



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Reaktionsgefüge als Anzeiger von
Metamorphosebedingungen am Beispiel ausgewählter
moldanubischer Gesteine“

verfasst von / submitted by
Aleksandra Steger, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2019/ Vienna, 2019

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Erdwissenschaften

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Rainer Abart

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Gesteinstypen petrographisch untersucht, welche geologisch gesehen zum Moldanubikum zählen. Die Granulitprobe stammt aus dem Steinbruch Meidling im Tal (Dunkelsteinerwald) und ist geologisch der Gföhl Einheit zuzuordnen. Der Granat-Amphibolit kommt aus dem Loja Steinbruch (nahe Persenbeug) und gehört zur Bunten Serie. Die Gesteine beider Lokalitäten zeigen eine Vielfalt an Gefügemerkmalen, welche Informationen über die Metamorphosebedingungen während der Variszischen Orogenese liefern. Für eine genauere Erforschung ausgewählter Reaktionsgefüge wurden mehrere Methoden angewandt. Neben dem Lichtmikroskop wurde das Rasterelektronenmikroskop und die Elektronenstrahlmikrosonde verwendet. Im Granulit wurden speziell die Perthite und die Plagioklaskoronen um die Kyanite untersucht, während im Granat-Amphibolit die Symplektite und Myrmekite von besonderem Interesse waren.

In der felsichen Granulitprobe kommen Perthite sowohl in der Matrix als auch eingeschlossen im Granat vor. Im Granat erreichen die perthitischen Entmischungslamellen eine Größe von bis zu $\sim 120\ \mu\text{m}$ und können somit als Mesoperthite bezeichnet werden. Albitreiche Lamellen ($\text{Or}_{1\text{Ab}65\text{An}34}$) befinden sich in Wechsellagerungen mit orthoklasreichen Zonen ($\text{Or}_{87\text{Ab}12\text{An}1}$). Aus der Zusammensetzung der Mesoperthite konnten Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des ursprünglichen, ternären Feldspats gewonnen werden. Die Entmischungslamellen der Matrixperthite unterscheiden sich davon eindeutig in Form, Größe und Chemismus, wobei auf ein anderes Bildungsereignis zu schließen ist. Weiters ist für dieses Granulitgefüge typisch, dass die Kyanite in der Matrix, welche als Relikte der HPHT Metamorphose anzusehen sind, meistens von einem bis zu $150\ \mu\text{m}$ dicken Plagioklassaum mit der Zusammensetzung von $\text{Or}_{2\text{Ab}68\text{An}30}$ umgeben sind. Diese Säume sprechen für Reaktionen während der Dekompression.

In der amphibolreichen Matrix des Granatamphibolits kommen die Granate als Porphyroklasten vor. Um diese Granate herum bilden sich Symplektite, welche aus lamellenartigen, bis zu $200\ \mu\text{m}$ langen Orthopyroxenen in einer Plagioklasmatrix bestehen. Die Plagioklase weisen einen sehr hohen Anteil an Ca ($0,87 \leq X_{\text{An}} \leq 0,93$) auf und werden als Bytownit beziehungsweise Anorthit klassifiziert. Die Orthopyroxene sind Fe-reich und liegen im Bereich von $0,70 \leq X_{\text{Fs}} \leq 0,77$. Die Elementverteilungsbilder der Symplektite zeigen eine leichte Zunahme des Na-Gehalts der Plagioklase näher am Granatkorn. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass der Plagioklas gegen tiefere Temperaturen hin Na-reicher wird. Als weiteres Gefügemerkmal wurden Myrmekite untersucht. Dabei handelt es sich um bis zu $50\ \mu\text{m}$ große, kreis- und wurmförmige Quarze in einer Plagioklasmatrix. Diese wurden vor allem bildlich dokumentiert und beschrieben. Mögliche Bildungsszenarien wurden nur theoretisch diskutiert.

Abstract

This work presents a study of the micro structures of two different types of metamorphic rocks from the Moldanubian zone in lower Austria. The first sample is a granulite from the Gföhl unit and was taken from the quarry of Meidling im Tal (Dunkelsteinerwald). The second sample is a garnet-amphibolite of the Drosendorf unit that was sampled in the Loja quarry close to Persenbeug. Both samples reveal a broad variety of microstructural features, which provide information on the metamorphic conditions during the variscian orogenesis. A multi-analytical approach (polarized light microscopy, scanning electron microscopy, electron probe microanalyzer) was applied to visualize the microstructures and to obtain chemical information on the involved phases. Special attention was paid on the perthites and the plagioclase coronas around kyanites of the granulite and the symplectites and myrmekites of the garnet-amphibolite.

The perthites of the felsic granulite occur in the matrix and as inclusions in garnets. The perthite inclusions in garnets are classified as mesoperthites and they reach sizes up to $\sim 180\text{ }\mu\text{m}$. They comprise an alternation of albite-rich ($\text{Or}_{1\text{Ab}65\text{An}34}$) and orthoclase-rich bands ($\text{Or}_{87\text{Ab}12\text{An}1}$). The bulk composition of the mesoperthites can be used to reconstruct the initial composition of the ternary feldspar. The perthites of the matrix yield completely different observations regarding shape, size and composition, indicating another event for their formation. Another typical microstructure of the granulite are plagioclase coronas that surround the kyanites. Kyanite is a relict of the HPHT metamorphism that reacts during decompression with matrix minerals and forms up to $150\text{ }\mu\text{m}$ thick plagioclase rims ($\text{Or}_{2\text{Ab}68\text{An}30}$).

The garnet-amphibolite comprises an amphibole rich matrix and porphyroblastic garnets. Symplectites are solely located around these garnets and consist of lamellar, up to $200\text{ }\mu\text{m}$ long orthopyroxenes in a plagioclase matrix. The plagioclases are Ca rich ($0,87 \leq \text{Xan} \leq 0,93$) and can be classified as bytownites or anorthites. The orthopyroxenes are Fe-rich with a composition of $0,70 \leq \text{Xfs} \leq 0,77$. Elemental mapping of the symplectites reveal that the Na content slightly increases towards the garnet grain boundary. Plagioclase becomes Na-richer at decreasing temperatures, implying that the zones close to the garnet interface (i.e. the youngest zones) were formed at lower temperatures. Another microstructure of this sample is myrmekite. This microstructure comprises circular and vermicular quartz (up to $50\text{ }\mu\text{m}$) in a plagioclase matrix. It was mainly visually documented, and its formation is only theoretically discussed.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele	1
2 Einführung	2
2.1 Reaktionsgefüge	2
2.1.1 Perthit	3
2.1.2 Symplektit	4
2.1.3 Myrmekit	4
2.1.4 Plagioklassaum um den Kyanit	5
2.2 Topographische Lage der Aufschlüsse	5
2.3 Geologischer Überblick	5
2.3.1 Moldanubikum	6
2.3.2 Das Moldanubikum in Österreich	7
3 Methoden	9
3.1 Mikroskopie	9
3.2 Back Scattered Electrons z-Contrast Imaging	9
3.3 Elektronenstrahlmikrosonde	10
3.4 Software	10
4 Ergebnisse & Interpretation	11
4.1 Petrographie der Proben	11
4.1.1 Granulit (Probe 5)	11
4.1.1.1 Makroskopische Eigenschaften des Handstücks	11
4.1.1.2 Mikroskopische Beschreibung	11
4.1.2 Granat-Amphibolit (Probe 25)	12
4.1.2.1 Makroskopische Eigenschaften des Handstücks	12
4.1.2.2 Mikroskopische Beschreibung	12
4.2 Mineralchemie	13
4.2.1. Granulit	13
4.2.2 Granat-Amphibolit	15
4.2.3 Amphibol	18
4.2.4 Pyroxen	18
4.3 Reaktionsgefüge	20
4.3.1 Reaktionsgefüge im Granulit	20
4.3.1.1 Perthit	20
4.3.1.2 Plagioklassaum um den Kyanit	23

4.3.2 Reaktionsgefüge im Granat- Amphibolit.....	24
4.3.2.1 Symplektit.....	24
4.3.2.2 Myrmekit.....	28
5 Interpretation & Diskussion	29
5.1 Granulit der Gföhl Einheit	29
5.2 Granat-Amphibolit.....	30
Danksagung.....	32
Literaturverzeichnis	33
Anhang	38

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der Geologie Österreichs, stellt das Moldanubikum eine wichtige geologische Einheit dar. Die überwiegend metamorphen Gesteinskomplexe verschiedenen Alters sind für das Verständnis der Erdgeschichte von großer Bedeutung. Die komplexe Entstehungsgeschichte moldanubischer Gesteine ist von vielen Wissenschaftlern, darunter Scharbert, Fuchs, Matura, Petrakakis, Becker, Linner, Carswell, Fiala u.v.a. schon untersucht und dokumentiert worden. Für diese Arbeit wurden zwei unterschiedliche Gesteinstypen aus zwei Einheiten des Moldanubikums ausgewählt. Es handelt sich dabei um einen Granulit aus dem Steinbruch Meidling im Tale, der geologisch zur Gföhl Einheit gehört und um einen Granat-Amphibolit aus dem Loja Steinbruch (Drosendorf Einheit). Während Exkursionen im Jahr 2010, unter der Leitung von Prof. Rainer Abart und Prof. Konstantin Petrakakis, wurden über 30 Handstücke aus unterschiedlichen Gebieten des österreichischen Moldanubikums gesammelt, welche danach allesamt mikroskopisch untersucht wurden. Unter dem Mikroskop wurden in vielen Proben außergewöhnliche Gesteinsgefüge sichtbar. Besonders bedeutungsvoll sind die, in der Granulit-Probe gefundenen, perthitischen Entmischungslamellen und die Symplektite im Granat-Amphibolit. Diese wurden als Hauptanhaltspunkte für weiterführende Untersuchungen für diese Arbeit ausgewählt. Während der genaueren Untersuchungen an diesen Proben wurden auch weitere, neue Reaktionsgefüge sichtbar und konnten gemäß dem definierten analytischen Protokoll bearbeitet werden.

1.2 Ziele

Das Hauptziel dieser Arbeit ist, mittels verschiedener mikroskopischer und analytischer Methoden Reaktionsmechanismen sowie die P-T-Entwicklung der Gesteine zu rekonstruieren. Um das zu ermöglichen, wurde folgender analytischer Ansatz verfolgt:

1. Optische Charakterisierung der Dünnschliffe mit dem Lichtmikroskop
2. Elektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) zur weiteren Identifizierung noch nicht bekannter Phasen & submikroskopischer Einschlüsse
3. Elektronenstrahl-Mikrosonde mit wellenlängendispersiver Röntgenspektroskopie (WDX) zur quantitativen Bestimmung der chemischen Zusammensetzung relevanter Mineralphasen
4. Statistische und graphische Auswertung der Ergebnisse um eventuelle Elementzonierungen in einzelnen Phasen zu definieren

Schließlich werden die neu gewonnenen Daten in Kontext zu der bestehenden Literatur gesetzt

2 Einführung

2.1 Reaktionsgefüge

Bei den Untersuchungen an metamorphen Gesteinen spielt das Gefüge des Gesteins eine wichtige Rolle. Dieses beinhaltet oft Informationen über die Prozesse, denen das Gestein ausgesetzt war (z.B. Yardley 1992). Mit Hilfe von Reaktionsgefügen, wie z.B. der chemischen Zonierung in Mineralen, Einschlüssen in Idioblasten, Reaktionssäumen und Reliktmineralen kann man die P-T-Entwicklung des Gesteins rekonstruieren. Laut Yardley (1992) zeigen die Gefüge oft Abweichungen vom chemischen Gleichgewicht an, die weiterhelfen den Rekristallisationsweg des Gesteins zur Gleichgewichtsparagenese zu finden. Die Reaktionsgefüge können auch Informationen über die ehemaligen Mineralvergesellschaftungen und deren Verhalten während des Umwandlungsprozesses liefern. In dieser Arbeit wurde eine Auswahl an relevanten Reaktionsgefügen untersucht die in den folgenden Absätzen genauer vorgestellt werden.

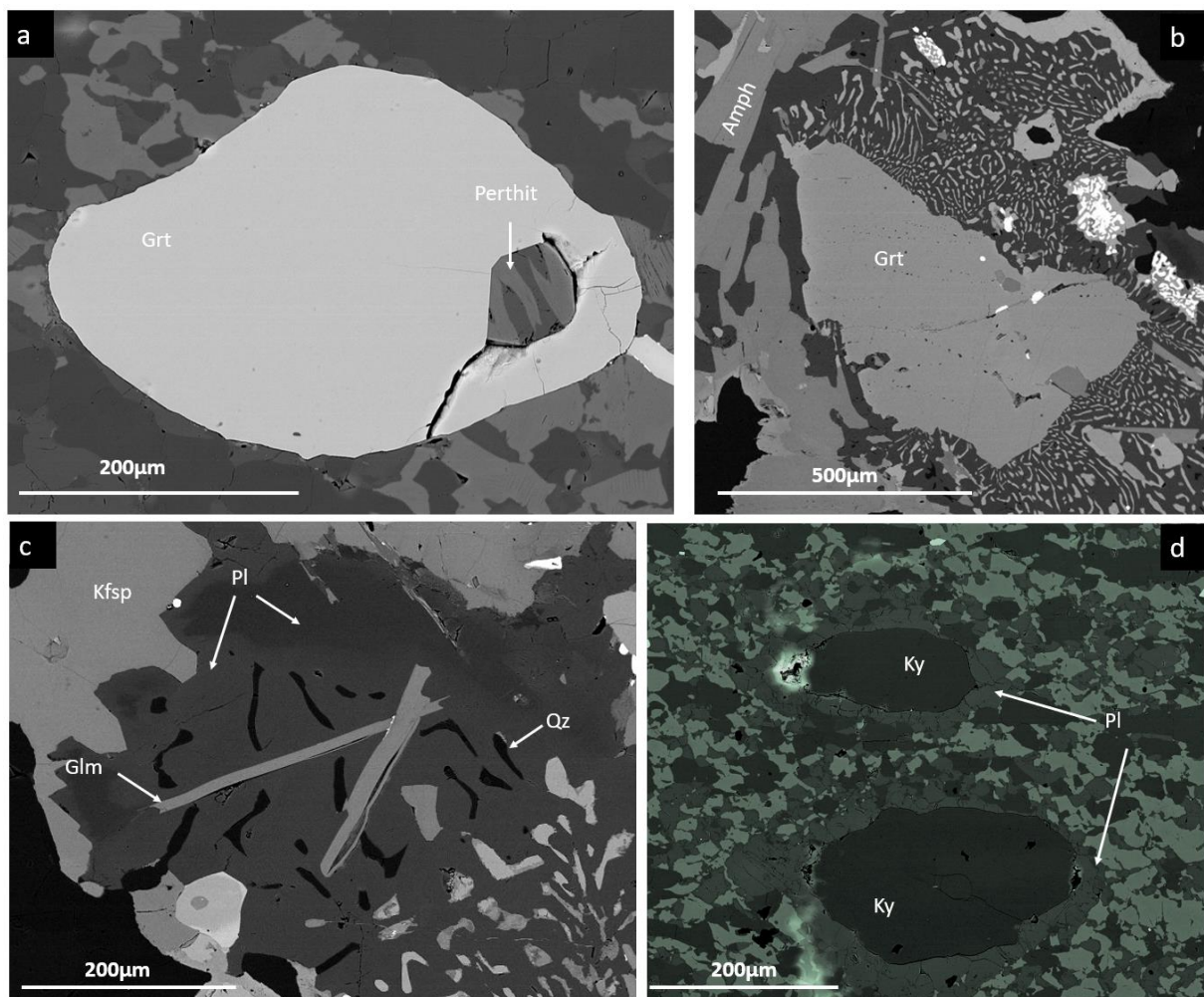


Abb. 1 Reaktionsgefüge welche in dieser Arbeit untersucht wurden: a) In der Mitte des hellen, großen Granatporphyroblasts befindet sich das entmischte Feldspatkorn (Perthit); b) der Granat in der Amphiolithmatrix ist großteils von Symplektit (feine Pyroxenminerale in einer Plagioklasmatrix) umgeben; c) Myrmekit (schwarze, würmchenförmige Quarze in plagioklasreicher Matrix); d) Im feinkörnigen Granulit kommt Kyanit meistens als Porphyroblast vor und ist umgeben von Plagioklaskoronen.

2.1.1 Perthit

In Zweistoff-System KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ der Feldspäte sind die Endglieder nur bei hoher Temperatur durchgehend mischbar (Okrusch und Matthes 2009). Wiederfährt einem Mischkristall von intermediärer Zusammensetzung eine Abkühlung von unter 600°C bei niedrigem Druck, beginnt er sich im Kristall zu entmischen (Abart et al. 2009a). Diese interne Entmischung erfolgt durch Diffusion von Na^+ und K^+ . Die Zusammensetzung der gebildeten Feldspäte ist dabei abhängig von der Temperatur. Nach Okrusch und Matthes (2009) bilden sich bei ca. 460°C Orthoklas (Or)-arme Albite (Ab) neben Ab-armen Mikroklinen, während unterhalb von 200°C fast nur die reinen Endglieder nebeneinander zu finden sind (Abb. 2). Wenn ein, bei hohen Temperaturen entstandener, homogener Kalifeldspat-Mischkristall auf $<650^\circ\text{C}$ abkühlt, entstehen daraus entweder Perthite (Albitlamellen in Kalifeldspat) (Abb. 1a), Antiperthite (Kalifeldspatlamellen in einem Albit) oder Mesoperthite (Albit und Kalifeldspat Lamellen in etwa gleichen Mengen vorhanden) (Abb. 1a). Diese lamellen- bis spindelartigen Reaktionsgefüge kann man auch je nach Größe der entmischten Phasen in drei Gruppen teilen: Makroperthit (makroskopisch sichtbar), Mikroperthit (mikroskopisch sichtbar) und Kryptoerthit (mit Elektronenmikroskop oder Röntgenbeugung erkennbar) (Okrusch und Matthes 2009). Jede dieser Entmischungsformen kann in der Petrologie als wichtiger P-T-Anzeiger dienen. Kühlen die Feldspäte schnell ab, kann die Entmischung der Endglieder entfallen (Okrusch und Matthes 2009).

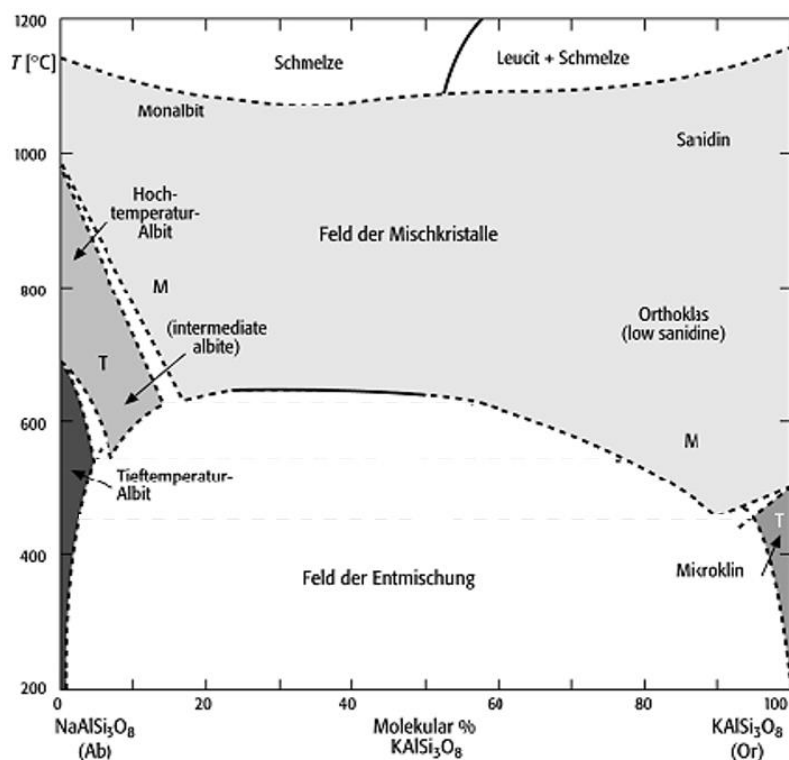


Abb. 2 Phasendiagramm für den Subsolidus-Bereich des binären Systems Ab-Or nach Okrusch und Matthes 2009

2.1.2 Symplektit

Eine Symplektitstruktur ist unter dem Mikroskop grundsätzlich deutlich zu erkennen (Abb. 1 b). Das zentrale Granatkorn ist umgeben von lamellaren oder wurmartigen Verwachsungen von zwei oder mehr Mineralphasen in Form einer Korona oder eines Saums (Okrusch und Matthes 2009). Dieses Reaktionsgefüge kann wichtige Informationen über den Verlauf der Metamorphose in dem Gestein liefern. Vor allem deutet es darauf hin, dass in diesem Gestein das chemische Gleichgewicht nicht erreicht wurde (MacKenzie und Adams 1995). Auch Obata (2011) zeigt, dass die Reaktionen, bei denen Symplektit entsteht, selten isochemisch sind. Die Minerale, die häufig als Bestandteile der Symplektite auftreten sind Plagioklas, Pyroxene und Amphibol während auch Cordierit, Spinell, Korund und andere Minerale vorkommen können (Obata 2011). Wenn Symplektite als Zerfallsprodukt aus Granat entstehen, werden sie Kelyphite genannt (Obata 2011). Symplektite können frei in der Matrix, als Einschlüsse in Mineralen oder in Rissen zwischen zwei Körnern entstehen. Grundsätzlich wird die Dekompression als Ursache der Symplektitbildung betrachtet, allerdings scheinen auch Temperaturveränderungen eine Rolle zu spielen (z.B. Degi et al. 2009; Petrakakis et al. 2018).

