GEOLOGICA SAXONICA
Journal of Central European Geology

63: 103–122
14.6.2018

© Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, 2018.

SENCKENBERG

Facettierte Granate in der Schwermineralfraktion des Zwickauer Kohlesandsteins (Oberkarbon, Westfal D)

Faceted garnets in the heavy mineral fraction of the Zwickau Carboniferous sandstone (Upper Carboniferous, Westfal D)

Dieter Kutschke [1,2], Heiner Siedel [1], Bernd Ullrich [1]

[1] TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Geotechnik, Professur für Angewandte Geologie, 01062 Dresden, Deutschland; Heiner.Siedel@tu-dresden.de, Bernd.Ullrich@tu-dresden.de — [2] Pratzschwitzer Str. 2, 01796 Pirna, Deutschland; Kutschke_dieter@web.de

Revision accepted 1 December 2017.
Published online at www.senckenberg.de/geologica-saxonica on June 1, 2018.

Kurzfassung

Die Schwermineralfraktion des Zwickauer Kohlesandsteins aus der Marienthal-Pöhlau-Subformation (Zwickau-Formation) des Oberkarbon (Westfal D) enthält zahlreiche Granate, die als charakteristisches Merkmal facettierte Oberflächen zeigen. Diese Granate wurden hinsichtlich ihrer Größe, Form und Verwachsungen mit licht- und rasterelektronenmikroskopischen Methoden untersucht. Weiterhin wurde an zahlreichen Einzelindividuen der Chemismus ermittelt. Es handelt sich um Almandin-reiche Mischkristalle mit einer nicht zonierten, homogenen Zusammensetzung. Die facettierten Oberflächen werden auf Grund der Beobachtungen zu Verwachsungsverhältnissen im Dünnschliff als Ergebnis einer Ätzung durch intrastratale, saure Lösungen während der Diagenese interpretiert. Sie wurde wahrscheinlich durch Zersetzung der im Sandstein vorhandenen organischen Substanz begünstigt.

Abstract

The heavy mineral fraction from the Zwickau Carboniferous sandstone of the Marienthal-Pöhlau subformation (Zwickau formation, Upper Carboniferous, Westfal D) contains a considerable amount of garnet with faceted surfaces as a characteristic feature. These garnets were investigated with respect to size, shape and intergrowth by optical and scanning electron microscopy. Moreover, the chemical composition of numerous single grains was determined. They can be described as almandine-rich solid solutions, characterized by a homogeneous composition without zoning. On the basis of the observed grain intergrowth in thin sections, the faceted surfaces can be interpreted as the result of intrastratal dissolution. Dissolution of organic matter in sandstone during diagenesis might have facilitated etching by acid solutions.

1. Einleitung

Bei petrographischen Untersuchungen des Baumaterials der im 14.–16. Jahrhundert errichteten Marienkirche zu Zwickau im Rahmen von Restaurierungsarbeiten wurde in den Schwermineralfraktionen des dort fast ausschließlich verbauten Sandsteins aus dem Zwickauer Oberkarbon („Zwickauer Kohlesandstein“) ein z. T. sehr hoher Anteil an Granat festgestellt. Granat ist als Akzessorium in Sedimenten nichts Außergewöhnliches, die ungewöhnlichen Kornformen und Oberflächenstrukturen dieser Granate regten jedoch zu ihrer weiteren Untersuchung und zu Überlegungen bezüglich ihrer Entstehung an. Die meisten Granatkörner zeigen auf Teiloberflächen oder der gesamten Kornoberfläche orientierte, geometrisch regelmäßig begrenzte Kristallflächen, eine Erscheinung, die in der Literatur als „facettierte Granate“ („faceted garnets“, u. a. Morton et al. 1989) beschrieben wird. Die Bausandsteine sind der bis zu 150 m mächtigen Marienthal-Pöhlau-Subformation (Zwickau-Formation) innerhalb der molassoiden Schichten des Westphal D in der Zwickauer Teilsenke der Vorerzgebirgssenke zu-

zuordnen. Sie enthält mehrere Steinkohlenflöze, die durch mächtige Sandstein-Siltstein-Wechsellagerungen voneinander getrennt sind. Neben den Kohleflözen wurden – teilweise im Tiefbau – seit dem Mittelalter zwischen den Ortschaften Planitz und Cainsdorf südlich von Zwickau auch Sandsteine für Bauzwecke abgebaut. Besonders die Sandsteinlagen zwischen dem Tiefen Planitzer Flöz und dem Rußkohlenflöz waren Gegenstand des Abbaus, möglicherweise auch solche aus dem Hangenden des Rußkohlenflözes (Siedel & Kutschke 2017). Der Abbau wurde allerdings bereits im 19. Jahrhundert eingestellt; die Steinbrüche sind heute durch Überbauung nicht mehr zugänglich bzw. auffindbar. Ein Vergleich der Befunde am Bausandstein der Marienkirche mit anstehenden Sandsteinen der Marienthal-Pöhlau-Subformation bzw. eine detaillierte feinstratigraphische Zuordnung der Bausandsteine ist deshalb nicht möglich. Dennoch sollen die Ergebnisse der Untersuchungen an Baugesteinsproben hier, soweit möglich, in einen geologisch-petrologischen Kontext gestellt werden.

