidot-reicheren „Matrix-Endglied“ nahe; die Zusammensetzung der in den Granaten eingeschlossenen Klinozoisite entspricht in etwa der in den Granaten der Proben 00-02a und 00-02b eingeschlossenen Klinozoisite und steht mit (Ep 11, Kzo 89) dem Klinozoisit-reichen „Matrix-Endglied“ nahe.

## *Ilmenit*

Ilmenit findet sich als relativ seltenes Erzmineral in Form kleinster, im Zehntel mm Bereich liegender, idiomorpher Kristalle in der Matrix der Gesteine, vereinzelt auch als Einschlusssmineral in Korund und Granat. Generell zeigen die Ilmenite eine praktisch stöchiometrische Zusammensetzung, die an Kristallen der Proben 06-02a,b,g und 11-03 bestimmt werden konnte. In den an sich niedrigen MnO und MgO Gehalten zeigen sich aber signifikante Unterschiede. Die Ilmenite der Probe 06-02a,b,g weisen einen durchschnittlichen MnO Gehalt von 0,62 Gew.% und einen MgO Gehalt von 0,35 Gew.% auf, die der Probe 11-03 einen MnO Gehalt von 0,17 Gew.% und einen MgO Gehalt von 0,62 Gew.%.

## **Diskussion**

### *Mineralchemie*

Betrachtet man die Gesamtheit der Granate, so zeigen sich zwei in ihrem Chemismus unterschiedliche, zonar gebaute Granat-Typen, die altersmäßig unterschiedlichen Generationen zugeordnet werden können. Die erste Granat-Generation ist in ihrem Kernbereich durch eine mittlere Zusammensetzung von (Alm 73, Prp 11, Sps 4, Grs 12) und im Randbereich von (Alm 68, Prp 19, Sps 1, Grs 12) charakterisiert. Die zweite Generation zeigt im Kernbereich eine Zusammensetzung von (Alm 57, Prp 17, Sps 2, Grs 24) und im Randbereich (Alm 59, Prp 21, Sps 1, Grs 19), zeichnet sich also durch eine deutlich höhere Grossular-Komponente aus. Ein Granat der Probe 00-02b mit einer Zusammensetzung der ersten Generation zeigt in seinem äußersten Randbereich einen Anwachssaum der Zusammensetzung, (Alm 60, Prp 17, Sps 1, Grs 22), der also eindeutig der zweiten Granat-Generation entspricht. Nach SCHUSTER et al. (2004) werden Granat-Porphyroblasten aus Gesteinen der Wölzer Einheit mit einer Zusammensetzung (Alm 73, Prp 9, Sps 8, Grs 10), die der ersten Granat-Generation entsprechen, einem permischen Bildungsalter zugeordnet; Grossular-reiche Randbereiche, die der zweiten Generation entsprechen, werden einer jüngeren, alpidischen Bildungsphase zugerechnet.

Ein Vergleich des Chemismus mit den Granaten aus den Granat-Amphiboliten zeigt, dass diese mit einer Zusammensetzung von (Alm 59, Prp 17, Sps 4, Grs 20) einer zweiten Granat-Generation entsprechen. Die Granate aus den Staurolith-Granat-Glimmerschiefern sind äußerst Almandin-reich und Grossular-arm und weisen mit (Alm 83, Prp 8, Sps 5, Grs 4) auf eine ‚eigenständige‘ Zusammensetzung hin. Die in den Granaten der Granat-Korund-Gesteine eingeschlossenen Chlorite sind im Gegensatz zu den in den Korunden eingeschlossenen Chloriten, die in ihrer Zusammensetzung etwa den Chloriten der Matrix entsprechen, inhomogen zusammengesetzt. Die MgO Werte liegen dabei zwischen etwa 9 und 24 Gew.%, die FeO Werte zwischen 15 und 26 und die  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Werte zwischen 16 und 32 Gew.%. Diese starke Variabilität im Chemismus weist auf eine späte, lokale, auf engstem Raum unterschiedlich geprägte Chloritisierungsphase hin.