2.1.3 Myrmekit

Myrmekite sind irreguläre Verwachsungen von Quarz in Feldspat. Dieses Reaktionsgefüge findet man in felsischen, magmatischen und metamorphen Gesteinen. Der Begriff Myrmekit wurde bereits 1899 von Jakob Johannes Sederholm geprägt (Phillips 1974) und ist seitdem fester Bestandteil in der metamorphen Petrologie. Dabei beschrieb er dieses Gefüge als feinkörnige Verwachsungen von Plagioklas und wurmförmigem Quarz (Abb. 1c). Die kontinuierliche Erforschung dieses außergewöhnlichen Gefüges führte zu der Annahme, dass es grundsätzlich mehrere Entstehungsszenarien geben muss. Phillips (1974) hat diese in vier Hauptkategorien geteilt:

1. Direkt aus der Schmelze auskristallisiert
2. Metasomatisches Ersetzen des ehemaligen Feldspates
3. Entmischen des Plagioklases Komponente aus dem ternären Feldspat.

Zwischen 1940 und 1970 sind viele Modelle der möglichen Entstehung von Myrmekiten diskutiert worden. Aus einer Vielzahl von möglichen Ansätzen haben Collins und Collins (2013) in ihrer kürzliche erschienen Publikation die folgenden drei Modelle als haltbar erarbeitet:

1. Entmischung aus dem ternären Kalifeldspat
2. Ersetzen von Kalifeldspat durch Plagioklas
3. Ersetzen von Plagioklas durch Kalifeldspat

Myrmekite werden oft als eine spezielle Art der Symplektite bezeichnet. Im Vergleich zu den Symplektiten, bei denen die Bildungsprozesse meistens isochemisch verlaufen, kommt es bei der

Myrmekitbildung allerdings laut Gaidies et al. (2017) zu einer Änderung der Zusammensetzung der betroffenen Phasen. Hier wird der Kalifeldspat durch Plagioklas und Quarz ersetzt. Für diese Reaktion sind laut Abart et al. (2014) deutlich niedrigere Temperaturen als für die Symplektitbildung nötig.

2.1.4 Plagioklassaum um den Kyanit

Die Bildung eines Plagioklassaumes um einen Kyanit ist ein klassisches Gefügemerkmal, welches durch Dekompression entsteht. Die Anwesenheit von Kyanit ist für die Hochdruckphase der Metamorphose charakteristisch. Während der Dekompression bildet sich um den Kyanit aus einem bereits bestehenden Feldspat eine koronenartige Mikrostruktur aus Plagioklas und schützt das Korn in der Mitte vor weiteren Umwandlungsprozessen (Abb. 1 d). Dieses Phänomen kommt öfters in Hochdruck-Granuliten vor (Tajčmanová et al. 2011).

2.2 Topographische Lage der Aufschlüsse

Der Steinbruch Loja befindet sich ca. 100 km westlich von Wien. Die genauen Koordinaten des Aufschlusses lauten $48^{\circ}12'32.54''$ N und $15^{\circ}06'24.07''$ S. Der Steinbruch Meidling im Tale liegt ca. 70 km nordwestlich von Wien (Koordinaten $48^{\circ}20'33.19''$ N und $15^{\circ}37'35.42''$ S) (Abb. 3).

2.3 Geologischer Überblick

Aus geologischer Sicht, handelt sich in dieser Arbeit um die Gesteine des österreichischen Moldanubikums. Die Granulite gehören zur Gföhl Einheit und die Granatamphiboliten werden zu der bunten Serie gezählt (Abb. 5).



Abb. 3 Gelb markierte Stellen repräsentieren die topographische Lage der beiden Aufschlüsse

(Quelle: GoogleEarth)

2.3.1 Moldanubikum

Bis zum Mesozoikum gehörte das heutige Moldanubikum zum nördlichsten Teil des ehemaligen Kontinents Gondwana. Nach dem Auseinanderbrechen des Kontinents, lag die Moldanubiaplatte, abgetrennt durch eine Meeresstraße, südlich von der Kontinentalplatte Bohemia. Im Karbon, während der Variszischen Orogenese, schließt sich durch die Kollision der Bohemia-, Saxo-Thuringia- und Moldanubiaplatte diese Meeresstraße (Abb. 4). Laut Franke (2000) kam es gleichzeitig im nördlichen Teil Böhmens zur Schließung des so genannten Saxo-Thuringischen Ozeans, der zwischen Kontinentalplatte Bohemia und Saxo-Thuringia lag. Diese Ereignisse führten zur Bildung zweier großer Gebirgskomplexe: dem Saxothuringikum und dem Moldanubikum. Die Gesteine aus dieser Entstehungszeit werden als Varisziden bezeichnet. Im Süden sind die Varisziden in Zentraleuropa tektonisch in drei Zonen geteilt: Moldanubikum, Tepla-Barandium und Moravikum. Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit den Gesteinen aus dem österreichischen Teil des Moldanubikums.

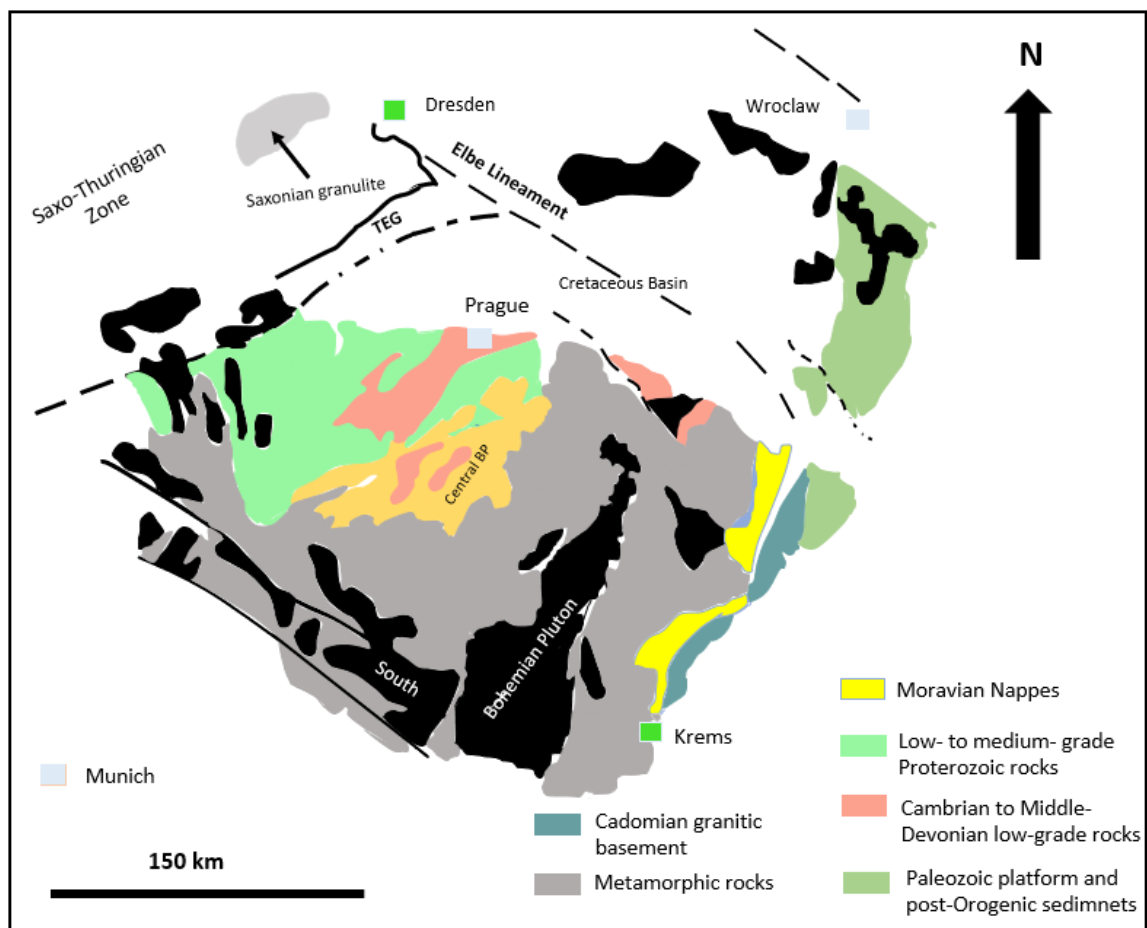


Abb. 4 Vereinfachte geologische Karte des südöstlichen Teils des Herzynischen Orogenes in Zentral Europa. Modifiziert nach Petrakakis, 1997

2.3.2 Das Moldanubikum in Österreich

Benannt nach den Flüssen um die es sich erstreckt (Moldau und Donau) zählen Lithologien aus dem Moldanubikum zu den ältesten Gesteinen Österreichs. Grundsätzlich umfasst es drei lithologische Einheiten: Ostrong Einheit, Drosendorf Einheit und Gföhl Einheit.

Als tiefste Einheit liegt die Ostrong Einheit im Westen des Moldanubikums. Laut Linner (1996) sind Cordieritgneise und Paragneise die zwei wichtigsten Gesteinstypen der monotonen Serie. Die für den Cordieritgneis typische Paragenese ist $Kfsp + Pl + Qz + Bt + Glm + Crd$. Für die Paragneise ist die $Kfsp + Pl + Glm + Bt +/- Sil$ Paragenese charakteristisch. Weiters zeigt Linner (1996), dass die Gesteine geochemisch auf Protolithen wie Tonsteine (Cordieritgneise) und Grauwacken (Paragneise) hinweisen. Das deutet an, dass dieser Teil der Varisziden aus einer Ablagerung an einem aktiven Kontinentalrand entstand. Laut Petrakakis (1997) kommen neben den zwei Hauptgesteinstypen auch weitere, weniger häufige Gesteine wie zum Beispiel Kalksilikate, Orthogneise, Quarzite und Eklogite in der monotonen Serie vor. Über dieser Einheit liegt die Drosendorf Einheit. Geringmächtige Gneis und Amphibolit Schichten stellen die Grenze zwischen diesen beiden Serien dar.

Als Basis der Bunten Serie befindet sich der so genannte Dobra Gneis. Petrakakis (1997) definiert dieses Gestein als I-Typ Dobra granodioritischer Orthogneis. In dieser Schicht sind auch Amphibolit Lagen zu finden (Petrakakis, 1997). Laut Gebauer & Friedl (1993) liegen die metamorphen Überprägungen dieser mittel-paläozoischen Gesteine bei 600 Ma und 333 Ma.

Weiters sind Marmor, Migmatite, Orthogneis, Amphibolite und Graphit-führende Paragneise und Schiefer sowie Quarzit in der bunten Serie zu finden. Wichtig für diese Arbeit sind die Granat-Amphibolite, mit der charakteristischen $Amph + Pl + Bt + Grt + Opx$ Paragenese. Diese zeigen Dekompressionserscheinungen in Form von $Opx + Pl$ -Symplektiten, welche als Zerfallsprodukte von Granaten während der Exhumierung definiert werden können (Petrakakis 1997). Die Metamorphosebedingungen, die zur Bildung der Gesteine der Bunten Serie führten, wurden bereits mehrfach untersucht und wie folgt eingeschätzt: 670°C und 5 kbar (Zaydan und Scharbert 1983), 700°C und 5-7 kbar (Högelsberger 1989) und 700-800°C und 8-11 kbar (Petrakakis 1997).

Die Gföhl Einheit stellt den tektonisch höchsten Teil des österreichischen Moldanubikums dar. Laut Wessely (2006) sind Granulite und Gföhler-Gneis die Hauptgesteine dieser Einheit. Daneben kommen auch Amphibolite, Orthogneis und Paragneise vor (Petrakakis 1997, Linner 2013).

Über dem Gföhler-Gneis liegen drei Granulit Klippen: Dunkelsteinerwald, Sankt Leonhard und Blumau. Die Granulite und der Gföhler Gneis wurden von Fuchs (1976), Klötzli et al. (1999) und Friedl et al. (2004) als kaledonisch kategorisiert. Die Granulite sind meist pyroxenfrei, mit der typischen Paragenese von $Grt + Bt + Sil \pm Ky + Kfsp + Pl + Qz + Rt + Ilm$. Laut Petrakakis und Jawecki, (1987) findet man gelegentlich auch Granulite mit Orthopyroxen- sowie mit $Grt-Opx-Kpx$ -Wechselagerungen.

Schabert und Kurat (1974) schätzten die Metamorphosebedingungen von den erwähnten Granuliten auf 760°C und 11 kbar. Als Protolith der Px- freien Granulite identifiziert Carswell (1991) saure magmatische Gesteine. Der Protolith der Pyroxen-führenden Granulite sind vermutliche Ca und Al reiche Gesteine.

Der weit verbreitete Gföhler- Gneis kommt meistens als $\text{Grt} \pm \text{Ky} + \text{Sil} + \text{Bt} + \text{Kfsp} + \text{Pl} + \text{Qz} + \text{Rt} + \text{Ilm}$ Paragenese vor (Petrakakis und Richter 1990). Oft werden in diesem Gestein Feldspat- Quarz Lagen beobachtet, welche durch dunklere Biotit-Sillimanit Lagen getrennt sind. Perthit, Kyanit und Granat kommen als typische Porphyroblasten im Gföhler- Gneis vor. Vellmer (1992) zeigt, dass der Gföhler- Gneis und die Granulite aus der Gföhl Einheit einen sehr ähnlichen Gesteinschemismus aufweisen. Wesentliche Unterschiede zwischen diese beiden Lithologien spiegeln sich in der Textur der Gesteine, was auf unterschiedlicher Metamorphosegrad hindeutet (Petrakakis und Richter 1991).

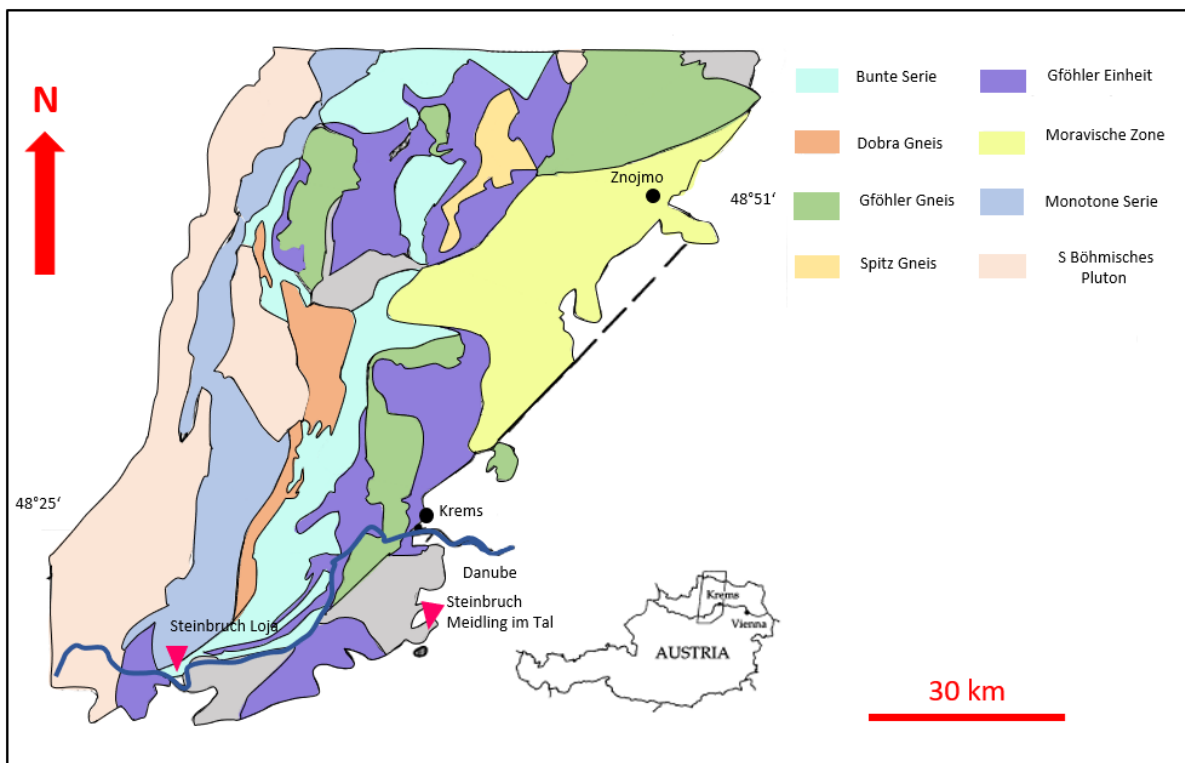


Abb. 5 Vereinfachte geologische Karte des österreichischen Moldanubikums. Modifiziert nach Scharbert und Fuchs 1981. Die roten Dreiecke zeigen die genaue Lage der beiden Steinbrüche.

3 Methoden

3.1 Mikroskopie

Für die Dünnschliffuntersuchungen wurden die Gesteinshandstücke in ausgewählten Bereichen in 20×30 mm große Klötzchen geschnitten. Weiters sind daraus 25 bis 30 µm dicke Dünnschliffe hergestellt worden. Mikroskopierte wurde mit dem Polarisationsmikroskop Axioplan 2 von Zeiss. Die Verwendung von 2,5×, 5×, 10× und 20× Plan-NEOFLUAR Objektiven ermöglichte einen Überblick über den Mineralbestand der Proben. Mit Hilfe von Polarisator und Analysator wurden die genauen Eigenschaften der einzelnen Minerale, wie zum Beispiel Lichtbrechung, Doppelbrechung oder Pleochroismus bestimmt. Abschließend wurde mit Hilfe des Mikroskops und der gekoppelten Leica DFC Kamera die ersten Übersichtsbilder der Schliffe gemacht und mit der Leica Application Suite V3.2.2 Software bearbeitet.

3.2 Back Scattered Electrons z-Contrast Imaging

Die Untersuchungen wurden mit dem FEI Inspect S SEM (Scanning Electron Microscopy, Rasterelektronenmikroskop (REM)) der Universität Wien durchgeführt. Es handelt sich um ein Elektronenmikroskop, welches für die genaueren Untersuchungen der Probenoberflächen angewendet wird. Als Elektronenquelle wird ein haarnadelförmiges, gekrümmtes Wolframfilament verwendet. Die erhitzte Quelle emittiert Elektronen, welche in einem elektrischen Feld beschleunigt werden. Der fokussierte Elektronenstrahl trifft auf die Probenoberfläche und interagiert mit dieser. Neben rückgestreuten Elektronen (backscattered electrons, BSE) und Sekundärelektronen aus der Probe wird auch die charakteristische Röntgenstrahlung als Untersuchungsgrundlage verwendet. Die Sekundärelektronen resultieren aus der Wechselwirkung zwischen den eintreffenden Primärelektronen und der Oberfläche des Objektes. Dadurch, dass es sich hier um Elektronen mit niedriger Energie (von einigen Elektronenvolt) handelt, werden Sekundärelektronen verwendet um die Topografie eines Objektes sichtbar zu machen. Durch die chemische Bindung, Ordnungszahl sowie durch Kontrastmechanismen kann das Endergebnis der SE-Analyse beeinflusst werden. Zum Beispiel, erscheinen schwerere Materialien auf den Abbildungen heller und Leichtere eher dunkler. Die zurückgestreuten Elektronen des Primärstrahls sind energiereicher als die Sekundärelektronen. Diese, einige keV starken Elektronen, sind durch die gleichen Parameter wie die SE beeinflussbar. BSE-Bilder werden als Materialkontrastbild aufgenommen. Auch hier werden schwerere Materialien heller als die leichteren dargestellt. Grundsätzlich beeinflusst die Beschleunigungsspannung bei beiden Elektronenarten die Auflösung des Bildes. Bei der Röntgenanalyse werden durch den primären Elektronenstrahl die kernnahen Elektronen der Probeatome aus deren Positionen gebracht und

durch Elektronen aus äußeren Schalen ersetzt. Die beim Übergang entstandene Energiedifferenz wird in Form von Röntgenstrahlung emittiert, welche für die verschiedenen Elemente charakteristisch ist. In dieser Arbeit wurde mit BSE Bildern gearbeitet, welche durch Abrastern der Oberfläche mit dem Elektronenstrahl erzeugt werden und typischerweise in Graustufen dargestellt werden. Dabei wurde eine Beschleunigungsspannung von 15 kV und ein Strahlstrom von 6 nA verwendet. Um Wechselwirkungen der BSE und der charakteristischen Röntgenstrahlung mit den Atomen und Molekülen aus der Luft zu vermeiden, wurde im Hochvakuum gemessen. Zusätzlich war es notwendig die Dünnschliffe mit Alkohol zu reinigen und schließlich mit Kohlenstoff zu bedampfen, um Aufladungseffekte zu vermeiden. Außerdem wurden Punktanalysen mittels EDX an ausgewählten Mineralkörnern gemacht, um qualitative chemische Informationen über die Zusammensetzung zu erhalten.