2. Bisherige Untersuchungen zur Genese facettierter Granate in Schwermineralfraktionen: Wachstum oder Ätzung?

Seit den ersten Beschreibungen von facettierten Granaten in Schwermineralpräparaten (Sauer 1900, Kalkowsky 1921, Bramlette 1929) gingen die Ansichten über die Entstehung dieser Mineralkörner mit der außergewöhnlichen Tracht und dem speziellen Habitus in unterschiedlichen, nicht metamorph beeinflussten Sedimenten auseinander. Einige, vor allem ältere Autoren (z. B. Kalkowsky 1921, Pustawaloff 1955, Langbein 1965, Simpson 1976) waren der Überzeugung, dass nur ein authigenes Wachstum in situ als Ursache infrage käme, viele andere (u. a. Bramlette 1929, Roth 1976, Borg 1986, Morton et al. 1989, Salvino & Velbel 1989) vertraten die Meinung, dass nur Lösungsvorgänge bzw. Ätzung von dedritischen Granaten zu diesen außergewöhnlichen Formen führen können. Maurer (1982) hielt sowohl Anwachsungs- als auch Lösungsformen als Ursache für möglich. Häusser & Kurze (1975) zitieren Kopeliovič (1965), der vermutete, dass die treppenstufenartigen Formen „auf dem Zusammenspiel von Lösungen und dem Bestreben zur Schaffung energetisch günstiger Begrenzungen durch teilweises Neuwachstum an den detritisch zugeführten Körnern“ beruhen. Dieser Meinungsstreit lässt sich anhand der entsprechenden Veröffentlichungen bis in die 1980er Jahre verfolgen, wobei in den letzten Jahrzehnten – nach der zusammenfassenden Arbeit von Morton et al. (1989), in der nochmals alle Argumente abgewogen werden – eine Akzeptanz der Ätzungstheorie festzustellen ist. Die Ansicht, dass die beobachteten regelmäßigen Flächen Lösungsstrukturen sind, wird u. a. gestützt durch systematische Untersuchungen an Schwermineralen aus Tiefbohrungen der Erdölerkundung (Morton 1987, Walderhaug & Porten 2007), nach denen mit zunehmender Versenkungstiefe der Sedimente Schwermineral-Granate zunächst vereinzelt derart auffällige Oberflächen aufweisen und dann sämtlich facettierte Oberflächen zeigen, bevor sie in noch größeren Tiefen schließlich aus der Schwermineralfraktion verschwinden. Facettierte Granate mit ihrem unverkennbaren Habitus wurden in Schwermineralpräparaten aus unterschiedlichen stratigraphischen Einheiten und in weltweiter Verbreitung gefunden (Tab. 1). Praktisch ist die Frage der Granatstabilität bzw. -neubildung in Sedimenten einerseits für die Abschätzung des Diagenesegrades von Sedimenten von Bedeutung, die auch als Speichergesteine für die Erdölindustrie von Interesse sein können (Walderhaug & Porten 2007). Zum anderen werden Schwermineralanalysen häufig für die Provenienzanalyse des sedimentierten Materials herangezogen; Granate spielen dabei als Indikatoren der Herkunft eine wichtige Rolle (z. B. Smale 2007) und werden diesbezüglich auch hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung bewertet (Morton 1985). Die relative Stabilität detritischer Granate (von möglichen Veränderungen der Oberflächen durch Ätzung während der Diagenese abgesehen) bis in größere Versenkungstiefe der Sedimente und die Zuordnung aller vorkommenden Granate zum Detritus ist demnach notwendige Voraussetzung für eine sinnvolle Interpretation der Daten – könnten Granate im Sediment neu gebildet werden, wäre die Nutzung ihres Auftretens als Herkunftsmerkmal von Sedimentmaterial zumindest fraglich. Weiterhin berührt das Problem der Oberflächenveränderungen an Granatkörnern auch die Abschätzung der Dauer subrezenter Verwitterungsvorgänge in jungen Sedimenten oder Böden (Velbel et al. 2007).