Die Korunde sind vor allem in Hinblick auf die IR spektroskopisch bestimmten submikroskopischen Einschlüsse interessant. Neben Margarit kann Diaspor,  $\text{AlO(OH)}$  als sekundäres Umwandlungsprodukt bestimmt werden. Der sonst häufig in Korunden als Umwandlungsmineral auftretende Kaolinit,  $(\text{OH})_4\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)$

konnte nicht nachgewiesen werden, was auf ein fehlendes  $\text{SiO}_2$  Angebot zurückzuführen ist. Diaspor liefert somit in Analogie zur Chloritisierungsphase der Granate den Hinweis auf eine späte (alpidische) hydrothermale Umwandlungsphase.

Die in der Matrix auftretenden Staurolithe der Granat-Korund-Gesteine sind durch ein  $X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$  Verhältnis von 0,24/0,76 gekennzeichnet. Auch die in Korunden eingeschlossenen Staurolithe weisen mit 0,27/0,73 ein ähnliches  $X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$  Verhältnis auf. Im Vergleich dazu, sind die Staurolithe in den Staurolith-Granat-Glimmerschiefern mit einem  $X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$  von 0,18/0,82 wesentlich Fe-reicher.

### *Genesemodelle*

In einer kurzen Notiz über  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  und  $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$  Isotopen-Untersuchungen nehmen ECKE et al. (2003) eine vom Serpentinit ausgehende Infiltrations-Metasomatose zur Bildung von ‚blackwall‘-Zonen an, wobei eine Margarit + Chlorit + Granat + Korund-Zone beschrieben wird, auf die der Granat-Staurolith-Glimmerschiefer folgt. Im Zusammenhang mit dem Verlust von Si und der Anreicherung von Ca bei der blackwall-Bildung, ist für die weitere Diskussion der Hinweis auf die Equilibrierung Ca-reicher Fluids mit dem Marmor wesentlich.

Ausführliche petrologische Untersuchungen wurden von RIESCO et al. (2005) durchgeführt. Unterschiede zu unseren Beobachtungen bestehen in der Beschreibung des Ultrabasitkörpers als Olivin + Talk + Tremolit-Paragenese, sowie die nicht erwähnten Marmor-Vorkommen. Ebenso wie ECKE et al. (2003) nehmen die Autoren einen vom Ultrabasit ausgehenden Metasomatose-Prozess an, wobei sie für die Bildung der Reaktionszonen 7,2 kbar und 615°C angeben. Dem Ultrabasit folgt eine Reaktionszone mit Korund + Staurolith + Granat + Biotit + Chlorit + Margarit, auf die nach einer weiteren Übergangszone der Granat-Staurolith-Glimmerschiefer folgt. Entsprechend einer vorgeschlagenen Infiltrations-Metasomatose, werden Fluids aus der Dehydrierung während der Eo-Alpinen Metamorphose von serpentiniisierten, ultramafischen Körpern bezogen, die die Glimmerschiefer an Si verarmen und die Bildung von Margarit und Korund ermöglichen.

BUCHER et al. (2005) beschreiben eine Margarit-Korund blackwall Bildung aus den Norwegischen Kaledoniden. Dabei entwickelt sich die blackwall im Zuge einer Diffusions-Metasomatose aus einem Staurolith-Granat-Biotit-Glimmerschiefer durch fortschreitenden Si Verlust in Richtung eines Olivin-reichen, ultramafischen Gesteins bei Bildungsbedingungen von etwa 6,5 kbar und 570°C. Ein wesentlicher Unterschied zur vorliegenden Paragenese besteht allerdings im Fehlen von Granat und auch im Fehlen von Marmorkörpern. In Ergänzung zum primären Biotit entwickelt sich zusätzlich Biotit aus Staurolith und Muskovit. Die blackwall stellt letztlich ein Biotit-reiches Korund-Margarit Gestein dar.