3.3 Elektronenstrahlmikrosonde

Um quantitative, chemische Informationen über die Haupt- und Nebenbestandteile der einzelnen Phasen zu bekommen, wurde die Elektronenstrahl-Mikrosonde – CAMECA SX Five verwendet. Das Funktionsprinzip des Geräts entspricht dem des Rasterelektronenmikroskops, allerdings werden andere Detektoren verwendet. Neben einem EDX Detektor gibt es auch fünf WDX Einheiten für die exakte Konzentrationsbestimmung in polierten Proben. Weiters können Konzentrationsprofile und Elementverteilungsbilder mit geringer Schrittweite erstellt werden. In dieser Arbeit wurden hauptsächlich die Na-, Si-, Mg-, Al-, K-, Ca-, Fe-, Ti- und Ba-Oxide gemessen. Dabei wurden eine Beschleunigungsspannung von 15 kV und eine Strahlstromstärke von 15 bis 20 nA verwendet. Aus den gewonnenen Daten konnte dann die chemische Zusammensetzung berechnet werden. Die Berechnungen der Mineralformeln würden wie im Petrakakis et al. 2018 durchgeführt. Bei ausgewählten Symplektiten und Perthiten wurden Elementverteilungsbilder angefertigt. Ein Konzentrationsprofil wurde bei einem Granat angewandt.

3.4 Software

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Programme verwendet: CorelDraw, Image J, Origin, Microsoft Office, Leica Application Suite V3.2.

4 Ergebnisse & Interpretation

4.1 Petrographie der Proben

4.1.1 Granulit (Probe 5)

4.1.1.1 Makroskopische Eigenschaften des Handstücks

In dem feinkörnigen Granulit-Handstück sind mit bloßem Auge kaum Minerale zu erkennen. Die graue Farbe resultiert aus einer felsischen Matrix, welche mit dünnen, dunklen Zonen mafischer Minerale durchzogen ist. Zu sehen sind viele kleine, runde, dunkle Körner, sowie wenige Millimeter große blaue Minerale und sehr dunkle, glänzende Phasen, welche makroskopisch nicht eindeutig identifizierbar sind.

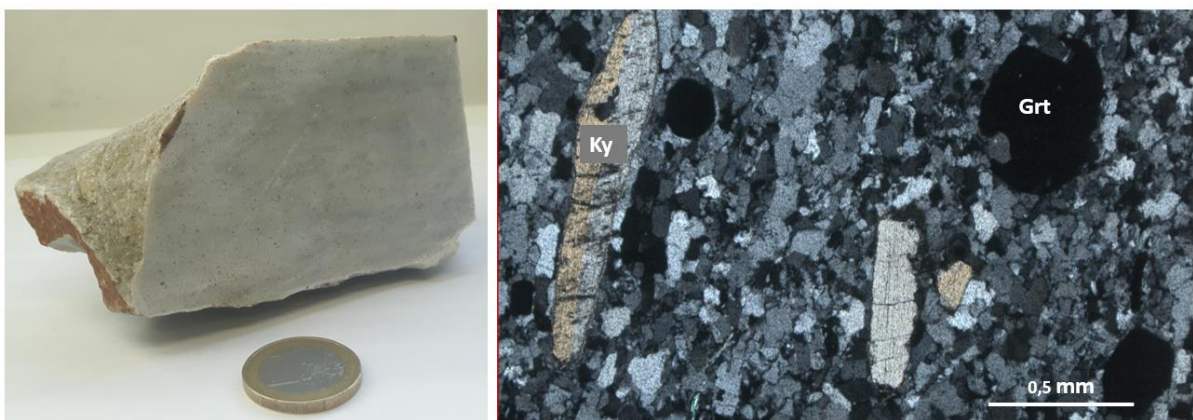


Abb. 6 Links: Handstück der Granulit-Probe; Rechts: Granulit-Dünnschliff unter dem Mikroskop

4.1.1.2 Mikroskopische Beschreibung

Im Granulit stellen Feldspat, Quarz, Granat und Kyanit die Hauptphasen dar, während Biotit und Rutil nur akzessorisch zu finden sind. Das Reaktionsgefüge bildet eine feldspat- und quarzreiche Matrix, worin öfters Granat und seltener Kyanit als Porphyroklasten vorkommen. Die Feldspäte sind meistens xenomorph und zeigen eine maximale Größe von bis zu 0,3 mm. Ein typisches Gefügemerkmal sind die perthitischen Entmischungen, welche eingeschlossen im Granat vorkommen. Diese Perthite sind maximal bis zu 0,1 mm groß und werden den Mikroperthite zugeordnet. Gelegentlich umschließt Feldspat als Plagioklasskorona die Kyanite (Abb. 1 d). Die Granate sind xenomorph, angerundet und zeigen einen maximalen Durchmesser von 1 mm. Nicht selten sind im Granat-Poikiloklasten Matrixminerale sowie Biotit und Rutil eingeschlossen. Weiters kommen Granate oft in der Nähe oder direkt im Plagioklassaum des Kyanits vor. Die bis zu 2 mm große Kyanite zeigen tafelige, farblose, meist leistenförmige Kristalle mit einem hohen Relief (Abb. 6). Außerdem sind stellenweise Verzwillingungen sichtbar (Abb. 6).

4.1.2 Granat-Amphibolit (Probe 25)

4.1.2.1 Makroskopische Eigenschaften des Handstücks

Verglichen mit der Granulitprobe zeigt das Granat-Amphibolithandstück eine dunkelgrauere Farbe (Abb. 7), welche einem höheren Anteil an mafischen Mineralen entspricht. Die Minerale sind relativ klein und mit dem bloßen Auge schwer zu identifizieren. Die unterschiedlichen Glanzgrade lassen auf zumindest zwei verschiedene, mafische Minerale schließen. Außerdem sind makroskopisch relativ große (max. ~5 mm), abgerundete, rosabraune Granate und milchigweiße Feldspäte erkennbar.



Abb. 7 Links: Handstück des Granatamphiboliths; Rechts: Amphibolitprobe unter dem Mikroskop

4.1.2.2 Mikroskopische Beschreibung

Im Granat-Amphibolit stellen die Amphibole den Hauptgemengteil dar. Außerdem kommen Granate, Feldspäte, opake Phasen und Pyroxene häufig vor. Glimmerminerale treten in geringen Mengen auf. Die Amphibole sind bis zu 3 mm groß und zeigen idio- bis xenomorphe Formen. Sie sind neben Feldspäten und Pyroxenen als Matrixminerale und sehr selten als Bestandteile der Symplektitkoronen zu finden. Die xenomorphen Granatkörner sind im Dünnschliff leicht zu erkennen. Es handelt sich hier um Porphyroklasten, welche gelegentlich Einschlüsse in Form von opaken Phasen und Matrixminerale beinhalten. Die Granate sind meistens bis zu 3 mm groß, abgerundet und zum Teil von Reaktionssäumen (Symplektite) zersetzt. Die Symplektite bestehen hauptsächlich aus Pyroxenen in einer Feldspatmatrix und schließen gelegentlich einzelne Amphibol- und Glimmerkörner ein. Die Reaktionssäume zeigen eine typische Dicke von 0,2-0,3 mm. Darin ist grundsätzlich eine spezifische Größenverteilung der Pyroxene erkennbar: je feiner das Korn desto näher am Granat.

4.2 Mineralchemie

4.2.1. Granulit

In der Matrix der Granulitprobe sind sowohl Kalifeldspäte als auch Plagioklase vorhanden. Die Kalifeldspäte weisen einen sehr hohen Kalium- ($0,88 < X_{Or} < 0,95$) und sehr geringen Natriumanteil ($X_{ab} < 0,12$) auf, wodurch sie als Sanidine zu klassifizieren sind. Die Plagioklase zeigen sehr hohe Natrium- und niedrige Calciumkonzentrationen. Bei einer durchschnittlichen Zusammensetzung von $0,7 < X_{ab} < 0,95$ handelt es sich somit vor allem um Oligoklase und Albite.

Die Plagioklaskoronen um die Kyanite zeigen hingegen höhere Ca-Gehalte. Die Ca-reichen Oligoklase können mit einer maximalen Anorthitkomponente von $X_{an} \leq 0,34$ teilweise auch als Andesine bezeichnet werden (Abb. 8). Die Feldspatzusammensetzung der perthitischen Entmischungen lässt sich wie folgt beschreiben: in einer kaliumreichen Matrix mit einer maximalen Orthoklaskomponente von $X_{Or} \leq 0,9$ finden sich Andesinlamellen mit $X_{an} \leq 0,4$ (Abb. 8).

Außerdem konnten signifikante Unterschiede im Eisengehalt der verschiedenen Feldspäte festgestellt werden. Matrixfeldspäte und Kyanitkoronen sind grundsätzlich sehr arm an Eisen mit durchschnittlich 0,05 Gew.-% FeO (max. 0,18 Gew.-%). Dagegen zeigen sowohl die Andesinlamellen als auch die Kalifeldspatmatrix der Perthite eine erhöhte Fe-Konzentration von durchschnittlich 0,45 Gew.-% FeO (max. 0,49 Gew.-%).

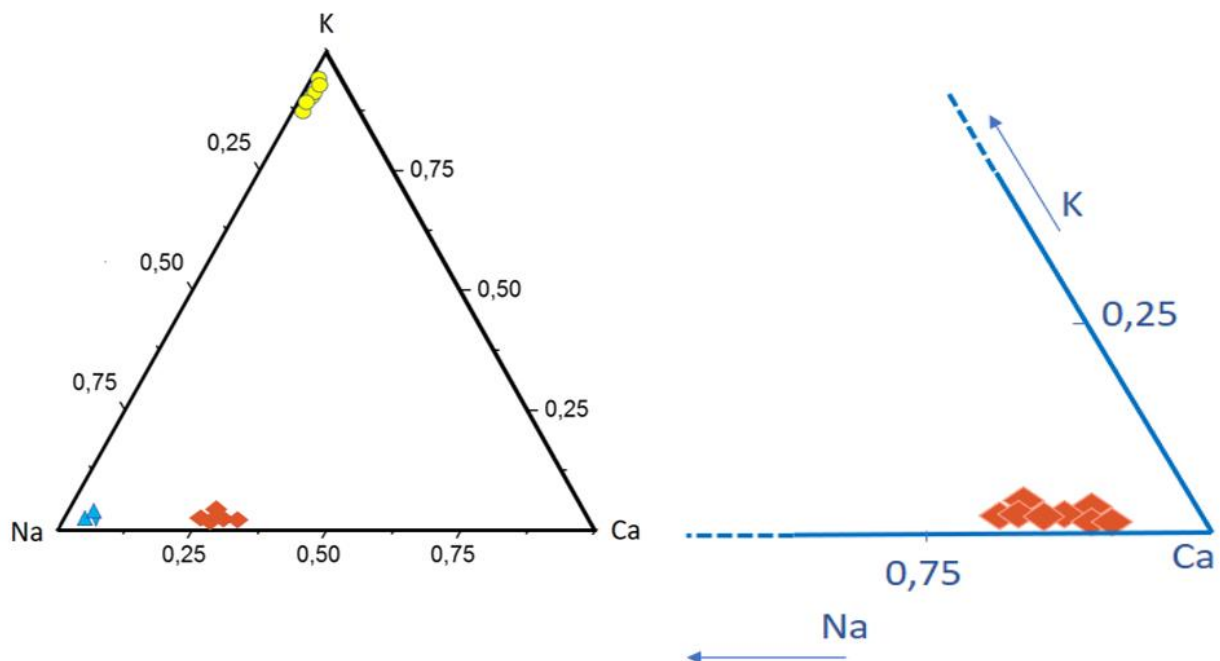


Abb. 8 Links: Zusammensetzung der Feldspäte der Granulit Probe (in Atomen pro Formeleinheit): blau und gelb: Matrixfeldspäte, Rot: Plagioklassaum um den Kyanit. Rechts: Feldspatzusammensetzung der Amphibolit Probe

PL	GRANULIT						Grt-Amphibolit	
	Kyanit-Saum		pertit		matrix		Matrix	
	m(5)	±s	m(5)	±s	m(16)	±s	m(6)	±s
SiO ₂	62,864	0,310	62,346	1,035	63,485	0,806	46,691	0,372
MgO	0,002	0,002	0,008	0,007	0,006	0,006	0,008	0,008
Na ₂ O	9,138	0,153	8,949	0,494	9,520	0,327	1,782	0,202
Al ₂ O ₃	23,336	0,151	23,929	0,603	22,956	0,532	34,196	0,338
TiO ₂	0,010	0,003	0,008	0,004	0,010	0,006	0,004	0,004
MnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CaO	4,028	0,162	4,699	0,776	3,439	0,583	17,058	0,388
FeO	0,077	0,057	0,295	0,195	0,050	0,050	0,390	0,113
K ₂ O	0,217	0,024	0,154	0,017	0,159	0,042	0,039	0,012
Total	99,673	0,24056	100,388	0,149	99,626	0,153	100,167	0,216
Si	2,788		2,749		2,810		2,140	
Ti	0,000		0,000		0,000		0,000	
Al	1,220		1,244		1,198		1,847	
Fe+3	0,001		0,000		0,000		0,000	
Fe+2	0,002		0,011		0,002		0,015	
Mn	0,000		0,000		0,000		0,000	
Mg	0,000		0,001		0,000		0,001	
Ca	0,191		0,222		0,163		0,837	
Na	0,786		0,765		0,817		0,158	
K	0,012		0,009		0,009		0,002	
alb	0,794		0,768		0,826		0,159	
an	0,193		0,223		0,165		0,839	
or	0,012		0,009		0,009		0,002	

Tabelle 1: Die Feldspat-Analysen in beiden Gesteinsarten. Das m steht für das Mittelwert und „s“ für die Standardabweichung der berechneten Werte. Die Zahlen neben dem „m“ geben die Größe der Population an.

Die Mineralchemie der Granate weist hohe Eisen- (X_{alm} 0,79 - 0,82) und Magnesiumgehalte (X_{pyr} 0,16 - 0,18) auf, wobei eine chemische Zonierung kaum erkennbar ist. Die Mangankonzentrationen sind so gering (max. 0,5 Gew.-% MnO), dass die Spessatinkomponente vernachlässigbar ist. Verglichen damit ist der Calciumgehalt höher und liegt bei maximal 2,2 Gew.-% CaO. Im ternären Diagramm (Abb. 9) ist ersichtlich, dass der Calciumanteil zu gering ist um Einfluss auf die Klassifizierung zu nehmen. Daher lassen sich die Granate als eisenreiche Pyrop-Almandin Mischkristalle beschreiben.

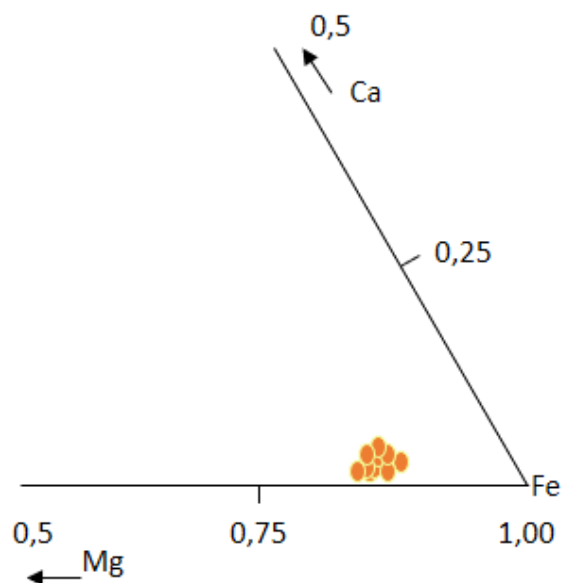


Abb. 9 : Zusammensetzung der Granat der Granulit Probe (In Atomen pro Formeleinheit)

4.2.2 Granat-Amphibolit

Im Granat-Amphibolit kommen Feldspäte vorwiegend als Matrixminerale der symplektitischen und myrmekitischen Reaktionsgefüge vor. Dabei handelt es sich vor allem um Plagioklase, welche mit $0,87 \leq X_{an} \leq 0,93$ als Bytownite beziehungsweise Anorthite zu klassifizieren sind. Dementsprechend wurden geringe Kalium- und Natriumanteile gemessen ($0,003 \leq X_{or}$ und $0,07 \leq X_{ab} \leq 0,15$) (Abb. 8). Weiters wurde in den Plagioklasen durchschnittlich 0,39 Gew.-% FeO (max. 0,6 Gew.-%) nachgewiesen.

Mikrosondenanalysen der Granate lieferten auffällig hohe Werte von Eisen und Aluminium. Der Aluminiumgehalt blieb bei allen Messpunkten mit durchschnittlich 1,98 ApF Al_2O_3 in etwa konstant, was auf durchgehend aluminiumreichen Phasen hindeutet. Granate sind grundsätzlich Mischkristalle mit unterschiedlichen Komponenten. Relevante Gehalte an Eisen, Calcium, Mangan und Magnesium der beprobten Minerale ergeben eine Zusammensetzung von $Alm_{0,63-0,70} Grs_{0,2-0,3} Sps_{0,02-0,2} Pyr_{0,05-0,11}$ (Abb. 10).

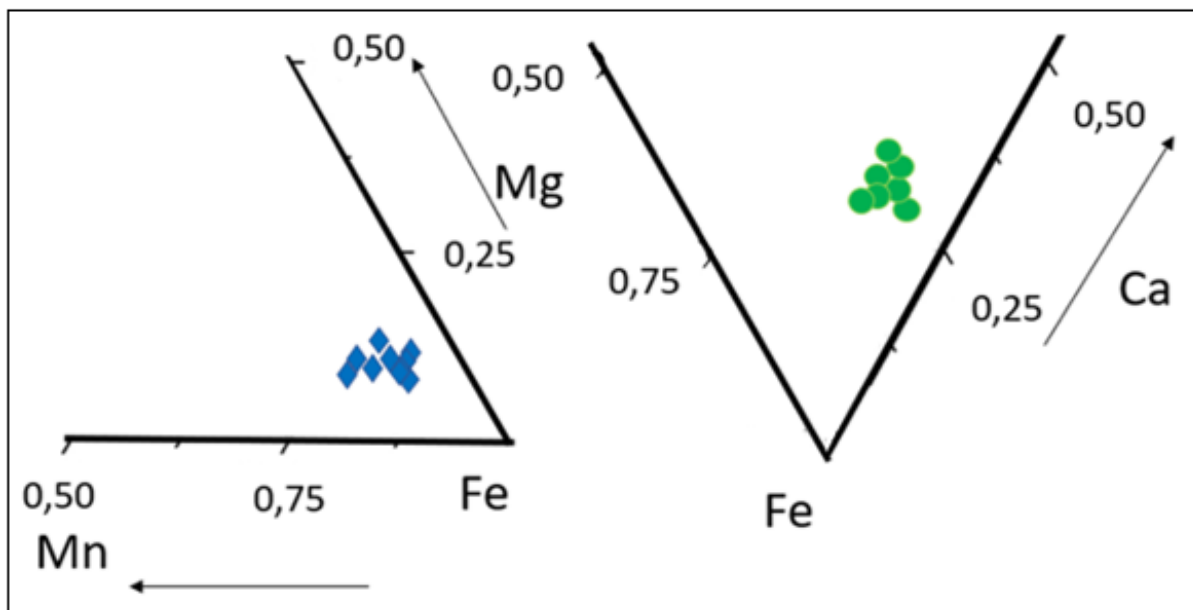


Abb. 10 Granat des Granat-Amphibolits mit Mn und mit Ca (In Atomen pro Formeleinheit).