Die Hypothese einer authigenen Neubildung von Granat in nichtmetamorphen Sedimenten schließt sowohl die Möglichkeit einer vollständigen Umwachsung präexistierender detritischer Granate als auch die vollständige Neubildung derselben ohne „Altsubstanz“ ein. Als Argument für ein authigenes Wachstum der Granate in situ wird angeführt, dass die ideal scharfen Kanten und unversehrt glatten Flächen der Subkristalle sowie die mitunter fragilen und bizarren Kornformen einen präsedimentären Transport auf keinen Fall ohne sichtbare Defekte überstanden haben könnten (Langbein 1965). Diese Überlegung wäre aber ebenso richtig im Fall der Annahme einer Ätzung, die dann erst nach der Ablagerung während der Diagenese stattgefunden haben sollte. Von Müller (1958) wird allerdings angenommen, dass die Formbildung der facettierten Granate bereits während der primären Verwitterung eines kristallinen Muttergesteins erfolgte und die betreffenden Granate der Korngrößen unter 0,1 mm den Transport in den Sedimentationsraum im Wasser schwebend ohne Beschädigung überstanden hätten.

Wird ein authigenes Wachstum in situ ohne wesentlichen Altbestand angenommen, wäre die bei einem prä-

Tabelle 1. Stratigraphische und räumliche Verbreitung facettierter Granate in Sedimentgesteinen (Auswahl).

Table 1. Stratigraphical and spatial distribution of faceted garnets in sedimentary rocks (selection).

stratigraphische Einheit	Ort	Muttergestein, Fazies	Autor / Quelle
Pleistozän/Holozän	Süd-Michigan, USA	Böden	Velbel et al. (2007)
Eozän/Oligozän	Neuseeland, Bohrung	paralisch	Morton et al. (1989)
Chattien	Westschweiz	Süßwassermolasse	Maurer (1982)
Oberes Paläozän	Nordseebohrungen	Sandsteine	Morton (1987)
Paläozän	zentrale Nordsee, Bohrung	marine Beckenfazies	Morton et al. (1989)
unteres Tertiär	Kalifornien, USA	Sandsteine u. Kalksandsteine	Beveridge (1960)
Kreide	Nord-Jakutien, Russland		Saporozhtseva (1960), zit. in Morton et al. (1989)
obere Kreide	Alberta, USA	Sandstein	Rahmani (1973)
Jura	New Mexico, USA, Bohrung	Arkosen, fluviatil-arid	Hansley (1987)
Jura	Nordsee, Bohrung	Flachwassersedimente	Morton et al. (1989)
Trias, Keuper	Süddeutschland	Sandstein	Borg (1986)
Trias, unterer u. mittlerer Keuper	Norddeutschland, Bohrung	Lettenkohlensandstein und Schilfsandstein	Häusser & Kurze (1975)
Trias, Buntsandstein	Thüringen und Subherzyn, Mitteldeutschland	Sandstein	Langbein (1965), Roth (1976)
Trias, oberer Buntsandstein	Thüringen, Mitteldeutschland	Sandstein, Dolomit	Kalkowsky (1921)
Karbon	Süd-Timan, Russland	Sandsteine	Serdjucenko et al (1949), zit. in Morton et al. (1989)
Oberkarbon	Mitteldeutschland	Molassesandstein, paralisch	Kutschke et al., diese Arbeit
Devon	Nord-Timan, Russland	Sandsteine	Pustowaloff (1955)
Kambrium	Nord-Michigan, USA	Sandsteine	Salvino & Velbel (1989)

existierenden detritischen Kern zu erwartende optische und/oder chemisch-substantielle Zonalität nicht notwendig zu beobachten. Tatsächlich wurde an vielen daraufhin untersuchten Schwermineral-Granatkörnern optische und chemische Homogenität festgestellt (u. a. Morton 1985, Morton et al. 1989), während Granatkörner in den potenziellen metamorphen oder magmatischen Herkunftsgesteinen entstehungsbedingt oft eine deutliche Zonierung aufweisen (z. B. Schumacher et al. 1999). Morton (1985) erklärt diese Diskrepanz mit dem Maßstab der Zonierung: In den großen Granatkörnern der Herkunftsgesteine sind die in sich chemisch homogenen Zonen größer als die Durchmesser der zerbrochenen und mechanisch abgeschliffenen Granatkörner in der Schwermineralfraktion, so dass die Granate in der Schwermineralfraktion zwar die Spannweite chemischer Zusammensetzungen zonierter Granate in den Herkunftsgesteinen abbilden, aber, von seltenen Ausnahmen abgesehen (Morton et al. 1989), selbst keine Zonierung zeigen.