Für die folgende genetische Diskussion der Granat-Korund-Paragenese sind zur Veranschaulichung der Änderungen im Chemismus einzelner Gesteinszonen, die in Tabelle 2 angegebenen analytischen Daten der Haupt- und Spurenelemente in Abb. 8 und 9 graphisch dargestellt. Aufgrund unserer Beobachtungen wird, ähnlich wie bei BUCHER et al. (2005), eine Reaktionszonierung angenommen, bei der die metasomatischen Prozesse vom Quarz-führenden Staurolith-Granat-Glimmerschiefer ausgehen und sich die Granat-Korund-Gesteinszonen durch den fortschreitenden

### Gesamtgesteinsanalyse

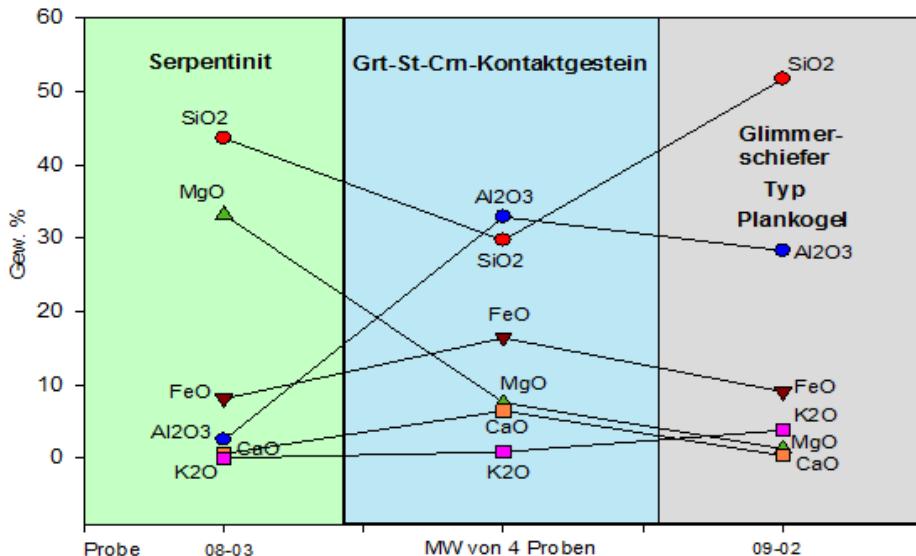


Abb. 8: Graphische Darstellung der Gesamtgesteinsanalysen von in Tabelle 2 angegebenen Hauptelementen des Staurolith-Granat-Glimmerschiefers der Granat-Korund-Kontaktgesteine und des Serpentinit.

SiO<sub>2</sub>-Verlust zum Si-defizienten Serpentinitkörper entwickeln. Bei der Desilifizierung der Staurolith-Granat-Glimmerschiefer freigesetztes SiO<sub>2</sub> steht im Serpentinit für die Talk-Bildung zur Verfügung. Entsprechend der Reaktion: Serpentin + 2 SiO<sub>2</sub> = Talk + H<sub>2</sub>O, wird Wasser freigesetzt, was in späteren Phasen der metasomatischen Prozesse zu lokal erhöhten H<sub>2</sub>O Aktivitäten führt. Im ersten Schritt der Desilifizierung wird durch die Freisetzung von Ca und Na aus dem Stoffbestand der Plagioklase des Staurolith-Granat-Glimmerschiefers, die Bildung von Margarit mit unterschiedlichen Gehalten an Paragonit-Komponente ermöglicht (Abb. 8). Wie auch von ECKE et al. (2003) erwähnt, steht mit den angrenzenden Marmorkörpern eine weitere Ca-Quelle zur Verfügung. Diese kann für die Bildung der ersten, vor allem aber der jüngeren, zweiten Granat-Generation genutzt werden, die im Vergleich zu den Almandin-reichen Granaten der Staurolith-Granat-Glimmerschiefer (Alm 83, Prp 8, Sps 5, Grs 4) wesentlich höhere Grossular-Komponenten aufweisen (Alm 73, Prp 11, Sps 4, Grs 12, bzw. Alm 57, Prp 17, Sps 2, Grs 24). In einem weiteren Schritt der Desilifizierung wird ein wesentlicher Teil des Al für die Korund-Bildung verbraucht. Das für die Bildung von blauem Saphir benötigte Ti kann, ebenso wie das Ti für die Ilmenit Bildung, von den Glimmerschiefern bezogen werden (Tabelle 2). Die Freisetzung von Fe aus den Almandin-reichen Granaten und den Fe-reichen Staurolithen der Staurolith-Granat-Glimmerschiefer, ermöglicht die Bildung der Chlorite und, gemeinsam mit Ca, die Bildung der Epidot-Klinozoisit-Mischkristalle. Damit erklärt sich die stellenweise deutliche Ausbildung von Granat + Korund + Margarit + Chlorit + Epidot-Klinozoisit-Zonen und praktisch Granat-freien Korund + Margarit + Chlorit-Paragenesen. In einer abschließenden hydrothermalen Phase des Metasomatose-Prozesses erfolgt die chemisch variable