Granat	Granulit				Amphibolit			
	Granat-Profil		Grt mit dem Perthit		Granat-Profil		Grt Matrix (9)	
	m (25)	±s	m (9)	±s	m (91)	±s	m (9)	±s
N	37,886	0,231	37,896	0,208	37,658	0,558	37,751	0,270
SiO ₂	6,594	0,267	6,793	0,183	2,746	1,174	3,517	0,831
MgO	21,985	0,107	21,994	0,098	21,446	0,440	21,625	0,362
Al ₂ O ₃	0,034	0,034	0,023	0,01	0,116	0,097	0,120	0,037
TiO ₂	0,477	0,050	0,473	0,034	3,159	2,361	1,215	0,945
MnO	1,562	0,950	1,065	0,418	10,638	2,396	9,936	1,156
CaO	0,016	0,016	0,016	0,016	0,007	0,017	0,010	0,015
Cr ₂ O ₃	31,762	0,669	32,036	0,394	24,476	2,510	26,001	1,623
FeO	100,317	0,632	100,295	0,272	100,246	0,749	100,175	0,227
Total	2,963		2,963		2,963		2,961	
Si	0,002		0,001		0,007		0,007	
Ti	0,000		0,000		0,000		0,000	
Al IV	2,026		2,027		1,989		1,999	
Al VI	0,001		0,001		0,000		0,001	
Cr	0,044		0,043		0,070		0,064	
Fe 3+	2,033		2,052		1,541		1,641	
Fe 2+	0,032		0,031		0,211		0,081	
Mn	0,769		0,792		0,322		0,411	
Mg	0,131		0,089		0,897		0,835	
Ca	2,963		2,963		2,963		2,961	
T(3)	2,073		2,072		2,066		2,071	
M(2)	2,965		2,965		2,970		2,968	
C(3)	69,045		69,662		52,979		56,244	
Xalm	1,051		1,041		6,925		2,662	
Xsps	25,554		26,332		10,595		13,559	
Xpyr	4,350		2,966		29,501		27,535	
Xgrs	0,093		0,000		0,000		0,000	
Xanr	0,002		0,000		0,000		0,000	
Xuwr	0,730		0,726		0,833		0,806	
Xfe								
Berechnete Werte								
Fe ₂ O ₃	0,744		0,726		1,184		1,090	
FeO	31,093		31,383		23,411		25,021	

Tabelle 2: Granatanalysen aus den beiden Proben. Das m steht für das Mittelwert und „s“ für die Standardabweichung der berechneten Werte. Die Zahlen neben dem „m“ geben die Größe der Population an.

Weiters ist auf den BSE Bildern sichtbar, dass die Ränder der Granate stellenweise heller sind als der Kern. Ein besonders auffälliges Korn ist in Abb. 11 abgebildet. Diese Zonierung im Granat deutet unterschiedliche Konzentrationen der Ca-, Mn-, Mg- und Fe-Oxide zwischen Kern und Rand an. Das gemessene Granatprofil bestätigt diese Beobachtungen eindrucksvoll. Die Almandinkomponente (FeO) ist über die gesamte Distanz dominant, zeigt allerdings einen negativen Trend Richtung Kern. CaO verhält sich gegensätzlich: es nimmt in Richtung Kern leicht zu. An den Granaträndern ist Pyrop gegenüber Spessartin die dritthäufigste Komponente, während MgO im Kern deutlich geringere Gehalte als MnO aufweist (Abb. 11).

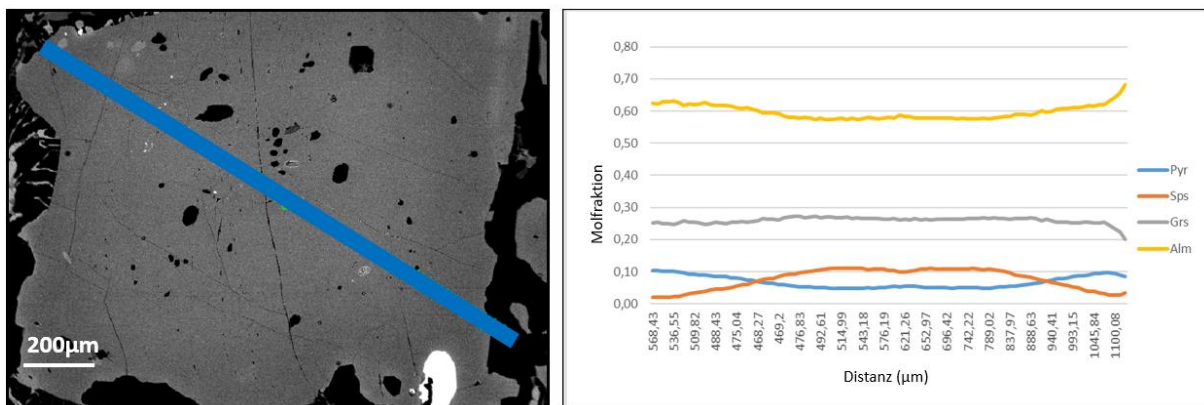


Abb. 11 Links: Granatkorn der Amphibolitprobe. Die blaue Linie zeigt wie das gemessene Profil durch Granat verläuft. Rechts: Molfraktion der einzelnen Komponenten in dem Granat-Profil.

4.2.3 Amphibol

Die Amphibole sind komplexe Mischkristalle mit einer Vielzahl an möglichen Zusammensetzungen. Die durchschnittliche Konzentration (Gew.-%) der relevanten Oxide ist: 19,21 (FeO), 11,14 (CaO), 10,71 (Al₂O₃), 8,1 (MgO), 2,07 (TiO₂), 1,35 (K₂O), 1,07 (Na₂O). Wie auch im ternären Diagramm (Abb. 12) ersichtlich ist, zeigen die Amphibole eine eisendominierte Zusammensetzung. Gemäß der Klassifikation nach Leake et al. (1997) handelt es sich hier um Ferroedenite.

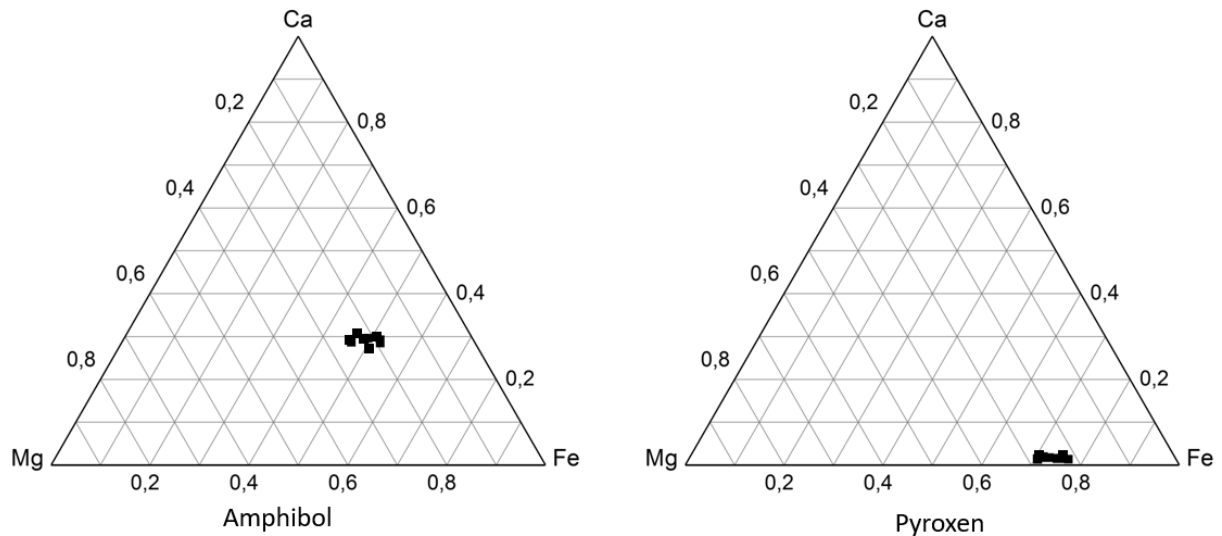


Abb. 12 Links: Amphibol; Rechts Pyroxen in dem Amphibolit (In Atomen pro Formeleinheit)

4.2.4 Pyroxen

Es handelt sich um calcium- und natriumarme Pyroxene, welche reich an Magnesium (0,25 X_{enst}) und Eisen (0,73 X_{fs}) sind (Abb. 12) und dementsprechend als Orthopyroxene zu bezeichnen sind (Tabelle 3). Selten sind auch calciumreiche, augitische Klinopyroxene in der Matrix oder in den Symplektiten zu finden.

Amph	m(10)	s +-	OPX	Grt-Am.	
				m(9)	s±
SiO ₂	42,218	0,672	SiO ₂	49,780	0,936
MgO	7,749	0,617	MgO	11,703	0,768
Na ₂ O	1,161	0,048	Na ₂ O	0,024	0,022
Al ₂ O ₃	10,693	0,615	Al ₂ O ₃	0,450	0,083
K ₂ O	1,216	0,196	TiO ₂	0,165	0,127
TiO ₂	2,112	0,219	MnO	1,003	0,050
MnO	0,251	0,033	CaO	0,732	0,083
CaO	11,009	0,126	FeO	33,998	1,554
FeO	19,845	0,910	K ₂ O	0,008	0,006
Cr ₂ O ₃	0,050	0,047	Total	97,264	1,189
Total	96,304	0,361			
	FeO	Fe ₂ O ₃	Si	2,033	
Si	6,535	6,189	Ti	0,005	
Al_IV	1,466	1,811	Al	0,022	
Ti	0,000	0,000	Cr	0,000	
Al_VI	0,485	0,036	Fe+3	0,000	
Ti	0,246	0,233	Fe+2	0,583	
Cr	0,002	0,002	Mg	0,358	
Fe 3+	0,000	2,433	Fe+2	0,578	
Mg	1,788	1,693	Mn	0,035	
Fe 2+	2,479	0,000	Mg	0,355	
Mn	0,000	0,031	Ca	0,032	
Mg	0,000	0,000	Na	0,000	
Fe 2+	0,09	0,000	K	0,002	
Mn	0,033	0,000	T(2)	2,033	
Ca	1,826	1,729	M1(1)	0,967	
Na	0,052	0,271	M2(1)	1,002	
Na	0,297	0,059	X _{Fe}	0,620	
K	0,240	0,227			
T(8)	8	8			
C(5)	5	4,428			
B(2)	2	2			
A(0-1)	0,537	0,286			
X _{Fe}	0,590	0,590			

Tabelle 3: Amphibol- (links) und Orthopyroxen- Analysen(rechts) aus dem Granat-Amphibolit. Das m steht für das Mittelwert und „s“ für die Standardabweichung der berechneten Werte. Die Zahlen neben dem „m“ geben die Größe der Population an. Die Analysen des Amphibols wurden bezogen auf maximale und minimale Werte des Fe³⁺ berechnet.

4.3 Reaktionsgefüge

4.3.1 Reaktionsgefüge im Granulit

4.3.1.1 Perthit

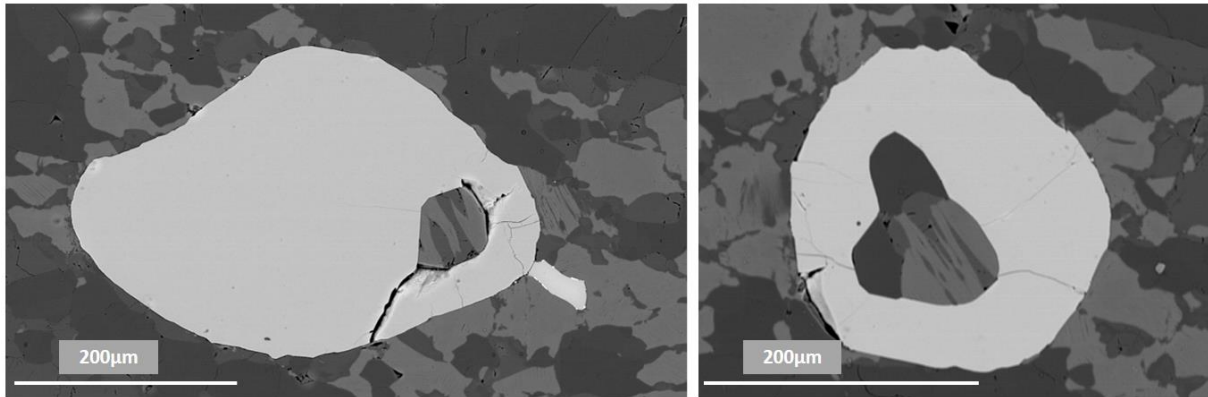


Abb. 13 BSE-Bilder Perthiteinschlüssen im Granat.

In den Granulitdünnschliffen kommt perthitischer Feldspat sowohl in der Matrix als auch als Einschluss im Granat vor. Die Perthiteinschlüsse im Granat erreichen einen Durchmesser von bis zu ca. 120 µm und sind daher auch mit dem Durchlichtmikroskop sichtbar (Abb. 13 und 15). Die bis zu 70 µm langen albitreichen Lamellen mit der Zusammensetzung $\text{Or}_{10}\text{Ab}_{65}\text{An}_{34}$ kommen im orthoklasreichen Wirtmineral ($\text{Or}_{87}\text{Ab}_{12}\text{An}_1$) vor. Im BSE-Bild erscheinen sie linsen- bis leistenförmig mit einer variablen Dicke von bis zu 10 µm. Mittels des Programms Image J konnte eine Einschätzung des prozentuellen Volumensanteil der Albitkomponente aus den BSE-Bildern errechnet werden. Für die Perthite im Granat beträgt diese 10-30 Vol%.

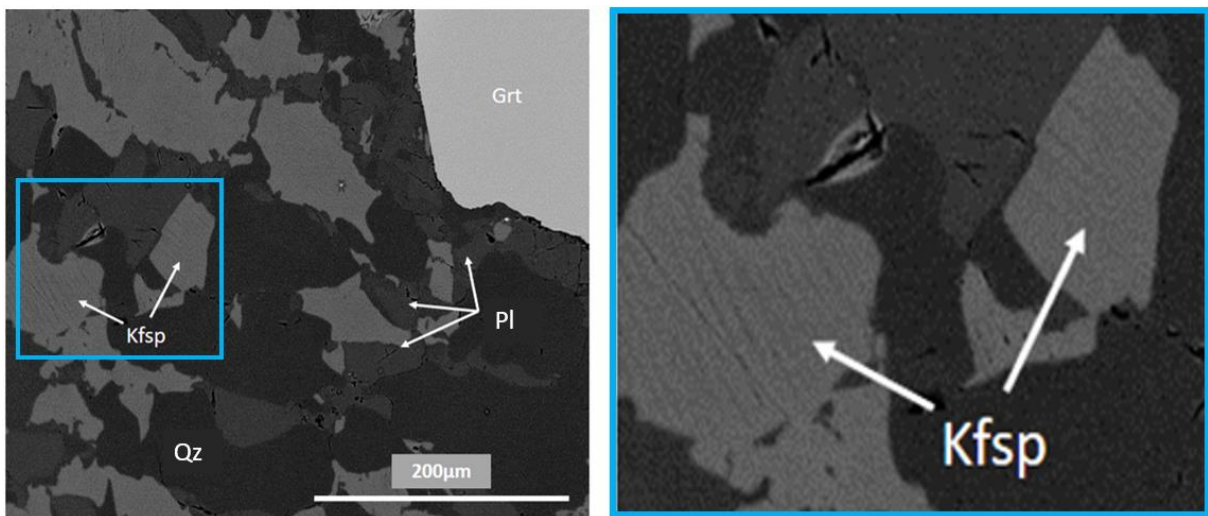


Abb. 14 BSE-Bilder von der Granulitmatrix. Rechts: sehr feinen Perthitlamellen der Matrixperthite.

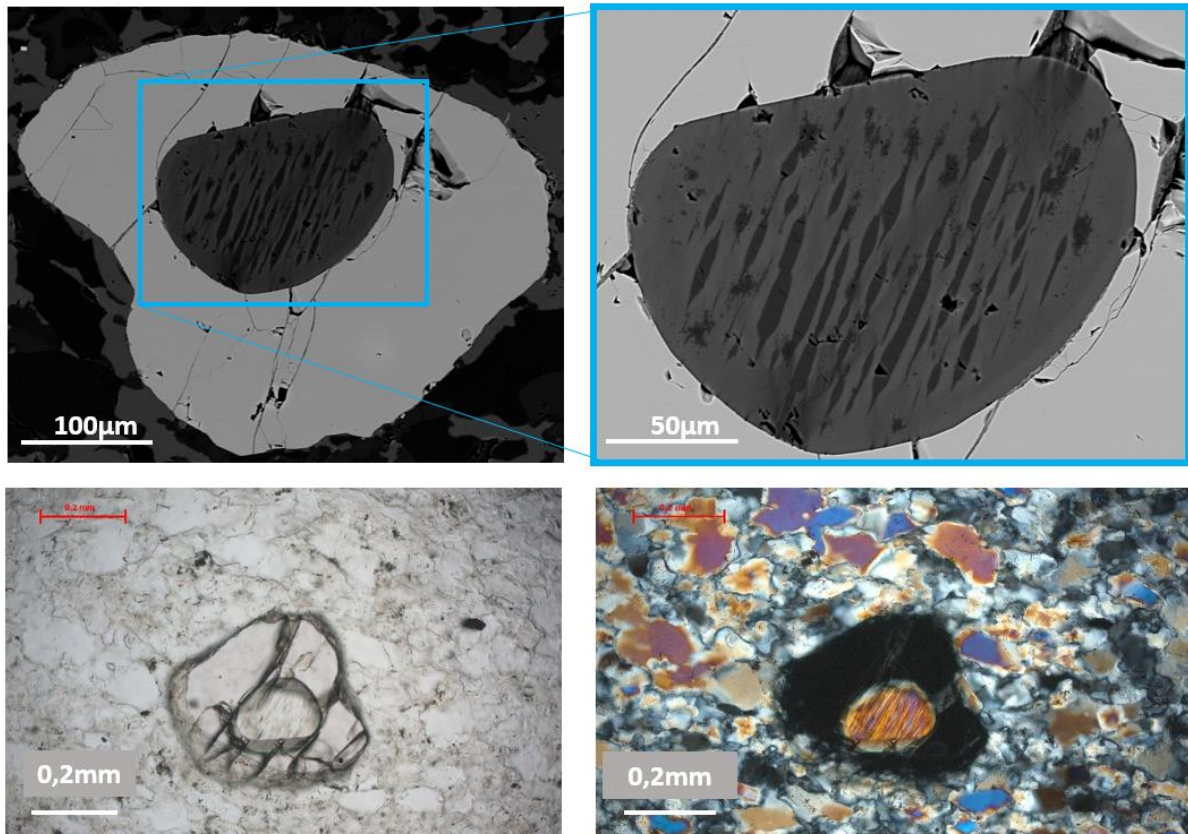


Abb. 15 Auf allen vier Bildern ist der gleiche Granat mit Perthit-Einschluss zu sehen. Oben: BSE-Bilder des Korns Unten: Durchlichtmikroskopbilder (rechts: mit XPL)

Auf Grund der äußerst geringen Dicke der Entmischungslamellen konnten die Matrixperthite erst in den REM- und BSE-Bildern gefunden werden (Abb. 14). Im Vergleich zu dem im Granat eingeschlossenen Perthit unterscheiden sich die Matrixperthite in den nachfolgenden Punkten. Sie sind deutlich K- reicher, mit der Zusammensetzung von $\text{Or}_{92}\text{Ab}_{8}\text{An}_0$. Außerdem sind die Na-Lamellen viel feiner als jene der im Granat eingeschlossenen Perthite und erreichen eine Dicke von kaum $2\text{ }\mu\text{m}$. Dadurch handelt es sich um Mikro- und großteils um Kryptoperthite. Der Volumenanteil der Albitkomponente ist deutlich geringer und erreicht nicht mehr als 10 Vol%.