Die für eine Neubildung des Granates erforderlichen Ionen Al^{3+}, Fe^{3+}, Si^{3+}, Ca^{2+} und Mg^{2+} lassen sich unter den Bedingungen der Spätdiagenese zwanglos aus der Zersetzung z. B. von Feldspäten ableiten bzw. sind im Porenwasser vorhanden (Langbein 1965). Flint & Wells (1941, zitiert bei Langbein 1965) synthetisierten unter normalen Temperaturbedingungen und bei Ca-Überschuss „reguläre Hydrogranate“ der Pyralspit-Gruppe und wiesen dadurch nach, dass grundsätzlich durchaus die Möglichkeit einer Neubildung von Granatsubstanz unter den p/T-Bedingungen der Spätdiagenese besteht. Natürliche Hydrogranate (Beljankin & Petrow 1939, Meagher 1982) der Ugrandit-Gruppe (Hibschit) konnten jedoch bislang nur in kontaktmetamorphen und metasomatischen Gesteinen nachgewiesen werden, nicht in Sedimenten. Von Kalkowsky (1921) wird das massenhafte Vorkommen von eindeutig neugebildeten idiomorphen Quarzkriställchen und Rutilen gemeinsam mit zahlreichen facettierten Granaten aus Sedimenten des Röt bei Jena beschrieben. Eine Neubildung oder Umwachsung von Mineralen, deren Genese traditionell ausschließlich auf magmatische oder metamorphe Prozessen zurückgeführt wird (z. B. Rutil, Turmalin, Spinell, Feldspäte, Quarz), wurde in Sedimenten ohne eindeutige Einwirkung hochthermaler Prozesse zwar wiederholt unzweifelhaft festgestellt (Pustowaloff 1955). Ein direkter Nachweis von Granatneubildungen in Sedimentgesteinen konnte allerdings nicht erbracht werden.

Die Idee der Bildung einer facettierten Oberflächenskulptur infolge Abtragung von Substanz durch Ätzungs- bzw. Lösungsvorgänge an detritisch gerundeten Granaten wird von zahlreiche Autoren vertreten (u. a. Müller 1958, Rahmani 1973, Hemingway & Tamar-Aga 1975, Roth 1976, Borg 1986, Morton 1987, Morton et al. 1989 und Salvino & Velbel 1989). Nach Borg (1986) sind „diagenetische Anwachssäume oder eine vollständige authigene Neubildung auszuschließen“, da geringer Druck und niedrige Temperaturen ein Wachstum pyralspitischer Granate in situ während der Diagenese unmöglich machen. Unter der Prämisse, dass die Bildung von Granat nur bei hohen Druck- und Temperaturbedingungen möglich sei, wird angenommen, dass unter den Bedingungen der Diagenese lediglich der anhaltende Substanzabtrag durch Lösung/Ätzung und die mehrmalige Wiederholung der Ätzfiguren zu der beobachteten terrassenförmigen Abstufung der Kristallflächen führen kann. Die

Ätzungstheorie wird durch die Beobachtung unterstützt, dass (fast) nie, weder durch optische Methoden, noch durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen innerhalb der betreffenden Granate eine optische oder substantielle Zonierung feststellbar ist, die bei einer Umwachsung alter Granatkerne durch authigen gebildete Substanz zu erwarten wäre (s. o.).

Als Grundlage für die „Ätzungstheorie“ dienten ferner die Ergebnisse von verschiedenen Lösungsversuchen mit Flusssäure und alkalischer KOH-Schmelze durch Rinne & Kulaszewski (1925), welche an künstlichen Granatkugeln damit Oktaeder- und Würfelflächen erzeugten. Bramlette (1929) erhielt durch Ätzung mit konzentrierter Flusssäure Strukturen, die denen natürlich facettierter Granate entsprochen haben sollen, zeigt aber keine Abbildungen davon. Simpson (1976) erzeugte im Labor kleine Ätzgrübchen (“etch pits“) auf Granat durch Einwirkung von Flusssäure. Hansley (1987) gelang durch Laborbehandlungen von Granaten mit Oxalsäure (bei 75 °C) die Erzeugung von facettierten Oberflächen, die den in der Natur an jurassischen Arkosesandsteinen der Morrison-Formation in New Mexico gefundenen Strukturen sehr ähnlich waren. Sie schloss daraus, dass in diesen Sandsteinen organische Säuren (Dicarboxyl-Säure), die während der späten Diagenese durch bakterielle Destruktion aus terrestrischen Pflanzenresten gebildet wurden, bei Temperaturen von über 80°C zur Ätzung der detritischen Granate geführt haben. Morton et. al. (1989) verweisen darauf, dass angeätzte Granate im Labor sowohl durch organische als auch durch anorganische Säuren erzeugt werden konnten, Facettenmuster auf den Oberflächen, die denen der in Sedimenten gefundenen Granate ähnlich sind, aber ausschließlich durch Ätzung mit organischen Säuren experimentell entstanden. Für die natürliche Lösung/Ätzung im Stadium der Diagenese wird allgemein das Vorhandensein von sauren intrastratalen Lösungen angenommen.