## Gesamtgesteinsanalyse - Spurenelemente: Cr, Ni, Sr, Ba, Co

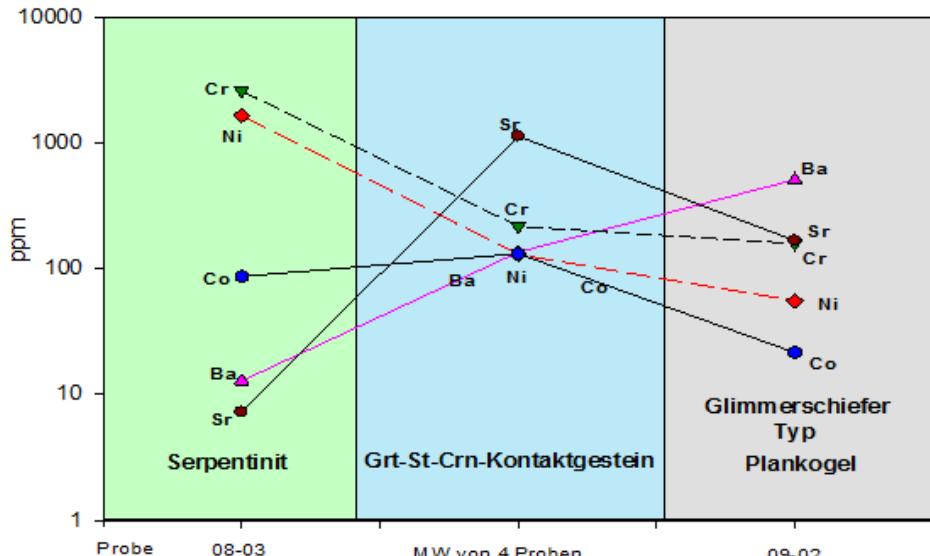


Abb. 9: Graphische Darstellung der Gesamtgesteinsanalysen von in Tabelle 2 angegebenen Spurenelementen des Staurolith-Granat-Glimmerschiefers der Granat-Korund-Kontaktgesteine und des Serpentinit.

Chloritisierung der Granate, sowie die Diaspor Bildung bei den Korunden. Die von RIESCO et al. (2005) beschriebene Zonierung wird von den Autoren als Ergebnis einer Infiltrations-Metasomatose gesehen. Allerdings muss auf Grund der beobachteten Kleinräumigkeit der Reaktionszonen auch eine Diffusions-Metasomatose für die Ausbildung der Zonierung in Betracht gezogen werden.