Eisenwerte im Granat-Perthit reichen bis zu $X_{\text{FeO}} < 0,03$. Bei den Perthite aus der Matrix ist Eisen Wert um das zehnfache kleiner als in Granat eingeschlossenen Körnern.

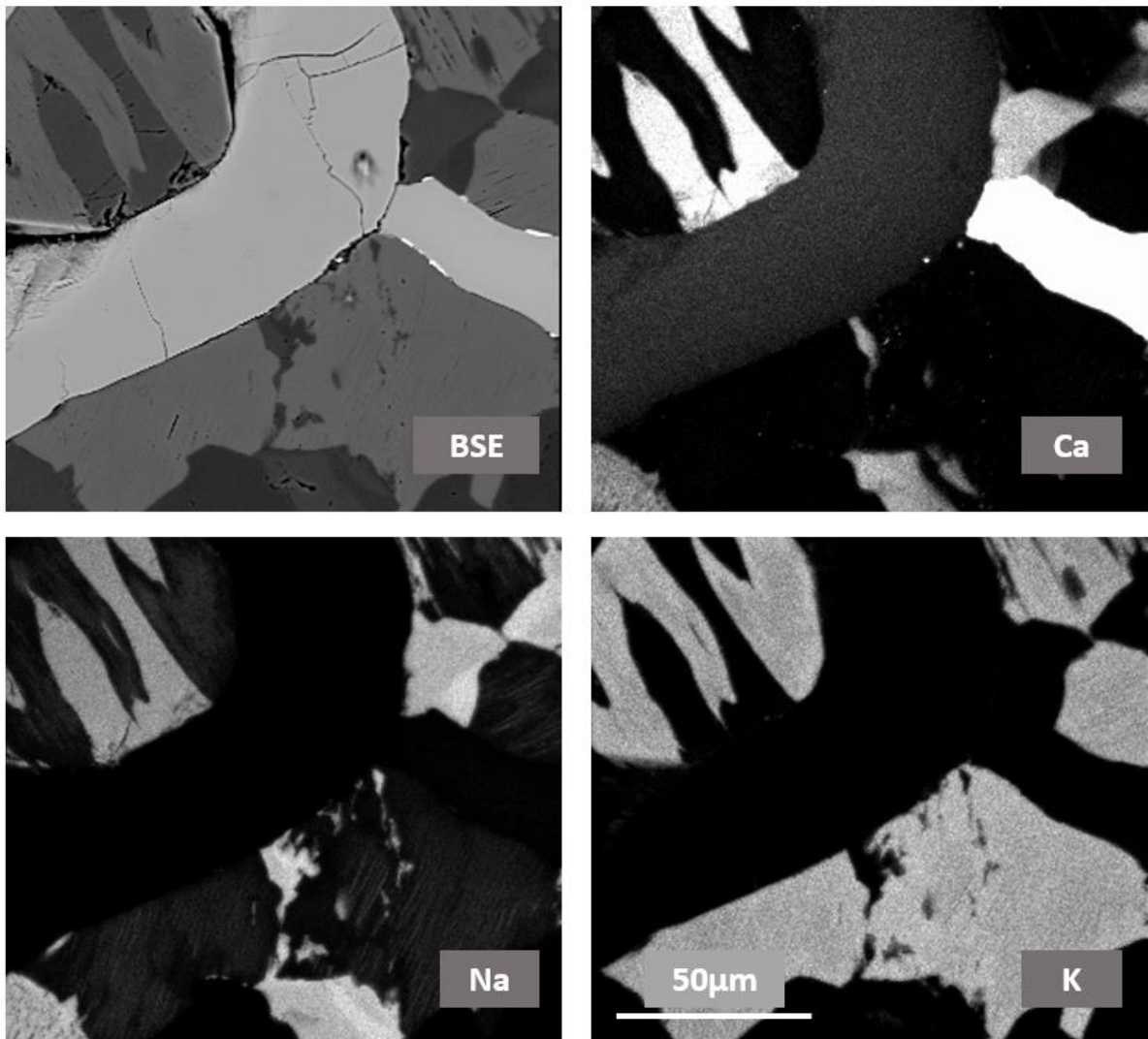
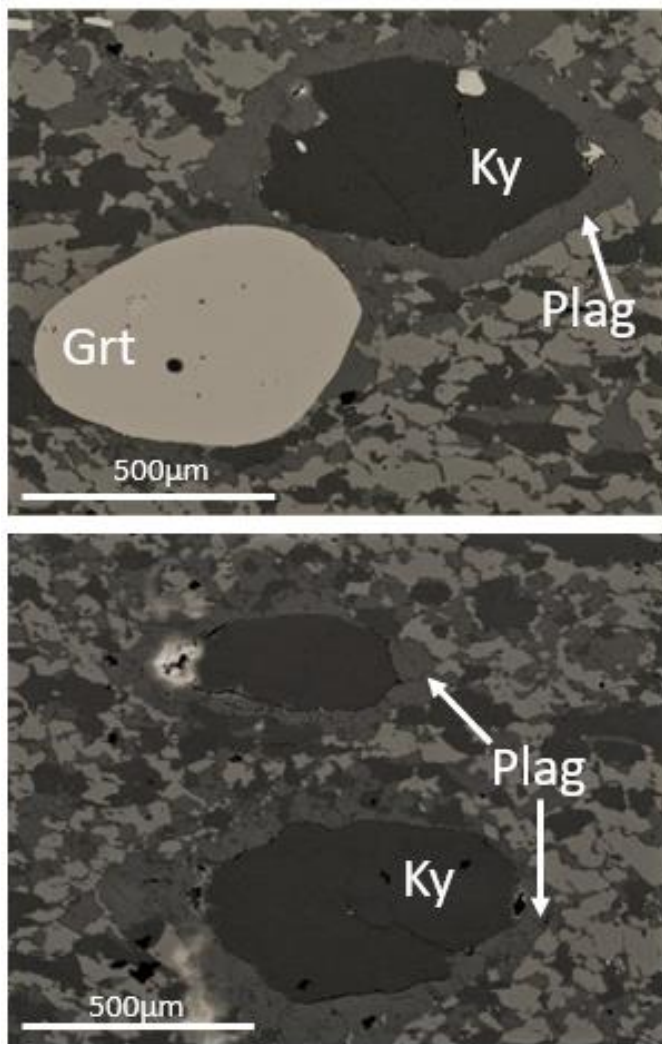


Abb. 16 Elementmapping-Bild von einem Teil des Granats mit Perthit und umgebender Matrix. Links oben: BSE-Bild. Links unten: Na-Verteilung. Rechts oben: Ca-Verteilung und rechts unten K-Verteilung



4.3.1.2 Plagioklassaum um den Kyanit

In dem Granulit kommt Kyanit als Porphyroklast vor. Es handelt sich um bis zu 60 μm große, xenomorphe Matrixminerale. Kyanite kommen auch als Einschlüsse im Granat vor. In diesem Fall sind die Kyanitkörner deutlich kleiner und maximal 10 μm groß. Meistens sind die Kyanite der Matrix von einem Saum aus Plagioklas umgeben. Dieser wird als ein typisches Phänomen für Hochdruckgranulite angesehen (Tajčmanová et al. 2011). Der Plagioklassaum um den Kyanit ist bis zu 150 μm dick und kann, mit einer Zusammensetzung von $\text{Or}_{20}\text{Ab}_{68}\text{An}_{30}$, als Oligoklas bezeichnet werden. In einigen Fällen findet man neben Plagioklas auch Granat sowie opake Phasen im Randbereich des Kyanits oder in dessen nächster Umgebung (Abb. 17).

Abb. 17 Alle drei Bilder zeigen unterschiedliche Kyanitkristalle umgeben von Plagioklassaum und Granat

Der Plagioklassaum erscheint im BSE-Bild farblich einheitlich (Abb. 18). Anders als bei den Matrixplagioklasen (Abb. 14) sind keine hell/dunkel Zonen erkennbar, welche auf große chemische Unterschiede schließen lassen. Punktuelle, quantitative Mikrosondenanalysen des Plagioklassaumes deuten allerdings auf eine schwache chemische Zonierung hin. Messpunkte (z.B. 47 und 52) nahe am Kyanitporphyroklasten weisen eine anorthitreichere Zusammensetzung auf, während Messpunkte in den äußeren Bereichen des Saumes eher Albit reicher sind. Die maximalen Variationen innerhalb der gemessenen Punkte liegen sowohl für Na_2O als auch für CaO bei 0,4 Gew-%.

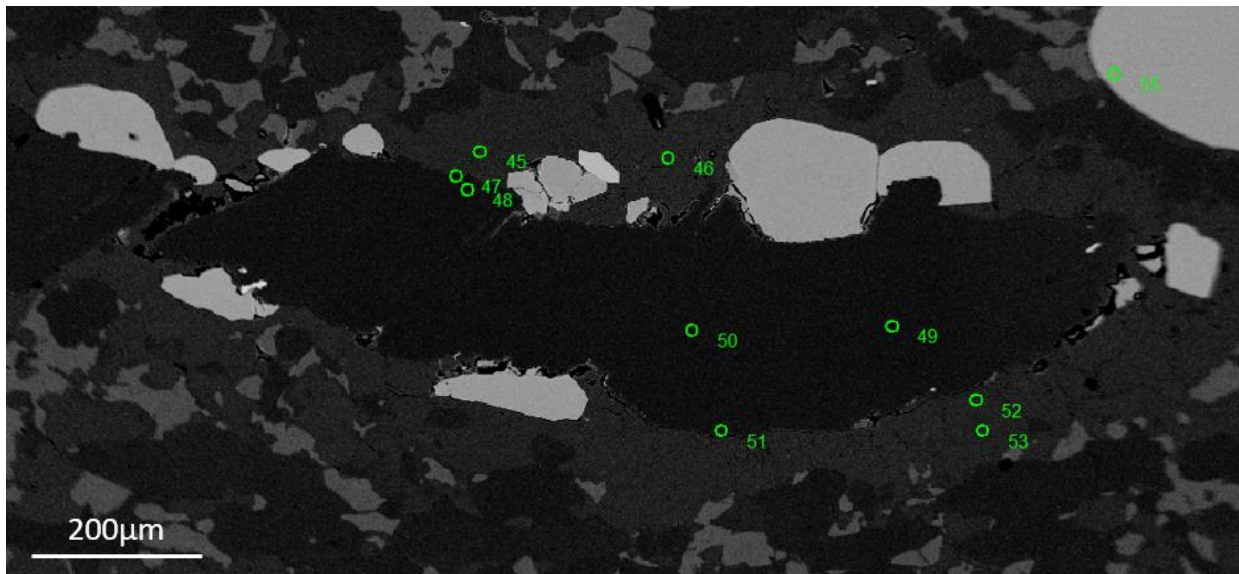


Abb. 18 BSE-Bild des Kyanitporphyroklasten mit Plagioklassaum. Messpunkte entsprechen die Tabelle 1 (siehe Anhang)

4.3.2 Reaktionsgefüge im Granat- Amphibolit

4.3.2.1 Symplektit

In dem Amphibolitdünnschliff sind die meisten Granatkörner teilweise oder komplett mit einem Symplektitssaum umrandet (Abb. 19). Allerdings konnten keine Symplektite als Einschlüsse im Granat oder in den Granatrissen gefunden werden. Die Symplektite bestehen hauptsächlich aus Plagioklas und Orthopyroxen. Die Pyroxene bilden in der plagioklasreichen Matrix lamellenartige und wurmförmige Kristalle. Diese sind sehr unterschiedlich in Form und Länge. In den Bereichen nahe am Granatkorn sind die Pyroxene eher feinkörnig und in Richtung Matrix werden sie zunehmend gröber (bis zu ca. 200 µm) (Abb. 19). Tendenziell wachsen die Pyroxene senkrecht zur Granatkorngrenze. Bei den Orthopyroxenen dominiert der Eisenanteil gegenüber der Magnesiumkomponente mit einer analysierten Zusammensetzung von $0,70 \leq X_{fs} \leq 0,77$. Die Symplektitmatrix besteht aus Ca-reichen Plagioklasen mit bytownitischer bis anorthitischer Zusammensetzung ($0,87 \leq X_{an} \leq 0,93$) (Abb. 21). Gelegentlich sind Amphibol- und Glimmerminerale im Bereich des Saumes sichtbar.

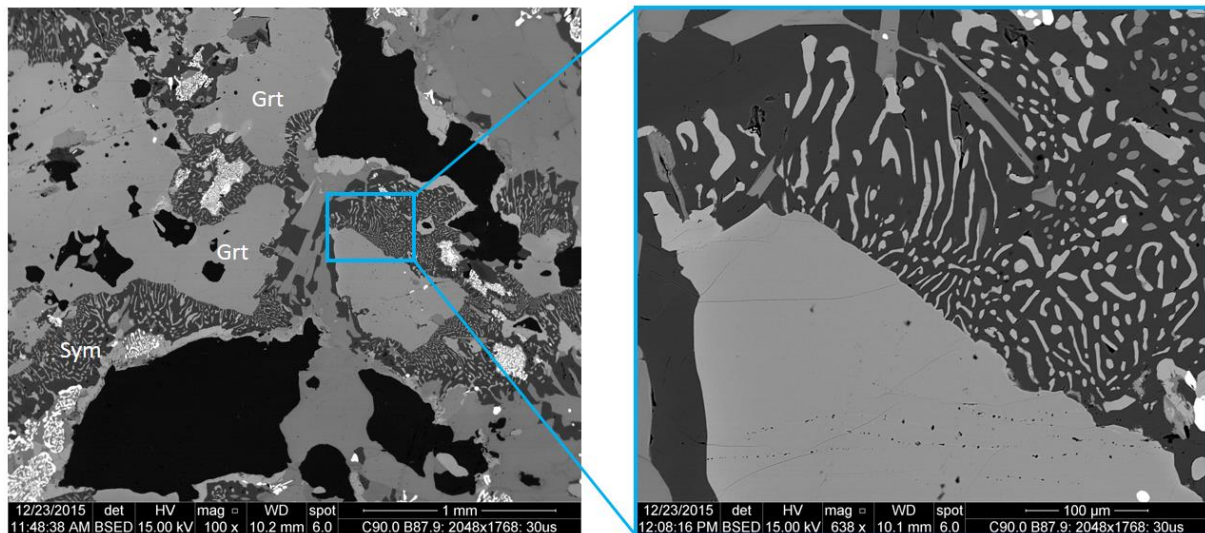


Abb. 19 BSE_Bild von Symplektit. Rechts: Detailansicht des Symplektits. Das große Granatkorn ist von einer Feldspatmatrix umgeben (dunkelgrau), darin befinden sich wurmförmige Pyroxene (hellgrau) und gelegentlich Amphibole

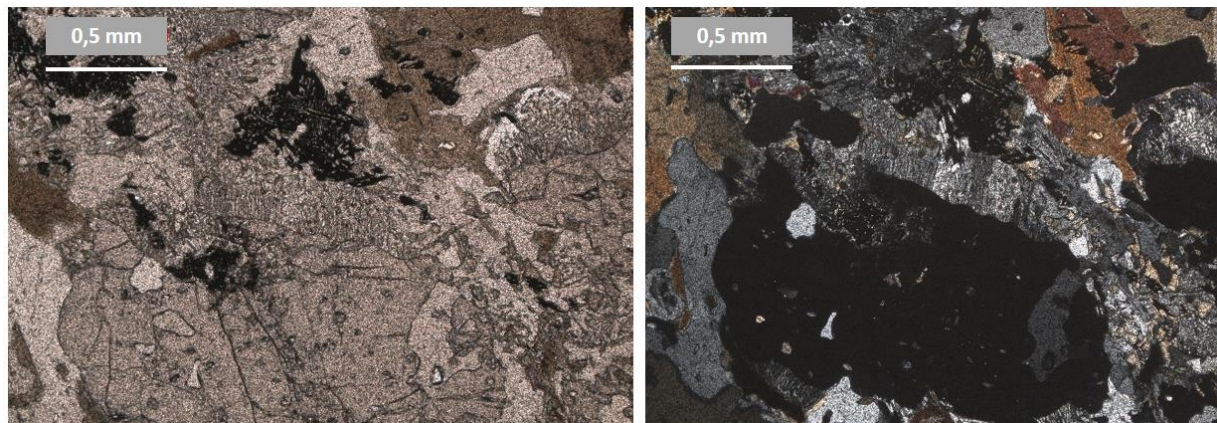


Abb. 20 Symplektit unter dem Durchlichtmikroskop. Rechts: mit XPL

Um die Elementverteilung der wichtigsten Elemente im Granat und Symplektit zu verdeutlichen, wurden mikrochemische Kartierungen mittels Mikrosonde durchgeführt. Die Abbildung 21 zeigt, dass Natrium nur im Plagioklas anwesend ist, während es in den Pyroxenen und im Granat fehlt. Der Na-Gehalt der Symplektitmatrix scheint zur Reaktionsfront hin leicht erhöht zu sein (Abb. 21 b). Mittels quantitativen Punktanalysen an ausgewählten Plagioklaskörnern kann der Albitanteil mit $X_{ab} < 0,14$ angegeben werden.

Die kartierten Pyroxene des Symplektits sind allesamt reich an Eisen und Magnesium, während der Al-Gehalt durchgehend gering ist (Abb. 20).

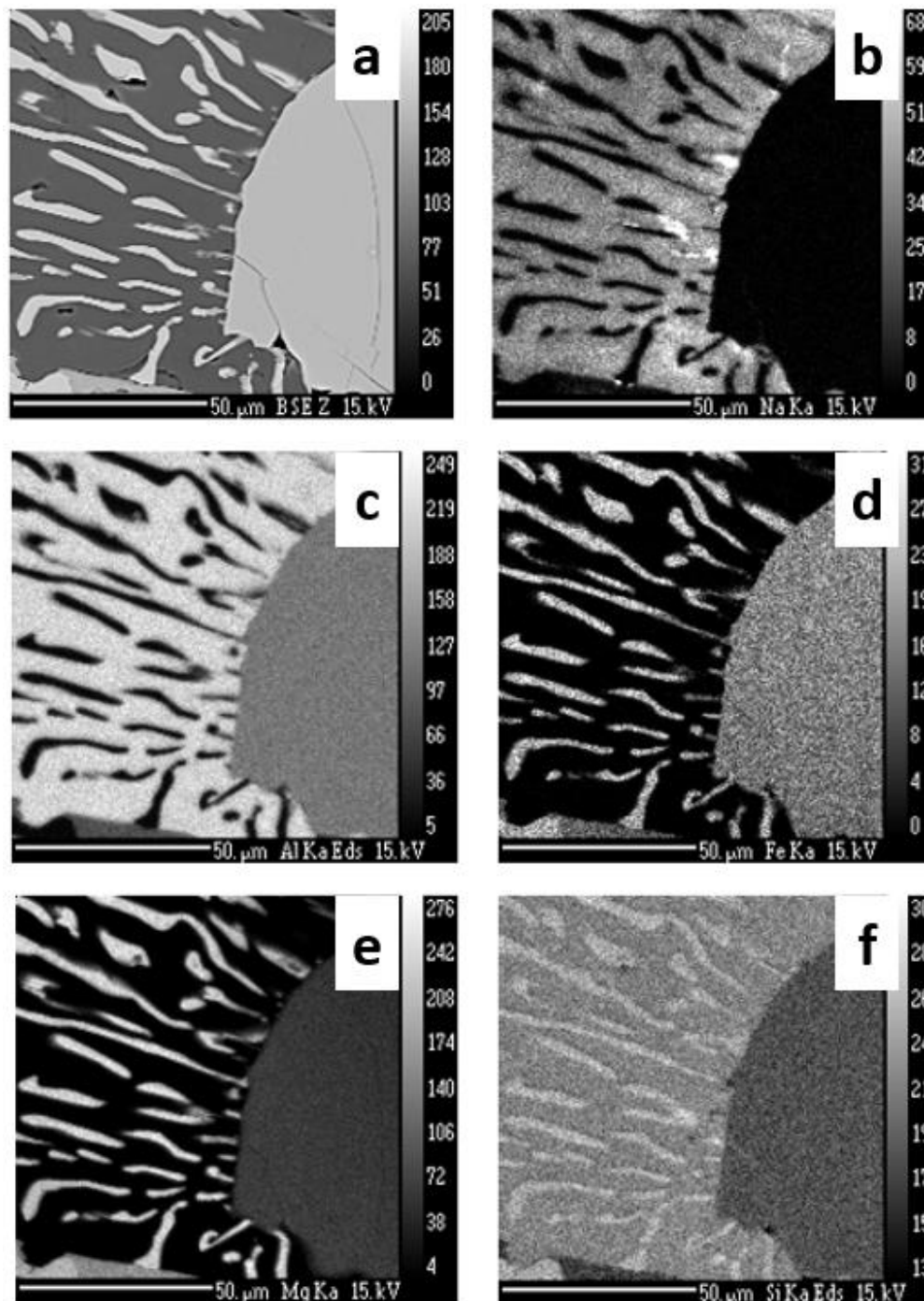


Abb. 21 Elementmapping- Bilder des Granats und Symplektits.