Im Stadium einer fortgeschrittenen Diagenese durch Überdeckung und Versenkung von Sedimenten („burial diagenesis“) können deutlich erhöhte Temperaturen in den betreffenden Schichten wirksam werden. Morton (1987) stellte in Tiefbohrungen eine zunehmende Ätzungsintensität am Granat bei Versenkungstiefen bis über 3000 m fest. Auch Milliken & Mack (1990) wiesen in der Schwermineralfraktion tertiärer Sandsteine in Versenkungstiefen > 1000 m Granate mit facettierten Oberflächen nach, die in Tiefen von 4550 m völlig aus dem Sediment verschwanden. Desgleichen fanden Walderhaug & Porten (2007) an den in ihren Untersuchungen von über 1900 Dünnschliffen aus Bohrungen in der Nordsee nachgewiesenen Granaten ab einer Tiefe von 2000 m beginnende Korrosionserscheinungen. Granate aus Tiefen über 3500 m wiesen sämtlich facettierte Oberflächen auf, bevor sie in Tiefen > 4600 m (bei gemessenen Temperaturen von 175°C) gar nicht mehr nachweisbar waren. Die Laborexperimente sowie die systematischen, tiefenabhängigen Beobachtungen an tief versenkten Gesteinen stellen wohl die überzeugendsten Argumente für die Theorie der Entstehung von facettierten Oberflächen durch Lösungs- bzw. Zersetzungserscheinungen dar, die heute allgemein akzeptiert ist.

Das Auftreten von sehr kleinen, tiefen und meist regelmäßig geformten Grübchen („etch pits“, Größe 1 – 10 µm) auf den glatten Kristallflächen wird von Simpson (1976) auf eine jüngere partielle Ätzung zurückgeführt. Velbel et al. (2007) fanden solche Ätzgrübchen auf Granatkörnern mit teilweise facettierten Oberflächen in Böden und interpretieren ihr Auftreten als subrezente Verwitterungsform. Nach Simpson (1976) können sich diese Grübchen über lange Zeiträume ausweiten und sich zu größeren flachen Gruben und schließlich zu unregelmäßigen Flächen vereinigen. Andererseits kann eine fortgeschrittene strukturell orientierte Flächenerosion durch ätzende Lösungen auch zu skelettartigen Formen führen (Hemingway & Tamar-Agha 1975).

Für Lösungserscheinungen wie auch für eine hypothetische authigene Neubildung ist das Vorhandensein von intrastratalen Lösungen in „begrabenen“, tiefer versenkten Sedimenten notwendige Voraussetzung. Über die Zusammensetzung dieser allgemein als „sauer“ oder „ätzend“ bezeichneten Lösungen sowie deren Herkunft oder Entstehung gibt es nur wenig Angaben. Experimentelle Untersuchungen und das gelegentliche Vorkommen von inkohlten Pflanzenresten in den betreffenden stratigraphischen Einheiten sprechen für die Möglichkeit einer Ätzung durch organische Säuren (Morton et al. 1989, Hansley 1987).

3. Material und Methoden

3.1. Zur Petrographie des Zwickauer Kohlesandsteins

An der Marienkirche lassen sich mehrere Varietäten des Zwickauer Kohlesandsteins dokumentieren. Sie unterscheiden sich in Farbe, Korngröße und Gehalt an organischer Substanz, wobei der vorgefundene Mineralbestand qualitativ relativ stabil erscheint. Der untersuchte Sandstein ist hellgraubraun bis bräunlichgrau, z. T. hellockerfarben und erscheint makroskopisch als vorwiegend mittelkörnig, partiell grobkörnig, sowie meist relativ schlecht klassiert. Die Schichtflächen sind stellenweise durch feine kohlige Lagen und Schmitzen und durch pflanzlichen Detritus, vereinzelt auch groben Pflanzenhäcksel, markiert. Um die inkohlten Pflanzenreste zeichnen sich zuweilen deutliche bis 1 cm breite Bleichungshöfe ab. Schichtflächen sind beim Aufspalten größerer Blöcke oft mit dichtem Belag von feinen Hellglimmerschüppchen bedeckt. In einzelnen feinkörnigeren Lagen sind im cm- bis dm-Bereich Kreuzschichtung und Schrägschichtung zu beobachten.