Vor allem K unterliegt beim Metasomatose-Prozess keiner weitreichenden Stoffwanderung, was zu den relativ niedrigen Gehalten an Biotit in der Kontaktzone führt und damit das nur sehr vereinzelte Auftreten von Biotit-reichen Gesteinspartien („blackwalls“) erklärt. Diese Beobachtung, die in einem gewissen Widerspruch zu der von BUCHER et al. (2005) gemachten Beobachtung steht, kann auf den wesentlich niedrigeren primären Biotit Anteil der Staurolith-Granat-Glimmerschiefer zurückgeführt werden.

Das Verhalten der Hauptelemente lässt sich auch an Hand der Spurenelemente nachvollziehen. Wie ein Vergleich mit Abb. 9 zeigt, unterstreichen die Spurenelemente die Trends einiger Hauptelemente. Die Ba Gehalte zeichnen den Weg des K nach; der  $K_2O$  Gehalt beträgt im Glimmerschiefer 3,8 Gew.%, im Kontaktbereich beträgt der mittlere  $K_2O$  Gehalt nur 1,1 Gew.%. Der Ba Gehalt beträgt im Glimmerschiefer 510 ppm, im Kontaktbereich 165 ppm (Tabelle 2). Sr verdeutlicht den Weg des Ca. Beispielsweise betragen die CaO Werte im Glimmerschiefer 0,4 und im Serpentinit 0,6 Gew.%, während sie im Kontaktbereich 6,7 Gew.% betragen. Die entsprechenden Sr Gehalte betragen im Glimmerschiefer 167 ppm, im Serpentinit 7 ppm und im Kontaktbereich 1338 ppm (Tabelle 2). Ni und Cr folgen dem Magnesium-Trend aus dem Serpentinit.

Nimmt man die LOI Werte der Tabelle 2 als Richtwerte für den Wassergehalt, so zeigen sich gegenüber dem Glimmerschiefer doch signifikant höhere Werte. Im Serpentinit wird bei der ‚Vertalkung‘ des Serpentins zusätzlich Wasser freigesetzt, was zu einer lokal erhöhten hydrothermalen Aktivität führt und das beobachtete ‚Riesenwachstum‘ mancher Granate in der Kontaktzone begünstigen kann. Der beobachtete Wassergehalt des Granats von 90 ppm H<sub>2</sub>O steht dazu in Übereinstimmung.

### Danksagung

H.L. dankt W.Füzi und A.Wagner für die Anfertigung der Dünnschliffe sowie T.Ntaflos für die Hilfestellung bei den Mikrosonden-Messungen.

### Literatur

- BUCHER, K., DE CAPITANI, C. & GRAPES, R. (2005): The development of a margarite-corundum blackwall by metasomatic alteration of a slice of mica schist in ultramafic rock, Kvesjøen, Norwegian Caledonides. – *The Canadian Mineralogist*, 43, 129-156.
- ECKE, N.S., PRINZ, E., RAITH, M.M., FRIEDRICHSEN, H. & HOERNES, S. (2003): Examples of fluid infiltration-driven blackwall formation at serpentinite-metapelitic interfaces from the Plankogel series (Austria). – *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft*, Beiheft 1, *European Journal of Mineralogy*, 15, 43.
- FLOYD, P.A., WINCHESTER, J.A. & PARK, R.G. (1989): Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW-Scotland. – *Precambrian Research*, 45, 203-214.
- FRISCH, W., SCHMEROLD, R. & NEUBAUER, F. (1989): Die Plankogelserie – eine voralpidische ophiolitische Sutur. – Arbeitstagung Geologische Bundesanstalt, Wien, 1989, 34-41.
- GARCIA, D., COELHO, J. & PERRIN, M. (1991): Fractionation between TiO<sub>2</sub> and Zr as a measure of sorting within shale and sandstone series (Northern Portugal). – *European Journal of Mineralogy*, 3, 401-414.
- JOHNSON, E.A. (2006): Water in nominally anhydrous crustal minerals: Speciation, concentration, and geologic significance. In: KEPPLER, H. & SMYTH, J.R. (Editors), *Water in nominally anhydrous minerals*. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 62, 117-154.
- LEAKE, B.E., WOOLLEY, A.R., ARPS, C.E.S. et al. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the IMA, Commission on new Minerals and Mineral Names. – *American Mineralogist*, 82, 1019-1037.
- LENITZ, H. (2008): Mineralogie und Petrologie der Granat-Korund-Paragenese, Saualpe, Kärnten. Diplomarbeiten und Dissertationen Österreichischer Universitäten (Auszüge). – *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 154, 111.
- LIBOWITZKY, E. & BERAN, A. (2004): IR spectroscopic characterisation of hydrous species in minerals. In: BERAN, A. & LIBOWITZKY, E. (Editors), *Spectroscopic methods in mineralogy – EMU Notes in Mineralogy*, 6, 227-279.
- MEIXNER, H. (1952): “Eklogit”-Granat von der Saualpe, Kärnten. Eine Richtigstellung. – *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1952, 1-3.