Bedeutung der Symplektiten beruht unter anderem auch darauf, dass die die Informationen über die Art der Reaktion zwischen Granat und umgebenden Phasen liefern. Ist diese Reaktion zum Beispiel isochemisch, dann kann man weitere Methoden anwenden um die P-T-Geschichte des Gesteins besser zu verstehen.

Um die Verhältnisse der Elementkonzentrationen feststellen zu können, wurde die folgende Schritte vorgenommen:

1. Ein 100x100µm BSE-Bild der Elementmapping Analyse wurde genommen, um die Flächenanteile der Symplektitphasen, sowie der des Granats auszurechnen. Das wurde mit Hilfe von Image J Software gemacht.
2. Man nimmt an, dass sich die Phasen im dreidimensionalen Raum so verhalten, wie die in dem zweidimensionalen. Das bedeutet, dass man die Flächenanteile als Volumensanteile nehmen kann.
3. Pyroxen und Plagioklas werden zu einer einzelnen Phase umgerechnet, das sogenannten Gesamtsymplektit.
4. Mit Hilfe von Gleichung 1 wurden die Massenanteile der Oxide in einzelnen Phasen in die Massenanteile der Oxide in Gesamtsymplektit umgerechnet.
5. Ergebnisse der Modalanalyse des Symplektits werden dann mit dem Modalbestand des Granats verglichen und geplottet (Abb. 22).

Gleichung 1
$$wt-\%_{j,Symp} = \frac{\sum_i (vol-\%)_i (wt-\%)_i^j \rho_i}{\rho_{Symp}}$$

j = Oxid

i = Phase

$wt-\%_{j,symp}$ = Gehalt der Oxide der Phase i im Symplektit in Gewichtsprozent

$vol-\%i$ = Volumenanteil der Phase i im Symplektit in Volumenprozent

ρ_i = Dichte der Phase i

ρ_{Symp} = Dichte des „Gesamtsymplektits“

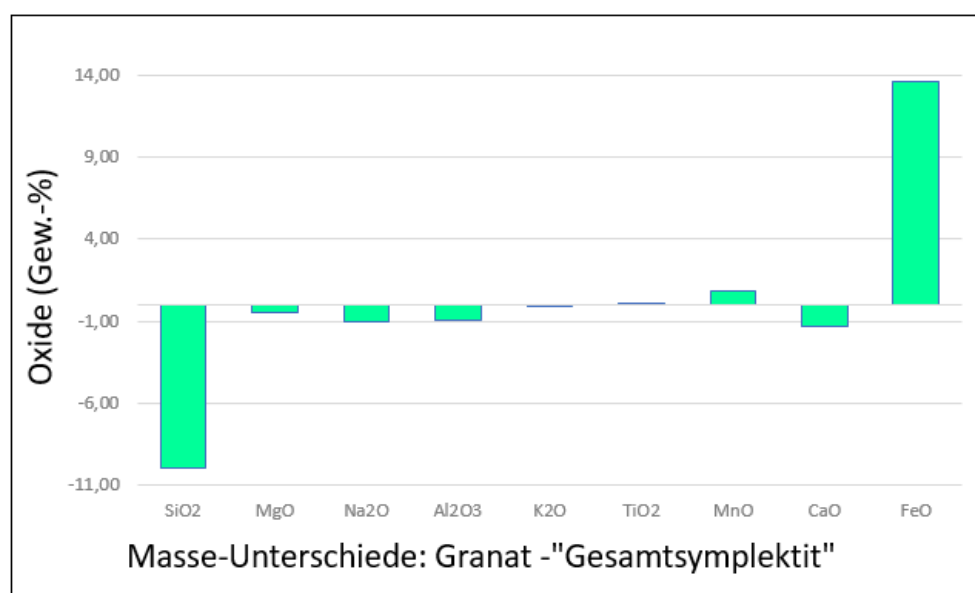


Abb. 22 Massenunterschiede der einzelnen Oxide zwischen Granat und Symplektit

Außer bei Fe- und Si-Oxid, sind die Schwankungen der anderen Oxidgehalte zwischen dem untersuchten Granatkorn und dem angrenzenden Symplektit minimal (bis zu ca. 1,5 Gew.-%) (Abb. 22). Die dargestellten Verhältnisse der Elementkonzentrationen zeigen auch, dass der Granat Fe und Mn reicher ist. Alle anderen gemessenen Oxide sind in größeren Mengen im „Gesamtsymplektit“ vorhanden.

4.3.2.2 Myrmekit

In der Amphibolit-Probe kommen gelegentlich myrmekitische Reaktionsgefüge vor. Eine typische Beispielsituation ist in der Abbildung 23 zu sehen. Dabei handelt sich um bis zu 50 µm große, kreis- und wurmförmige Quarze in einer Plagioklasmatrix. Die Form und Größe dieser Quarze erinnert an die Pyroxene der Symplektite. Im BSE-Bild variieren die Grautöne der Plagioklasmatrix schwach, wobei auf eine chemische Zonierung zu schließen ist. Weiterführende mikrochemische Kartierungen des Reaktionsgefüges könnten diese Zonierungen charakterisieren.

Grundsätzlich treten Myrmekite immer in unmittelbare Nachbarschaft zu Kalifeldspat und Symplektit auf. Außerdem sind Glimmerleisten nicht selten in der Plagioklasmatrix der Myrmekite zu finden. Weiters wurden in der Gesteinsmatrix neben den Myrmekiten und Symplektiten auch Ilmenit und Titanit nachgewiesen. Um eine aussagekräftige Reaktionsgleichung zu definieren, sind weiterführende chemische Analysen notwendig.

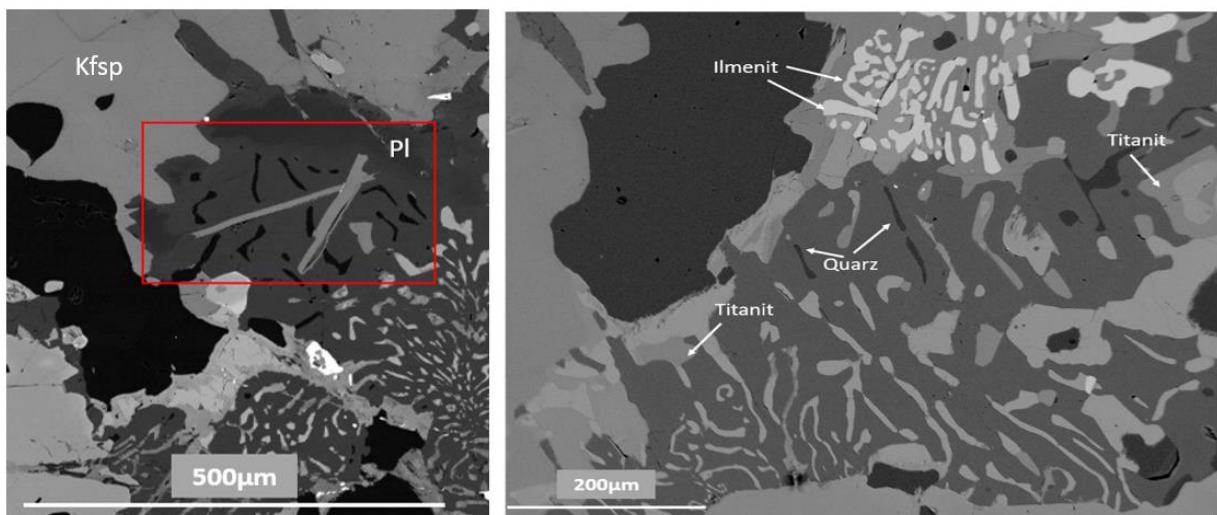


Abb. 23 Links: Myrmekit Rechts: Amphibolithmatrix mit Ilmenit, Titanit und Myrmekit.

5 Interpretation & Diskussion

5.1 Granulit der Gföhl Einheit

Im makroskopisch sichtbaren Gesteinsgefüge dominieren helle, feinkörnige Gemengteile, weshalb das Gestein als felsicher Granulit anzusprechen ist. Die leicht erkennbaren, hellblauen Kyanitkristalle lassen auf einen Hochdruckgranulit schließen. Die Abwesenheit des Sillimanits impliziert, dass das Gestein nur im äußersten Hochdruckbereich der Granulitfazies gebildet wurde, in welchem auch Kyanit stabil und dass das Gestein während des retrograden Pfades das Kyanitstabilitätsfeld nicht unterschreitet (Philpotts und Ague 2009, S. 420). Die lichtmikroskopisch identifizierbare Paragenese von Fsp + Qz + Grt + Ky ist nicht nur für HP- sondern auch für HT Bedingungen charakteristisch (z.B. Kotková 2007, Linner 2013). Die kaum ausgeprägte chemische Zonierung der Granatporphyroblasten zeugt von HT- Bedingungen. Die relativ homogene Zusammensetzung lässt auf eine HT Volumendiffusion während des Metamorphosehöhepunkts schließen (Cooke und O'Brien 2001). Ein weiteres, typisches Merkmal sind die, im Granat eingeschlossenen, Mesoperthite. Dieses Mikrogefüge reflektiert die ursprüngliche Zusammensetzung des ternären Feldspats und wird bei der Abkühlung des Gesteins gebildet (Cooke und O'Brien 2001; Philpotts und Ague, 2009, S. 187). Aus dieser Zusammensetzung lässt sich die minimale Temperatur für die Stabilität der ternären Feldspatphase ableiten (Carswell und O'Brien 1992).

Für die weiterführende Interpretation der Perthite sind Form, Größe und Chemismus des Gefüges ausschlaggebend. Auf Grund dieser Merkmale lassen sich Rückschlüsse auf Bildungsmechanismen der Perthite gewinnen (Abart et al. 2009a). Im Granat eingeschlossene Perthite zeigen Albit- und Orthoklaslamellen, welche meist in etwa das gleiche Volumen ausfüllen. Die Perthite entstehen typischerweise aus dem ternären Feldspat mit intermediärer Zusammensetzung, aus welchem eine albitreiche Phase entmischt (Tajčmanová et al. 2012). Gleichzeitig wird ein orthoklasreicheres Wirtsmineral gebildet. Die mikroskopischen Beobachtungen lassen gemeinsam mit der definierten Zusammensetzung auf die spinodale Dekomposition als Bildungsmechanismus schließen (Abart et al. 2009a; Abart et al. 2009b). Die mikroskopischen Eigenschaften und die Zusammensetzung der orthoklasreichen Zonen (Or₈₇Ab₁₂An₁) des Perthits sprechen für eine Entstehung durch Nukleation für diese Bereiche (Abart et al. 2009a; Abart et al. 2009b).

Neben den Perthiteinschlüssen im Granat sind auch die Kryptoperthite aus der Matrix Merkmale für die Abkühlung. Im Vergleich zu den Perthiten in Granat sind diese deutlich K- reicher und zeigen deutlich feinere Na-Lamellen. Das lässt auf eine rasche Abkühlung nach der Granatbildung schließen. Die Rekristallisierung der Matrixfeldspäte während der Abkühlung führte zu einem feinkörnigen Mosaikgefüge (Abb. 6 und 14) (Kotková 2007).

Ein Anzeiger für Druckentlastung ist die Bildung von Plagioklaskoronen um die Kyanite. Laut Tajčmanová et al. 2011 bleiben die Matrixkyanite bis ~16 kbar stabil, wobei sich die Plagioklassäume erst bei weiterer Dekompression bilden. Die Diffusion von Ca und Na (mobiler als Si und Al) aus der umgebenden Matrix kann als Bildungsmechanismus angesehen werden (Tajčmanová et al. 2011).

Grundsätzlich wird der Metamorphosehöhepunkt für die moldanubischen Granulite von Dunkelsteinerwald und St. Leonhard mit 16 kbar und 1000°C angegeben (Carswell und O'Brien 1992; Cooke et al. 2000; Linner 2013). Obwohl genaue geothermobarometrische Rekonstruktionen für den Granulit aus Meidling im Tal fehlen, werden die Ergebnisse auch in diesen Bereichen erwartet. Als Ausgangsgestein werden ordovizische Granite angesehen, welche einer signifikanten, variszischen, metamorphen Überprägung ausgesetzt waren (z.B. Linner 2013).

5.2 Granat-Amphibolit

Auf Grund der komplexen Phasenbeziehungen und Gesteinsgefüge ist eine genaue Rekonstruktion des Metamorphoseverlaufs des Granat-Amphibolits äußerst schwierig, weshalb hier nur auf einzelne Merkmale eingegangen werden kann. Besonders markant sind die Symplektitsäume um die Granatkörner, welche aus Reaktionen zwischen Granat und der Gesteinsmatrix entstehen. Diese Reaktionsgefüge bestehen aus lamellen- bis wurmförmigen Orthopyroxenen in einer Ca-reichen Plagioklasmatrix. In den Bereichen nahe am Granatkorn sind die Pyroxene eher feinkörnig und in Richtung Matrix werden sie zunehmend gröber (bis zu ca. 200 µm). Die Bildung der Symplektite beginnt an der äußersten Granatkorngrenze und setzt sich in Richtung Kern fort (Obata 2011). Dementsprechend sind die älteren Pyroxene (d.h. im äußeren Rand des Saumes) grobkörniger. Außerdem nimmt Na-Gehalt der Plagioklasmatrix des Symplektits zur Granatkorngrenze hin zu. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass der Plagioklas gegen tiefere Temperaturen hin Na-reicher wird. Der Teil des Symplektites, der direkt an den Granat angrenzt ist zu Letzt entstanden und jener mit den feinsten Opx-Körnern. All das spricht für ein Symplektitwachstum bei zunehmend tieferen Temperaturen. Laut Petrakakis und Richter (1991) führte eine Dekompression zur initialen Bildung der Symplektite.

Neben Symplektiten finden sich auch myrmekitische Gefüge, bei denen Kalifeldspat durch Plagioklas und Quarz ersetzt wird. Demnach sind würmchenförmige Quarzkristalle in einer Plagioklasmatrix sichtbar, welche stellenweise mit leistenförmigen Biotiten assoziiert sind. Grundsätzlich lassen sich drei Bildungsmodelle für Myrmekite definieren: (1) Kristallisation aus der Schmelze, (2) metasomatische Umwandlung des ursprünglichen Feldspats und (3) Entmischung einer Plagioklaskomponente aus einem ternären Feldspat (Phillips 1974; Abart et al. 2014). Die Faktoren,

welche die Myrmekitbildung begünstigen sind vielfältig und beinhalten neben Dekompression, Abkühlung, Deformation, Stoffaustausch durch Fluidzufuhr auch Kombinationen aus den Genannten. Auf Grund der äußerst komplexen Gesteinsgefüge sind Aussagen über die genaue Myrmekitentstehung schwierig zu treffen. Außerdem gibt es keine Publikationen, die diese Mikrogefüge im Granatamphibolit der Bunten Serie näher beschreiben. Grundsätzlich, legen die mikroskopischen Beobachtungen nahe, dass die Myrmekite in der Amphibolitprobe durch metasomatische Umwandlung des Kalifeldspats entstanden sind. Dafür spricht das Auftreten des Biotits in der Plagioklasmatrix des myrmekitischen Gefüges. Abart et al. 2014 untersuchten Myrmekite im Weinsberg Granit und definierten die folgende Bildungsreaktion: $\text{Opx} + \text{Pl} + \text{Kfsp} + \text{H}_2\text{O} = \text{Bio} + \text{Ilm} + \text{Pl}_2 + \text{Qz} + \text{Chl}$. Dabei wurden die Orthopyroxene teilweise oder manchmal vollständig durch Chlorit, Montmorillonit und Nontronit ersetzt. Die gesamte Hydratisierungsreaktion passierte vermutlich während der Abkühlung. Abart et al. 2014 schließt auf eine Bildungstemperatur von $\sim 500^\circ\text{C}$ begünstigt durch kurze Intervalle intensiver Zufuhr von wasserreichen Fluids.

Die Metamorphosebedingungen der Amphibolite der Bunten Serie wurden als zweiphasig beschrieben mit dem älteren Ereignis bei $T = 650\text{-}800^\circ\text{C}$ und $P = 7 \text{ kbar}$ (Kuschnig 1986; Höfelsberger 1989; Petrakakis und Richter 1991). Das jüngere Ereignis verursachte eine partielle Rekristallisation der Gesteine bei $530\text{-}590^\circ\text{C}$ (Petrakakis und Richter 1991). Dieses zweite Ereignis kann sehr wahrscheinlich als Ursprung der Myrmekitbilung angesehen werden. Das Vorhandensein von Orthopyroxen in Abwesenheit von großen Mengen an Chlorit im Amphibolit der Drosendorf Einheit stellt einen signifikanten Unterschied zu dem oben genannten Weinsberger Granit dar. Die Ursachen dafür sind unklar und benötigen weiterführende Untersuchungen. Ausgehend von der Gleichung von Abart et al. 2014 ist die einfachste Erklärung das zu geringe Vorhandensein einer fluiden Phase im System. Die geochemische Rolle der Amphibole in der Probe muss noch definiert werden.

Danksagung

Zuallererst möchte ich dem [REDACTED] für die Betreuung meiner Masterarbeit und die Hilfsbereitschaft danken.

Ein weiterer Dank gilt [REDACTED] für die Hilfe bei der Probenvorbereitung bzw. Durchführung der Messungen an dem Rasterelektronenmikroskop. Ebenso möchte ich mich bei [REDACTED] für die Unterstützung bei den Messungen mit der Mikrosonde bedanken.

Danke an die Studienkollegen [REDACTED], die meine Studienzeit unvergesslich gemacht haben.

Speziell will ich mich an dieser Stelle auch bei meinem [REDACTED] [REDACTED] für Verständnis und vielseitige Unterstützung bedanken.

Literaturverzeichnis

Abart R, Petrishcheva E, Käßner S, Milke R (2009a)

Perthite microstructure in magmatic alkali feldspar with oscillatory zoning; Weinsberg Granite, Upper Austria. *Miner Petrol*, 97: 251-263

Abart R, Petrishcheva E, Wirth R, Rhede D (2009b)

Exsolution by spinodal decomposition II: perthite formation during slow cooling of anatexites from Ngorongoro, Tanzania. *Am. J. Sci*, 309: 450-475

Abart R, Heusler D, Habler G (2014)

Mechanism of myrmekite formation: case study from the Weinsberg granite, Moldanubian zone, Upper Austria. *Contrib. Mineral. Petr.* 168: 1074

Abart R, Schmud R, Harlov D (2001)

Metasomatic coronas around hornblende xenoliths in granulite facies marble, Ivrea zone, N Italy, I: constraints on component mobility. *Contrib. Mineral. Petr.* 141: 473-493

Augustithis SS (1990)

Atlas of Metamorphic-Metasomatic Textures and Processes. Elsevier, Amsterdam

Carswell DA (1991)

Variscan high P–T metamorphism and uplift history in the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *Eur. J. Mineral.* (3): 323–342.