Nach Siebanalysen liegt der Haupanteil der Körner zwischen 0,2 und 0,6 mm, also im Bereich Mittelsand. 57 Gewichtsprozent fallen in diesen Korngrößenbereich, nur 21 % liegen darüber. Nur sehr selten fallen einzelne

Quarzgerölle von ca. 10 – 15 mm Durchmesser auf. Der Quartilwert (Q_{50}) beträgt 0,33. Bei einem mittleren Sortierungskoeffizienten nach Trask von 1,49 (1,43 – 1,63) ist das Gestein als „mittel klassiert“ zu bezeichnen (Siedel & Kutschke 2017).

Wesentliche Bestandteile des untersuchten Kohlesandsteins sind Quarz und quarzitische Gesteinsfragmente (60 – 80 %), Hellglimmer (5 – 15 %) und Tonminerale (10 – 15 %). Die Quarzkörner sind primär nur kantengerundet (Rundungsklassen 0,3 bis 0,5 der Krumbeinschen Skala) und oft von sehr unregelmäßiger Form. Sie zeigen meist feine homoaxiale Aufwachsungen von Quarzsubstanz, jedoch nur vereinzelt so intensiv, dass eine deutliche Tendenz zur Rekonstruktion der Idiomorphie erkennbar ist. In einigen Proben wurden auch einzelne idiomorphe, dickprismatische Quarzkristalle mit sehr scharfen Kanten und ebenen Flächen beobachtet, bei denen es sich offensichtlich um vollständige homoaxiale Umwachsungen der Primärquarze handelt. Die angelagerte Quarzsubstanz der Umwachsungen verdrängt die strukturlose bituminöse organische Substanz in den Porenräumen. Polykristalline Quarzkornaggregate mit amöboider Verzahnung und stark undulöser Auslöschung lassen auf Beteiligung von kristallinen Gesteinen im Ausgangsmaterial schließen. Nicht selten sind kryptokristalline Quarze (Chert). Der Quarzkornkontakt bzw. die direkte Quarzkornbindung ist infolge der zahlreichen Hellglimmerlamellen und der partiellen Kaolinitanreicherungen nicht sehr intensiv, vorwiegend punktförmig und zeigt nur sehr selten Anzeichen einer Drucklösung. Bei den Glimmern handelt es sich ausschließlich um Hellglimmer, in Form von meist 0,2 – 1 mm großen Schüppchen, die ± parallel zur Schichtung eingeregelt sind. Die größeren Muskovite sind teilweise deformiert und geknickt und legen sich z. T. um die Quarzkörner. Sie sind an den Enden oft pinselartig aufgefasert. Als Tonminerale wurden mittels Röntgendiffraktometrie Kaolinit und Spuren von Illit und Chlorit nachgewiesen. Sehr feine Kaolinitaggregate in den Zwickelbereichen des Quarzgerüstes, selten größere Kaolinitstapel, meist mit feinschuppigem Serizit vergesellschaftet, sind als Bestandteil des Porenzementes vorhanden. Letzterer tritt auch nesterartig in den Quarzzwickeln auf. Plagioklase und Mikroklin sind nur sehr selten eindeutig zu identifizieren. Offensichtlich sind die für einen Molassesandstein charakteristischen Feldspäte bereits weitestgehend zu Kaolinit zersetzt, auch im Röntgendiagramm sind sie nicht nachweisbar. Vereinzelt treten merkwürdig frische und kaum zersetzte Kalifeldspate auf. Pyrit kommt selten in Form von Residuen mit einer Füllung von Eisenhydroxiden vor. Karbonate konnten nicht nachgewiesen werden. Bituminöse organische Substanz ohne Anzeichen einer Strukturierung tritt in allen untersuchten Dünnschliffen in wechselnden Mengen auf, vorwiegend schlierig-lagig auf den Schichtflächen und häufig als Porenfüllung bzw. als Belag der Porenwandungen. Der Gehalt an organischer Substanz liegt trotz der auffälligen feinen kohligen Lagen und Schmitzen im Durchschnitt weit unter 1%. Somit können die untersuchten Proben des Zwickauer Kohlesandsteins als karbonatfreie Subgrauwacken bezeichnet werden, wie sie für die oberkarbone Molasse des Variszikums charakteristisch sind. Alle Veränderungen des primären Mineralbestandes durch Lösungsvorgänge, Umbildungen und Neubildungen können einer fortgeschrittenen Diagenese zugeschrieben werden.