MEIXNER, H: (1967): Neue Mineralfunde in den österreichischen Ostalpen XXII. – Carinthia II, 157/77, 88-104.

MESCHEDE, M. (1986): A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalt and continental tholeiites with Nb-Zr-Y diagram. – Chemical Geology, 56, 207-218.

MILLER, CH., THÖNI, M., KONZETT, J., KURZ, W. & SCHUSTER, R. (2005): Eclogites from the Koralpe and Saualpe type-localities, Eastern Alps, Austria. – Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 150, 227-263.

NIEDERMAYR, G. & BRANDSTÄTTER, F. (1997): Die Dose aus Granat von der Saualpe in der Edelsteinsammlung des Naturhistorischen Museums in Wien. – Carinthia II, 187/107, 573-581.

PEARCE, J.A. & NORRY, M.J. (1979): Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. – Contributions to Mineralogy and Petrology, 69, 33-47.

PETRAKAKIS, K. & NAGL, P. (1993): Programm MAJORS (1986-1993), Version 11/93. Institute of Petrology, University of Vienna.

PETRAKAKIS, K. & NAGL, P. (1998): Programm TRACES (1987-1998), Version 10/98. Institute of Petrology, University of Vienna.

RIESCO, M., STÜWE, K. & RECHE, J. (2005): Formation of corundum in metapelites around ultramafic bodies. An example from the Saualpe region, Eastern Alps. – Mineralogy and Petrology, 83, 1-25.

SCHUSTER, R., KOLLER, F., HÖCK, V., HOINKES, G. & BOUSQUET, R. (2004): Explanatory notes to the map: Metamorphic structure of the Alps. Metamorphic evolution of the Eastern Alps. In: OBERHÄNSLI, R. (Editor), Metamorphic structure of the Alps. – Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 149, 175-199.

SEELAND, F. (1878): Die neuen Granatfunde in Lölling. – Carinthia 68, 270-272.

SEEMANN, R. & KOLLER, F. (1998): Die Granat-Korundparagenese von Lölling, Saualpe, Kärnten. – Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 143, 387-389.

THIEDIG, F. (1962): Die geologische Neuaufnahme des Saualpenkristallins (Kärnten). III. Die Phyllit- und Glimmerschieferbereiche zwischen Lölling und Klein St.Paul. – Carinthia II, 152/72, 21-45.

WINCHESTER, J.A. & FLOYD, P.A. (1977): Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. – Chemical Geology, 20, 325-343.

*Abbildungen in Dissertation:*

Abb. 1: p.24 / Abb.22; Abb. 2: p.20 / Abb.16; Abb. 3: p.45 / Abb.34; Abb. 4: p.94 / Abb.90; Abb. 5: p.57 / Abb.50; Abb. 6: p.96 / Abb.92; Abb. 7: p.59 / Abb.54; Abb. 8: p.84 / Abb.83; Abb. 9: p.85 / Abb.84

received: 25.07.2016

accepted: 30.01.2017