Carswell DA, O'Brien PJ (1992)

Thermobarometry and Geotectonic Significance of High-Pressure Granulites: Examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *J. Petrol.* 34(3): 427-459

Collins LG, Collins BJ, (2013)

Origin of myrmekite as it relates to K-, Na-, and Ca-metasomatism and the metasomatic origin of some granite masses where myrmekite occurs. <http://www.csun.edu/~vcgeo005/Nr56Metaso.pdf> (Zugriff: 17.12.2018)

Cook RA, O'Brien PJ, Carswell DA (2000)

Garnet zoning and the identification of equilibrium mineral compositions in high-pressure–temperature granulites from the Moldanubian Zone, Austria. *J. met. Geol.* 18: 551–569

Cooke RA, O'Brien PJ (2001)

Resolving the relationship between high P–T rocks and gneisses in collisional terranes: an example from the Gföhl gneiss–granulite association in the Moldanubian Zone, Austria. *Lithos* 58: 33–54

Dégi J, Abart R, Török K, Bali E, Wirth R, Rhede D (2009)

Exsolution by sp Symplectite formation during decompression induced garnet breakdown in lower crustal mafic granulite xenoliths: mechanisms and rates. *Contrib. Mineral. Petr.* 159(3): 293–314

Franke W (2000)

The mid-European segment of the Variscides: tectono-stratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 179:35–62

Faryad SW, Nahodilová R, Dolejš D (2010)

Incipient eclogite facies metamorphism in the Moldanubian granulites revealed by mineral inclusions in garnet. *Lithos* 114: 54–69

Friedl G, Finger F, Paquette JL, von Quadt A, McNaughton NJ, Fletcher IR (2004)

Pre-Variscan geological events in the Austrian part of the Bohemian Massif deduced from U–Pb zircon ages. *Int. J. Earth. Sci.* 93:802–823

Fuchs G (1976)

Zur Entwicklung der Böhmisches Masse. *Jahrb. Geol. B-A* 119:45–61

Gaidies F, Milke R, Heinrich W, Abart R (2017)

Metamorphic mineral reactions: Porphyroblast, corona and symplectite growth. In: Heinrich, W., Abart, R. (Eds.), *EMU Notes in Mineralogy*. 16 (14). European Mineralogical Union, S. 469–540

Gebauer D, Friedl G (1993)

A 1.38 Ga protolith age for the Dobra orthogneiss (Moldanubian Zone of the Southern Bohemian Massif, NE-Austria): Evidence from ion-microprobe (SHRIMP) dating of zircon. Eur. J. Mineral., 5, 1 (Suppl.), 115.

Högelsberger H (1989)

Die Marmore und Kalksilikatgesteine der Bunten Serie - Petrologische Untersuchungen und geologische Konsequenzen. Jahrb. Geol. B.-A., 132:213-230

Keller LM, Abart R, Stünitz H, De Capitani C (2004)

Deformation, mass transfer and mineral reactions in an eclogite facies shear zone in a polymetamorphic metapelite (Monte Rosa nappe, western Alps). J. Metamorph. Geol. 22: 97-118

Klein C, Philpotts A (2013)

Earth Materials Introduction to Mineralogy and Petrology. Cambridge University Press, Cambridge

Klötzli U, Frank W, Scharbert S, Thöni M (1999)

Evolution of the SE Bohemian Massif Based on Geochronological Data – A Review. Jahrb. Geol. B.-A. 141(4): 377-394

Kotková J (2007)

High-pressure granulites of the Bohemian Massif: recent advances and open questions. Jour. Geos. 52: 45–71

Kuschnig K (1986)

Geochemie und Petrologie der Amphibolite der Bunten Serie.- Diss., Inst. Petrol., Univ. Wien, Wien.

Linner M (1996)

Metamorphism and partial melting of paragneisses of the Monotonous Group, SE Moldanubicum (Austria). Miner. Petrol. 58:215-234

MacKenzie WS, Adams AE (1995)

Minerale und Gesteine in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

Obata M (2011)

Kelyphite and symplectite: textural and mineralogical diversities and universality, and a new dynamic view of their structural formation. In: Evgenii Sharkov (Ed.) New Frontiers in Tectonic Research - General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. InTech, S. 93-122, doi:10.5772/20265

Okrusch M, Matthes S (2009)

Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer, Berlin

Petrakakis K (1997)

Evolution of Moldanubian rocks in Austria: review and synthesis. J. Metamorph. Geol. 15: 203-222

Petrakakis K, Jawecki C (1995)

High-grade metamorphism and retrogression of Moldanubian granulites, Austria. Eur. J. Mineral. 7: 1183–1203.

Petrakakis K, Richter W (1991)

Metamorphose im niederösterreichischen Moldanubikum, eine Übersicht. Arbeitstagung Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung Geol. B.-A.), S. 13-20, https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=ATA_1991_013.pdf (Zugriff: 17.12.2018)

Petrakakis K, Schuster-Bourgin N, Habler G, Abart R (2018)

Ca-rich garnets and associated symplectites in mafic peraluminous granulites from the Gföhl Nappe System, Austria. Solid Earth, 9: 797-819

Phillips ER (1974)

Myrmekite — one hundred years later. Lithos, 7(3): 181-194

Philpotts R.A, Ague J.J (2009)

Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Cambridge University Press, Cambridge

Špaček P, Ackerman L, Habler G, Abart R, Ulrych J (2013)

Garnet Breakdown, Symplectite Formation and Melting in Basanite-hosted Peridotite Xenoliths from Zinst (Bavaria, Bohemian Massif). J. Petrol. 54(8): 1691-1723

Tajčmanová L, Abart R, Neusser G, Rhede D (2011)

Growth of plagioclase rims around metastable kyanite during decompression of high-pressure felsic granulites (Bohemian Massif). J. Metamorph. Geol. 29: 1003–1018

Vellmer C (1992)

Stoffbestand und Petrogenese von Granuliten und granitischen Gesteinen der südlichen Böhmisches Masse in Niederösterreich. Unpubl. PhD thesis, Georg-August-University, Göttingen.

Wessely G. (2006):

Geologie der österreichischen Bundesländer: Niederösterreich. Verlag d. Geologischen Bundesanstalt, Wien

Yardley BWD, MacKenzie WS, Guilford C (1992)

Atlas metamorpher Gesteine und ihre Gefüge in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

Zaydan A, Scharbert HG (1983)

Petrologie und Geochemie moldanubischer metamorpher Serien im Raume Persenbeug (südliches Waldviertel). Jahrb. Geol. B-A 126:181-199

Anhang

Liste der Abkürzungen:

Ab- Albit	Ilm- Ilmenit
Alm- Almandin	Kfsp- Kalifeldspat
An- Anorthit	Kpx- Klinopyroxen
Amph- Amphibolit	Ky- Kyanit
ApF- Atomen pro Foremeleinheit	Opx- Orthopyroxen
Aug- Augit	Or- Orthoklas
Bt- Biotit	Pl oder Plag- Plagioklas
Chl- Chlorit	Px- Pyroxen
Crd- Cordierit	Pyr- Pyrop
Ents- Enstatit	Qz- Quarz
Fs- Ferrosilit	Rt- Rutil
Fsp- Feldspat	Sil- Silimanit
Glm- Glimmer	Sps- Spessartin
Grs- Grossular	Sym- Symplektit
Grt- Granat	
Hbl- Hornblende	

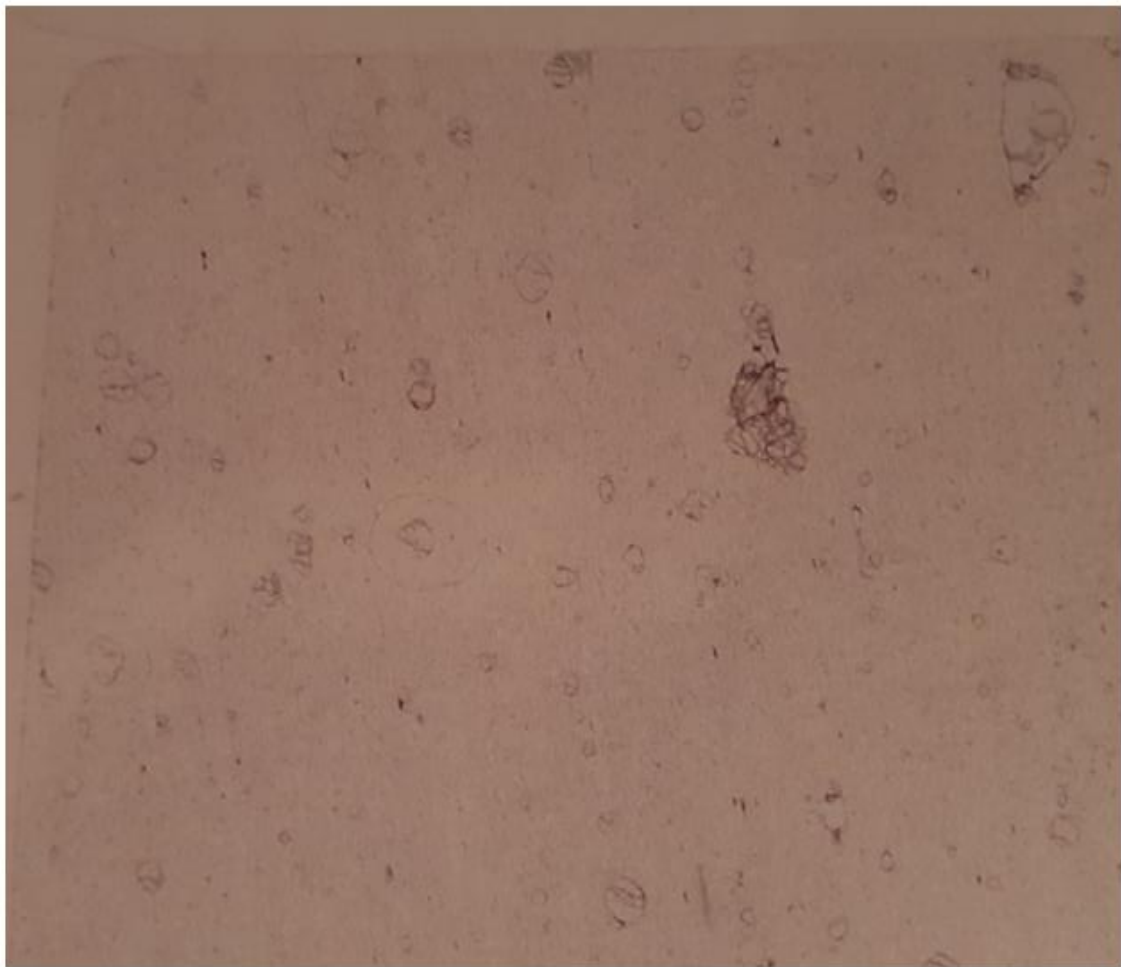
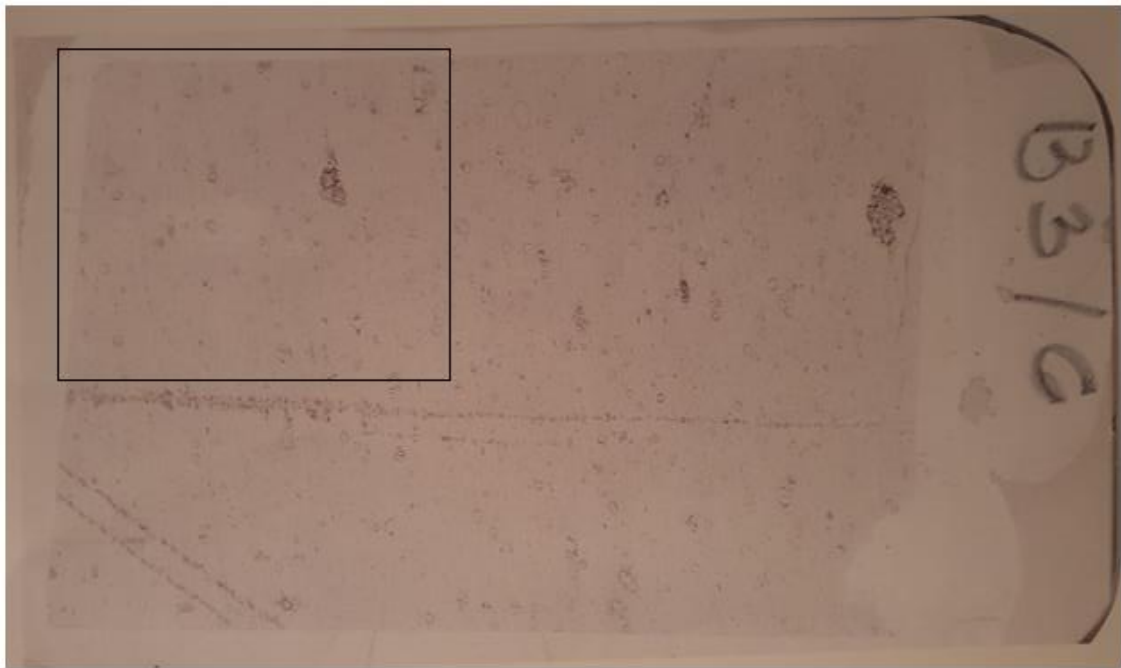
Abbildungsverzeichnis

1. Reaktionsgefüge welche in dieser Arbeit untersucht wurden: a) In der Mitte des hellen, großen Granatporphyroblasts befindet sich das entmischte Feldspatkorn (Perthit); b) der Granat in der Amphiolithmatrix ist größtenteils von Symplektit (feine Pyroxenminerale in einer Plagioklasmatrix) umgeben; c) Myrmekit (schwarze, würmchenförmige Quarze in plagioklasreicher Matrix); d) Im feinkörnigen Granulit kommt Kyanit meistens als Porphyroklast vor und ist umgeben von Plagioklaskoronen
2. Phasendiagramm für den Subsolidus-Bereich des binären Systems Ab-Or nach Okrusch und Matthes 2009
3. Topographische Lage beider Aufschlüsse (Quelle: GoogleEarth)
4. Vereinfachte geologische Karte des südöstlichen Teils des Herzynischen Orogenes in Zentraleuropa. Modifiziert nach Petrakakis, 1997
5. Vereinfachte geologische Karte des österreichischen Moldanubikums. Modifiziert nach Scharbert und Fuchs 1981. Die roten Dreiecke zeigen die genaue Lage der beiden Steinbrüche.
6. Handstück der Granulit-Probe und Granulit-Dünnschliff unter dem Mikroskop
7. Handstück des Granatamphibolits und Amphibolitprobe unter dem Mikroskop
8. Feldspat der Granulit Probe und Feldspat der Amphibolit Probe
9. Granat der Granulit Probe
10. Granat des Granat-Amphibolits mit Mn und mit Ca.
11. Granatkorn der Amphibolitprobe mit der blauen Linie, die das gemessene Profil durch Granat zeigt. Rechts: Die Gewichtsprozentage des Mg, Mn, Ca und Fe in dem Granat-Profil.
12. Amphibol und Pyroxen des Amphibolits
13. BSE-Bilder Perthiteinschlüssen im Granat.
14. BSE-Bilder von der Granulitmatrix. (sehr feinen Perthitlamellen der Matrixperthite)
15. Auf allen vier Bildern ist der gleiche Granat mit Perthit-Einschluss zu sehen. Oben: BSE-Bilder des Korns Unten: Durchlichtmikroskopbilder (rechts: mit XPL)
16. Elementmapping-Bild von einem Teil des Granats mit Perthit und umgebender Matrix. Links oben: BSE-Bild. Links unten: Na-Verteilung. Rechts oben: Ca-Verteilung und rechts unten K-Verteilung
17. Alle drei Bilder zeigen unterschiedliche Kyanitkristalle umgeben von Plagioklassaum und Granat
18. BSE-Bild des Kyanitporphyroklasten mit Plagioklassaum. Messpunkte entsprechen der Tabelle 1
19. BSE_Bild von Symplektit

20. Symplektit unter dem Durchlichtmikroskop. Rechts: mit XPL
21. Elementmapping- Bilder des Granats und Symplektits.
22. Massenunterschiede der einzelnen Oxide zwischen Granat und Symplektit
23. Links: Myrmekit Rechts: Amphibolithmatrix mit Ilmenit, Titanit und Myrmekit.



Scan des Amphibolitdünnschliffs. Rot markierter Bereich zeigt den Granat an, bei dem das chemische Profil gemessen wurde



Scan des Granulitdünnschliffs. Links schwarz markierte Bereich ist in vergrößerter Form rechts abgebildet.

Punkt	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	Cr ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Total	Comment
1 / 1 .	37,351	5,263	0	21,739	0,01	0,586	0,682	0,019	34,037		99,688	helle stelle
2 / 1 .	37,583	5,664	0,014	21,953	0,027	0,555	0,857	0,017	33,764		100,44	helle stelle
3 / 1 .	37,733	5,22	0,013	21,67	0,041	0,637	0,735	0,01	34,29		100,35	helle stelle
4 / 1 .	38,126	6,826	0,002	21,902	0	0,5	0,612	0,012	32,255		100,24	Grt1 (Line)
5 / 1 .	37,865	6,793	0,014	21,995	0,023	0,503	1,052	0,022	32,068		100,34	Grt1 (Line)
6 / 1 .	37,7	6,634	0,012	21,979	0,05	0,476	1,344	0,024	32,063		100,28	Grt1 (Line)
7 / 1 .	37,842	6,562	0	22,002	0,028	0,432	1,626	0,016	31,663		100,17	Grt1 (Line)
8 / 1 .	37,948	6,478	0,002	21,968	0,034	0,465	1,8	0,019	31,71		100,42	Grt1 (Line)
9 / 1 .	37,902	6,465	0,014	21,951	0,063	0,467	1,913	0,01	31,476		100,26	Grt1 (Line)
10 / 1 .	37,657	6,455	0,017	21,955	0,053	0,458	1,994	0,013	31,093		99,694	Grt1 (Line)
11 / 1 .	38,057	6,462	0,006	21,888	0,067	0,488	2,063	0	31,54		100,57	Grt1 (Line)
12 / 1 .	37,732	6,354	0,01	22,029	0,055	0,504	2,141	0,013	31,426		100,26	Grt1 (Line)
13 / 1 .	37,742	6,384	0	21,958	0,035	0,469	2,177	0,027	31,498		100,29	Grt1 (Line)
14 / 1 .	38,027	6,527	0,011	21,993	0,052	0,445	2,184	0,025	31,336		100,6	Grt1 (Line)
15 / 1 .	37,754	6,373	0	22,019	0,043	0,5	2,128	0,016	31,518		100,35	Grt1 (Line)
16 / 1 .	38,079	6,364	0	21,997	0,047	0,492	2,169	0,011	31,57		100,73	Grt1 (Line)
17 / 1 .	37,929	6,496	0,01	21,948	0,036	0,434	2,026	0,019	31,641		100,54	Grt1 (Line)
18 / 1 .	37,868	6,438	0,01	22,024	0,031	0,485	1,966	0,007	31,511		100,34	Grt1 (Line)
19 / 1 .	37,693	6,609	0	22,054	0,027	0,484	1,774	0,019	31,74		100,4	Grt1 (Line)
20 / 1 .	37,93	6,577	0,004	22,006	0,017	0,453	1,595	0,012	31,849		100,44	Grt1 (Line)
21 / 1 .	37,91	6,655	0	21,98	0,028	0,527	1,378	0,031	31,989		100,5	Grt1 (Line)
22 / 1 .	37,855	6,737	0,017	21,992	0,02	0,478	1,113	0,015	31,817		100,04	Grt1 (Line)
23 / 1 .	38,05	6,707	0,007	22,018	0,022	0,512	0,668	0,022	32,11		100,12	Grt1 (Line)
24 / 1 .	63,163	0,009	9,32	23,182	0,021		3,761		0	0,176	99,632	Matrix
25 / 1 .	99,506	0	0	0,036	0,019		0		0	0	99,562	Matrix
26 / 1 .	62,886	0,015	9,432	23,11	0,019		3,797		0,084	0,119	99,462	Matrix
27 / 1 .	67,517	0,009	11,157	20,298	0,005		0,522		0	0,114	99,623	Matrix
28 / 1 .	62,979	0,019	9,31	23,432	0,009		3,758		0	0,168	99,676	Matrix
29 / 1 .	64,039	0	1,001	18,731	0,021		0,037		0,032	15,175	99,118	Matrix
30 / 1 .	63,885	0,018	1,647	18,852	0,007		0,044		0,025	14,143	98,716	Matrix
31 / 1 .	64,15	0,016	1,872	18,949	0,037		0,028		0	14,064	99,271	Matrix
32 / 1 .	63,849	0,001	1,003	18,703	0,014		0,018		0,033	15,245	98,976	Matrix
33 / 1 .	64,064	0,001	1,442	18,791	0,021		0,069		0,005	14,453	98,942	Matrix
34 / 1 .	63,452	0,026	0,778	18,645	0,029		0		0,2	15,519	98,88	Matrix
35 / 1 .	63,635	0,022	1,45	18,838	0,022		0,073		0,022	14,565	98,669	Matrix
36 / 1 .	63,993	0	1,125	18,823	0,01		0,027		0,028	14,874	98,955	Matrix
37 / 1 .	63,426	0	9,248	23,244	0,021		3,785		0,048	0,23	100	Matrix
38 / 1 .	62,71	0	9,353	23,303	0,008		3,722		0	0,135	99,232	Matrix
39 / 1 .	63,02	0	9,205	23,3	0		3,735		0,024	0,214	99,498	Matrix
40 / 1 .	63,29	0	9,369	23,285	0		3,747		0,026	0,217	99,936	Matrix
41 / 1 .	62,838	0,007	9,383	23,317	0,005		3,801		0,179	0,114	99,643	Matrix
42 / 1 .	63,024	0	9,42	23,089	0,011		3,766		0,135	0,106	99,55	Matrix
43 / 1 .	37,3	15,143	0,067	20,077	2,008	0,025	0,07	0,086	10,844	8,665	94,337	Matrix
44 / 1 .	36,986	13,909	0,088	19,489	2,383	0,005	0,063	0,074	13,331	8,627	95,022	Matrix
45 / 1 .	62,922	0,008	9,311	23,224	0,009		3,795		0,119	0,23	99,618	Ky Saum_c
46 / 1 .	63,339	0,001	9,23	23,298	0,017		3,972		0,102	0,254	100,21	Ky Saum_c
47 / 1 .	62,818	0,003	8,926	23,473	0,007		4,154		0,154	0,2	99,735	Ky Saum_r
48 / 1 .	36,761	0,003	0	63,878	0,043		0,014		0,363	0,004	101,07	Ky Saum_r
49 / 1 .	36,917	0,003	0,001	63,948	0,03		0		0,254	0	101,15	Ky Saum_c
50 / 1 .	37,001	0,039	0,001	63,916	0,042		0,011		0,243	0,007	101,26	Ky Saum_c
51 / 1 .	36,907	0,032	0,005	63,825	0,027		0,028		0,203	0	101,03	Ky Saum_r
52 / 1 .	62,136	0	8,967	23,576	0,008		4,306		0,011	0,173	99,176	Ky Saum_r
53 / 1 .	63,107	0	9,254	23,11	0,011		3,913		0	0,228	99,623	Ky Saum_c
54 / 1 .	37,875	6,858	0	21,966	0,023	0,483	1,036	0,026	32,071		100,34	Grt mit Pertit
55 / 1 .	38,104	6,792	0,006	22,005	0,013	0,445	0,931	0	32,286		100,58	Grt mit Pertit
56 / 1 .	37,737	6,845	0,032	22,092	0,022	0,462	0,904	0,017	32,137		100,25	Grt mit Pertit
57 / 1 .	37,824	6,861	0,028	21,956	0,023	0,507	0,969	0,02	32,045		100,23	Grt mit Pertit
58 / 1 .	37,939	6,61	0,015	21,952	0,032	0,466	1,483	0,016	31,642		100,16	Grt mit Pertit
59 / 1 .	63,979	0,006	2,284	19,073	0,023		0,245		0,465	13,262	99,464	Pertit im Grt
60 / 1 .	64,649	0,012	1,822	18,883	0,012		0,175		0,438	13,828	99,964	Pertit im Grt
61 / 1 .	61,599	0,015	8,607	24,404	0,013		5,37		0,396	0,168	100,57	Pertit im Grt
62 / 1 .	61,208	0,009	8,499	24,453	0,005		5,347		0,487	0,163	100,17	Pertit im Grt
63 / 1 .	61,645	0,018	8,506	24,439	0,01		5,321		0,488	0,148	100,58	Pertit im Grt
64 / 1 .	64,175	0,012	1,72	18,864	0,035		0,052		0,057	14,033	99,05	Pertit im Grt
65 / 1 .	64,237	0,01	1,779	18,988	0,022		0,121		0,183	14,04	99,485	Pertit im Grt
66 / 1 .	63,495	0	9,429	23,372	0		3,829		0,04	0,173	100,34	Pertit im Grt
67 / 1 .	63,785	0	9,704	22,979	0,012		3,628		0,062	0,117	100,29	Pertit im Grt