3.2. Herstellung der Schwermineralpräparate und Untersuchungsmethoden

Als Ausgangsmaterial für die Untersuchungen standen unverwitterte Proben von ausgebauten Quadern des 1990/92 erneuerten Hauptgesimses der Südseite der Zwickauer Marienkirche zur Verfügung. Es handelte sich um graue bis graubraune und schwach rötliche Varietäten des Zwickauer Kohlesandsteins. Die Methodik der Schwermineraltrennung entsprach dem allgemein üblichen Schema: Grobzerkleinerung mit Gummihammer, Feinzerkleinerung durch Reiben zwischen Weichholzbrettchen; Abtrennung der Tonfraktion durch Schlämmen und Dekantieren, Absieben mit DIN-Prüfsieben. Pro Probe dienten 100 g der Kornfraktion 0,1 – 0,6 mm für die Schweretrennungen mit Methylenjodid ($\rho = 3{,}3$ g/cm^3). Eine Nachbehandlung der Schwerefraktionen erfolgte mit Salzsäure zur Entfernung von Eisenhydroxidkrusten. Insgesamt wurde Material von 12 Proben verschiedener Varietäten des an der Marienkirche ausgebauten Zwickauer Kohlesandsandsteins für die Schweretrennungen verwendet. In den erhaltenen Schwermineralfraktionen, von denen jeweils Streupräparate angefertigt wurden, trat Granat neben Turmalin, Rutil, Ilmenit und selten Zirkon in unterschiedlichen Mengenanteilen auf. In 3 Proben waren ca. 60 % der Körner Granate, in 8 Proben ca. 5 bis 30 %, 1 Probe enthielt keinen Granat. Die höchsten Granatgehalte in den Schwermineralproben waren grauen und rötlich-ockerfarbenen, überwiegend mittelkörnigen, etwas stärker porösen Sandsteinvarietäten mit fein verteilter kohliger Substanz und Pflanzendetritus zuzuordnen. Die Turmaline traten sowohl in Form von gut gerundeten Körnern, als auch in Form von scharfkantigen Bruchstücken deutlich größerer Exemplare ohne Anzeichen einer detritischen Rundung auf. Die Rutile, meist gut gerundet, zeigten z. T. deutliche Anzeichen einer postsedimentären Substanzanlagerung in Form von mehr oder weniger stark regenerierten Flächen und Kanten.

Für weitere Untersuchungen an Einzelkörnern wurden Granate aus den erhaltenen Schwermineralfraktionen gezielt unter dem Polarisationsmikroskop separiert (ausgelesen). Vom erhaltenen Material erneut angefertigte Streupräparate wurden im Durchlicht unter dem Polarisationsmikroskop bzw. unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht und zahlreiche Einzelkörner photographisch dokumentiert und z. T. vermessen. Für die polarisationsmikroskopische Untersuchung der Granate im Gefügezusammenhang

standen darüber hinaus Dünnschliffe des Zwickauer Kohlesandsteins zur Verfügung.

Untersuchungen zur Morphologie und zum Hauptelementbestand an Granateinzelkörnern wurden an einem REM ZEISS EVO 50 mit Wolframkathode (20 kV, SE, BSE, Hochvakuum) durchgeführt. Streupräparate ausgelesener Granatkörner wurden dazu zunächst auf Aluminiumprobenträgern präpariert und mit Kohlenstoff und/oder Gold/Palladium bedampft. Die chemische Elementanalyse erfolgte als Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA) mit Hilfe eines mit dem REM gekoppelten ROENTEC Detektors XFlash 3001 (Hochvakuum, 20 keV, Messzeit 200 s, standardlose Analyse). Die Ergebnisse wurden mit den Auswerteprogrammen Quantax 1.7 und Esprit 1.8 bearbeitet; über den darin enthaltenen Auswertemodus LM Automatik wurden die Gehalte der Hauptelemente in Oxidschreibweise dargestellt. Zusätzlich zu diesen chemischen Analysen an der Kornoberfläche wurden weitere Messungen an polierten Anschliffen separierter Granatkörner durchgeführt, um etwaige Änderungen der chemischen Zusammensetzung über den Kornquerschnitt zu detektieren.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Einbettung im Sandstein, Korngröße und Morphologie der Granate