Tabelle 1. Gewichtsprozent der Oxide im Granulit, gemessen mit der Elektronenstrahlmikrosonde

Point	SiO2	MgO	Na2O	Al2O3	K2O	TiO2	MnO	CaO	FeO	Total	Comment
1 / 1 .	48,627	11,035	0,004	0,483	0,002	0,067	1,153	0,703	36,213	98,317	
2 / 1 .	48,866	11,341	0,007	0,501	0,011	0,102	1,03	0,788	36,114	98,775	
3 / 1 .	37,764	4,232	0	21,805	0	0,083	0,762	9,957	25,407	100,03	
4 / 1 .	41,351	6,864	1,217	11,057	1,264	2,173	0,246	11,123	20,354	95,788	
5 / 1 .	42,2	7,567	1,146	10,233	1,219	2,178	0,25	11,077	20,16	96,112	
6 / 1 .	42,377	7,301	1,238	10,249	1,22	2,17	0,248	11,102	20,708	96,629	
7 / 1 .	29,784	0,008	0,018	1,75	0,004	37,72	0,081	27,797	0,748	97,947	tit1
8 / 1 .	41,508	8,003	1,13	11,717	1,599	2,355	0,225	11,202	18,724	96,482	amph
9 / 1 .	45,612	9,768	0,839	8,046	0,835	1,496	0,249	11,183	18,164	96,208	amph
10 / 1 .	41,608	7,439	1,12	11,034	1,37	2,193	0,279	11,032	20,312	96,398	amph
11 / 1 .	41,266	7,173	1,205	12,037	1,602	2,228	0,268	11,145	19,844	96,794	amph
12 / 1 .	51,458	11,949	0,079	0,393	0,013	0,093	1,011	0,64	30,062	95,705	
13 / 1 .	46,371	0,005	1,606	34,42	0,03	0,004		17,46	0,387	100,28	pl
14 / 1 .	46,571	0,001	1,793	34,173	0,066	0		17,093	0,262	99,96	pl
15 / 1 .	46,697	0	1,787	34,045	0,043	0		17,072	0,316	99,961	pl
16 / 1 .	47,742	0,001	2,271	33,528	0,042	0,008		16,273	0,255	100,12	pl
17 / 1 .	46,748	0,017	1,882	34,025	0,032	0		16,678	0,598	99,98	pl
18 / 1 .	46,016	0,024	1,35	34,986	0,02	0,012		17,773	0,521	100,7	pl
19 / 1 .	100,05	0	0,016	0,031	0	0,009		0,094	0,136	100,33	qz
20 / 1 .	0,036	0,239		0,025		52,153	0,835	0,177	46,141	99,648	ilm
21 / 1 .	0,029	0,127		0,021		52,496	0,8	0,087	46,047	99,695	ilm
22 / 1 .	0,063	0,068		0,008		52,496	0,913	0,125	45,666	99,425	ilm
23 / 1 .	0,074	0,272		0,011		52,027	0,81	0,354	45,594	99,222	ilm
24 / 1 .	48,949	12,081	0	0,521	0	0,088	1,026	0,827	34,768	98,279	
25 / 1 .	48,817	11,511	0,006	0,594	0	0,086	1,02	0,712	35,672	98,435	
26 / 1 .	49,967	13,438	0,024	0,329	0,011	0,615	0,949	0,623	33,858	99,847	
27 / 1 .	35,708	11,302	0,217	14,259	9,099	4,313	0,055	0,042	19,046	94,345	gl
28 / 1 .	51,102	10,514	0,139	0,715	0	0,231	0,398	21,448	14,413	99,01	
29 / 1 .	51,129	10,723	0,137	0,693	0,009	0,201	0,424	21,487	14,309	99,127	cpx
30 / 1 .	49,429	12,8	0,004	0,445	0	0,284	0,961	0,823	34,215	98,973	
122 / 1 .	44,065	10,033	1,197	10,285	0,988	1,599	0,124	10,976	17,367	96,668	cpx
124 / 1 .	42,861	7,481	1,19	10,022	1,028	1,913	0,281	10,812	20,755	96,382	
125 / 1 .	42,93	7,329	1,138	10,106	1,003	1,731	0,289	10,774	21,328	96,644	
126 / 1 .	37,726	3,888	0,011	21,66		0,115	0,834	10,26	25,386	99,899	grt
127 / 1 .	37,481	2,734	0,009	21,73		0,109	1,802	8,779	27,624	100,27	grt
128 / 1 .	37,858	3,697	0	21,712		0,138	0,978	10,589	25,211	100,19	grt
129 / 1 .	37,662	2,981	0	21,512		0,088	1,474	9,865	26,488	100,1	grt
130 / 1 .	37,726	2,686	0	21,263		0,149	2,16	9,013	27,408	100,41	grt
131 / 1 .	37,878	4,047	0,002	21,683		0,14	0,869	10,522	25,25	100,4	grt
132 / 1 .	37,912	3,867	0,001	21,635		0,139	0,84	10,503	25,236	100,15	grt
133 / 1 .	27,653	9,913	0,001	17,915	0,111	0,036	0,446	1,21	32,671	89,982	
134 / 1 .	34,319	7,184	0,124	14,271	8,544	4,342	0,119	0,106	25,975	95,335	gl
135 / 1 .	50,818	9,643	0,037	0,258	0,013	0,055	0,92	0,611	33,971	96,338	
136 / 1 .	51,09	11,529	0,053	0,527	0,02	0,092	0,953	0,865	31,105	96,242	
137 / 1 .	42,013	8,297	1,033	10,191	0,867	2,583	0,302	10,844	18,893	95,233	

Tabelle 2. Gewichtsprozent der Oxide im Granat-Amphibolit (ohne Grt-Linie), gemessen mit der Elektronenstrahlmikrosonde

Point	SiO2	MgO	Na2O	Al2O3	TiO2	MnO	CaO	FeO	Total	Comment
31 / 1.	38,077	4,137	0,011	21,796	0,067	0,84	10,105	24,965	100,01	grt1 (Line)
32 / 1.	37,99	4,15	0,009	21,76	0,063	0,798	10,172	24,941	99,886	grt1 (Line)
33 / 1.	37,965	4,071	0,022	21,739	0,073	0,814	10,013	25,304	100,02	grt1 (Line)
34 / 1.	37,99	4,066	0,017	21,855	0,07	0,833	9,997	25,285	100,12	grt1 (Line)
35 / 1.	38,216	4,096	0,008	21,886	0,071	0,894	9,98	25,52	100,68	grt1 (Line)
36 / 1.	38,065	4,011	0,018	21,794	0,077	0,947	10,255	25,436	100,62	grt1 (Line)
37 / 1.	37,929	3,92	0,018	21,692	0,078	1,081	10,475	25,009	100,21	grt1 (Line)
38 / 1.	38,008	3,804	0	21,706	0,083	1,26	10,41	25,456	100,73	grt1 (Line)
39 / 1.	37,765	3,756	0	21,602	0,094	1,349	10,363	25,231	100,19	grt1 (Line)
40 / 1.	37,959	3,707	0,005	21,808	0,058	1,466	10,269	25,483	100,76	grt1 (Line)
41 / 1.	37,888	3,608	0,01	21,603	0,094	1,594	10,057	25,52	100,39	grt1 (Line)
42 / 1.	37,717	3,602	0,015	21,449	0,14	1,763	10,275	25,446	100,43	grt1 (Line)
43 / 1.	37,568	3,475	0	21,324	0,164	1,846	10,348	25,25	99,991	grt1 (Line)
44 / 1.	37,921	3,518	0,007	21,545	0,108	1,834	10,363	25,373	100,69	grt1 (Line)
45 / 1.	37,866	3,449	0	21,694	0,079	1,92	10,096	24,985	100,1	grt1 (Line)
46 / 1.	37,781	3,275	0,022	21,446	0,114	2,062	10,285	25,026	100,02	grt1 (Line)
47 / 1.	37,634	3,255	0,015	21,368	0,144	2,224	10,388	24,945	99,979	grt1 (Line)
48 / 1.	37,938	3,108	0,012	21,287	0,122	2,393	10,338	24,613	99,812	grt1 (Line)
49 / 1.	37,781	3,044	0,004	21,323	0,133	2,49	10,468	25,168	100,42	grt1 (Line)
50 / 1.	37,698	2,967	0,005	21,293	0,122	2,672	10,455	24,647	99,875	grt1 (Line)
51 / 1.	37,577	2,871	0,019	21,414	0,133	2,89	10,718	24,803	100,46	grt1 (Line)
52 / 1.	37,552	2,681	0,001	21,386	0,111	3,085	10,906	24,401	100,12	grt1 (Line)
53 / 1.	37,521	2,604	0	21,509	0,077	3,25	10,857	24,52	100,34	grt1 (Line)
54 / 1.	37,749	2,578	0,002	21,573	0,074	3,225	10,731	24,32	100,25	grt1 (Line)
55 / 1.	37,432	2,475	0	21,409	0,064	3,5	10,781	24,387	100,05	grt1 (Line)
56 / 1.	37,596	2,388	0,02	21,508	0,066	3,646	10,939	23,959	100,12	grt1 (Line)
57 / 1.	37,641	2,329	0,022	21,416	0,071	3,762	11,113	23,909	100,27	grt1 (Line)
58 / 1.	37,615	2,218	0,003	21,45	0,095	3,798	11,186	23,77	100,14	grt1 (Line)
59 / 1.	37,454	2,129	0,017	21,45	0,115	3,96	11,222	23,761	100,12	grt1 (Line)
60 / 1.	37,508	2,153	0,016	21,501	0,127	4,092	11,122	23,992	100,52	grt1 (Line)
61 / 1.	37,557	2,139	0,022	21,322	0,106	4,126	11,113	23,787	100,18	grt1 (Line)
62 / 1.	37,476	2,068	0,011	21,379	0,123	4,223	11,165	23,541	99,987	grt1 (Line)
63 / 1.	37,494	2,069	0,001	21,297	0,098	4,349	11,035	23,846	100,2	grt1 (Line)
64 / 1.	37,356	2,027	0,018	21,322	0,12	4,458	11,119	23,717	100,14	grt1 (Line)
65 / 1.	37,395	1,96	0,003	21,317	0,127	4,52	11,158	23,721	100,2	grt1 (Line)
66 / 1.	37,31	1,975	0	21,341	0,118	4,499	10,989	23,714	99,948	grt1 (Line)
67 / 1.	37,539	1,935	0	21,289	0,117	4,52	11,018	23,839	100,26	grt1 (Line)
68 / 1.	37,432	1,954	0,019	21,331	0,131	4,499	11,08	23,632	100,09	grt1 (Line)
69 / 1.	37,312	1,939	0	21,279	0,124	4,533	10,979	23,876	100,05	grt1 (Line)
70 / 1.	37,413	1,983	0	21,35	0,113	4,539	11,103	23,653	100,15	grt1 (Line)
71 / 1.	37,425	1,94	0,007	21,32	0,083	4,526	10,975	23,726	100,01	grt1 (Line)
72 / 1.	37,696	2,04	0,02	21,361	0,102	4,418	10,96	24,018	100,62	grt1 (Line)
73 / 1.	37,436	2,023	0,026	21,456	0,083	4,496	10,973	23,917	100,43	grt1 (Line)
74 / 1.	37,687	2,069	0,001	21,513	0,103	4,416	10,956	23,735	100,48	grt1 (Line)
75 / 1.	37,506	2,075	0,013	21,461	0,108	4,428	10,91	23,925	100,43	grt1 (Line)
76 / 1.	37,626	2,143	0	21,371	0,089	4,27	10,903	24,037	100,44	grt1 (Line)
77 / 1.	37,456	2,205	0,008	21,467	0,06	4,272	10,821	23,601	99,888	grt1 (Line)
78 / 1.	37,623	2,167	0,01	21,493	0,084	4,057	10,71	24,14	100,28	grt1 (Line)
79 / 1.	37,535	2,269	0,004	21,402	0,076	4,105	10,856	24,015	100,26	grt1 (Line)
80 / 1.	37,596	2,255	0	21,371	0,095	4,152	10,75	23,998	100,23	grt1 (Line)
81 / 1.	37,48	2,218	0,006	21,347	0,096	4,251	10,899	23,806	100,11	grt1 (Line)
82 / 1.	37,499	2,147	0	21,439	0,075	4,429	10,761	23,845	100,21	grt1 (Line)
83 / 1.	37,384	2,083	0,008	21,389	0,121	4,486	10,842	23,807	100,13	grt1 (Line)
84 / 1.	37,508	2,102	0,017	21,237	0,139	4,525	10,747	23,719	99,993	grt1 (Line)
85 / 1.	37,554	2,07	0,006	21,383	0,096	4,512	10,878	23,926	100,43	grt1 (Line)
86 / 1.	37,347	2,087	0,009	21,344	0,134	4,468	10,839	23,928	100,17	grt1 (Line)
87 / 1.	37,252	2,087	0	21,257	0,109	4,486	10,834	23,781	99,814	grt1 (Line)
88 / 1.	37,592	2,013	0	21,491	0,084	4,457	10,884	23,843	100,36	grt1 (Line)
89 / 1.	37,552	2,082	0,004	21,405	0,105	4,505	10,885	23,805	100,34	grt1 (Line)
90 / 1.	37,41	2,051	0	21,465	0,097	4,507	10,845	23,958	100,33	grt1 (Line)
91 / 1.	37,66	2,029	0	21,484	0,11	4,445	10,824	23,588	100,14	grt1 (Line)
92 / 1.	37,445	2,032	0,003	21,316	0,102	4,518	11,011	23,733	100,16	grt1 (Line)
93 / 1.	37,499	2,035	0,016	21,361	0,118	4,474	11,035	23,88	100,43	grt1 (Line)
94 / 1.	37,449	2,011	0	21,307	0,13	4,388	11,054	23,827	100,19	grt1 (Line)
95 / 1.	37,378	1,999	0,008	21,3	0,135	4,491	10,97	23,695	99,977	grt1 (Line)
96 / 1.	37,606	2,024	0,003	21,337	0,101	4,33	10,998	23,793	100,2	grt1 (Line)
97 / 1.	37,426	2,175	0,001	21,279	0,124	4,243	10,903	23,907	100,06	grt1 (Line)
98 / 1.	37,678	2,189	0,022	21,405	0,105	4,156	10,967	24,123	100,66	grt1 (Line)
99 / 1.	37,716	2,25	0,003	21,391	0,121	3,997	10,815	23,913	100,22	grt1 (Line)
100 / 1.	37,423	2,261	0	21,362	0,099	3,728	10,938	24,355	100,17	grt1 (Line)
101 / 1.	37,484	2,335	0,008	21,363	0,134	3,638	10,936	24,308	100,21	grt1 (Line)
102 / 1.	37,778	2,462	0	21,697	0,069	3,482	10,913	24,143	100,56	grt1 (Line)
103 / 1.	37,679	2,568	0,007	21,685	0,101	3,41	10,941	24,027	100,44	grt1 (Line)
104 / 1.	37,788	2,631	0,006	21,578	0,071	3,203	10,922	24,387	100,59	grt1 (Line)
105 / 1.	37,735	2,76	0,011	21,514	0,078	3,014	10,555	24,622	100,29	grt1 (Line)
106 / 1.	37,639	2,885	0	21,455	0,116	2,892	10,741	24,445	100,17	grt1 (Line)
107 / 1.	37,655	3,034	0,011	21,397	0,152	2,716	10,588	24,444	99,997	grt1 (Line)
108 / 1.	37,763	3,142	0,009	21,295	0,168	2,607	10,302	24,649	99,941	grt1 (Line)
109 / 1.	37,92	3,19	0,009	21,334	0,17	2,438	10,443	24,978	100,48	grt1 (Line)
110 / 1.	37,993	3,341	0	21,274	0,194	2,352	10,43	25,116	100,7	grt1 (Line)
111 / 1.	37,963	3,531	0,004	21,573	0,206	2,172	10,359	25,192	101	grt1 (Line)
112 / 1.	38,026	3,589	0,008	21,371	0,193	2,013	10,263	24,898	100,38	grt1 (Line)
113 / 1.	37,958	3,586	0,007	21,416	0,2	1,795	10,359	24,885	100,22	grt1 (Line)
114 / 1.	37,884	3,662	0,016	21,444	0,214	1,616	10,339	25,1	100,29	grt1 (Line)
115 / 1.	37,915	3,832	0,006	21,461	0,235	1,56	10,154	24,955	100,13	grt1 (Line)
116 / 1.	37,971	3,791	0,013	21,333	0,242	1,417	10,236	25,259	100,26	grt1 (Line)
117 / 1.	37,769	3,908	0	21,457	0,213	1,257	10,33	25,345	100,3	grt1 (Line)
118 / 1.	37,706	3,9	0,006	21,451	0,209	1,145	9,978	25,799	100,21	grt1 (Line)
119 / 1.	37,921	3,901	0,015	21,479	0,141	1,124	9,619	26,481	100,68	grt1 (Line)
120 / 1.	37,742	3,725	0	21,399	0,149	1,153	9,25	26,986	100,42	grt1 (Line)

Tabelle 3 Gewichtsprozente der Oxide im Granat-Amphibolit (Grt-Linie), gemessen mit der Elektronenstrahlmikrosonde