In Dünnschliffen des Zwickauer Kohlesandsteins wurden die Granate bevorzugt in Porenräumen oder in Verbindung mit den die Porenräume z. T. ausfüllenden Kaolinit-/Sericitanreicherungen bzw. in diese hineinragend gefunden (Tafel 1). Organische Substanz ist im Dünnschliff häufig in unmittelbarer Nähe der Granatkörner nachweisbar. Die um Granatkörner mit facettierten Oberflächen in situ im Dünnschliff beobachteten Hohlräume (Tafel 1, Bild 1 bis 6) deuten auf eine sekundäre Entstehung durch Verlust der ursprünglich den Hohlraum ausfüllenden Kornsubstanz hin und lassen teilweise noch die Form der einstmals diesen entstandenen Hohlraum ausfüllenden Körner erahnen. In Bild 1 ist das „verlorene Korn“ durch Tonmineralsubstanz nachgezeichnet, in Bild 4 durch organische Substanz. Bild 3 stellt ein verkleinertes Granatkorn zwischen zwei Quarzen dar; an den randlichen Begrenzungen der Quarzkörner zur Pore sind noch gut die (aufgelösten) ehemaligen konvex-konkaven Kornkontakte zwischen Granat- und Quarzkorn zu erkennen. Bild 5 zeigt ein in mehrere Einzelteile fragmentiertes, größeres reliktisches Korn mit seinem sekundär entstandenen Porenhohlraum (die obere Begrenzung des Korns ist an den Kontakten zu den angrenzenden Quarzkörnern noch gut zu erkennen). Die ablesbaren ursprünglichen Kornformen der Granate zeigen die gerundeten Formen detritischer Körner. Ähnliche, facettierte Granatkörner direkt umgebende Porosität findet sich in selten publizierten entsprechenden Dünnschliffabbildungen, so bei Walderhaug & Porten (2007; Fig. 2, jurassischer Sandstein aus 3070 m Tiefe unter dem Meeresspiegel, Nordsee) und Hansley (1987; Fig. 6, jurassischer Sandstein, Morrison Formation, New Mexico).

Die große Anzahl der erhaltenen Granatkörner in den Schwermineralpräparaten des untersuchten Zwickauer Kohlesandsteins (mehrere Tausend Einzelexemplare) ermöglichte umfangreichere Untersuchungen zu ihrer Korngröße und Morphologie sowie eine gewisse statistische Absicherung der Ergebnisse.

Der größte Korndurchmesser der untersuchten Granate schwankt zwischen 0,075 mm und 0,6 mm. Zirka 60 % aller unter dem Mikroskop vermessenen Granate (n = 504) bilden das Maximum der Verteilungskurve zwischen 0,2 und 0,3 mm (Abb. 1). Wenn man berücksichtigt, dass für die Erzeugung der Schwermineralfraktionen die Fein- bis Mittelsand-Korngrößenfraktion des Zwickauer Kohlesandsteins (0,1 bis 0,6 mm) genutzt wurde, so kann festgestellt werden, dass die Granatkörner bei annähernder Normalverteilung – wie für Schwerminerale im Vergleich zu den dominierenden Quarzkörnern zu erwarten – überwiegend in der unteren Hälfte dieses vorgegebenen Korngrößenbereiches angereichert sind. Körner > 0,4 mm sind sehr selten.

Unter dem Binokular erscheinen die Granatkörner überwiegend farblos bis sehr hell rötlich, selten hellbräunlich. Im Durchlicht unter dem Mikroskop sind sie oft farblos, größere Exemplare häufiger blass rötlich bis hell pyropfarben. Die Lichtbrechung beträgt wenig über 1,74. Optische Anomalien (anomale Doppelbrechung, Zonarbau) wurden in keinem Fall beobachtet. Die Kornform ist im Streupräparat als isometrisch, länglich oder völlig unregelmäßig zu bezeichnen:

a) annähernd isometrisch (Tafel 2, Bild 1 und 2) — ca. 50%
b) länglich (Tafel 2, Bild 3 und 4) — ca. 35%
c) unregelmäßig (Tafel 2, Bild 5 und 6) — ca. 15%

Die als „unregelmäßig“ (auch „bizarr“ nach Müller 1958, Langbein 1965) zu bezeichnenden Körner zeigen teils stark konkave Oberflächenbereiche (Tafel 2, Bild 5 und 6; s. auch Tafel 3), was besonders bei größeren Exemplaren beobachtet werden kann. Diese Körner könnten Relikte von ehemals mit konvex-konkaven Kornkontakten zu benachbarten Quarzkörnern verwachsenen, detritischen Granatkörnern mit erhaltenen Kontaktflächen darstellen. Bemerkenswert und nicht selten sind Granate in Form von ca. 0,01 – 0,02 mm dünnen, doppelseitig fast ebenen Plättchen. Die überwiegende Mehrzahl der untersuchten Granate aller beobachteten Kornformen (a – c) zeichnet sich durch eine typische Oberfläche mit parallel verwachsenen, scharfkantigen und regelmäßig geformten kristallflächenartigen, facettierten Strukturen aus (Tafeln 2, 3 und 4).

Nur vereinzelt (< 0,1% der untersuchten Körner) sind allseitig oder partiell gut gerundete Granate der

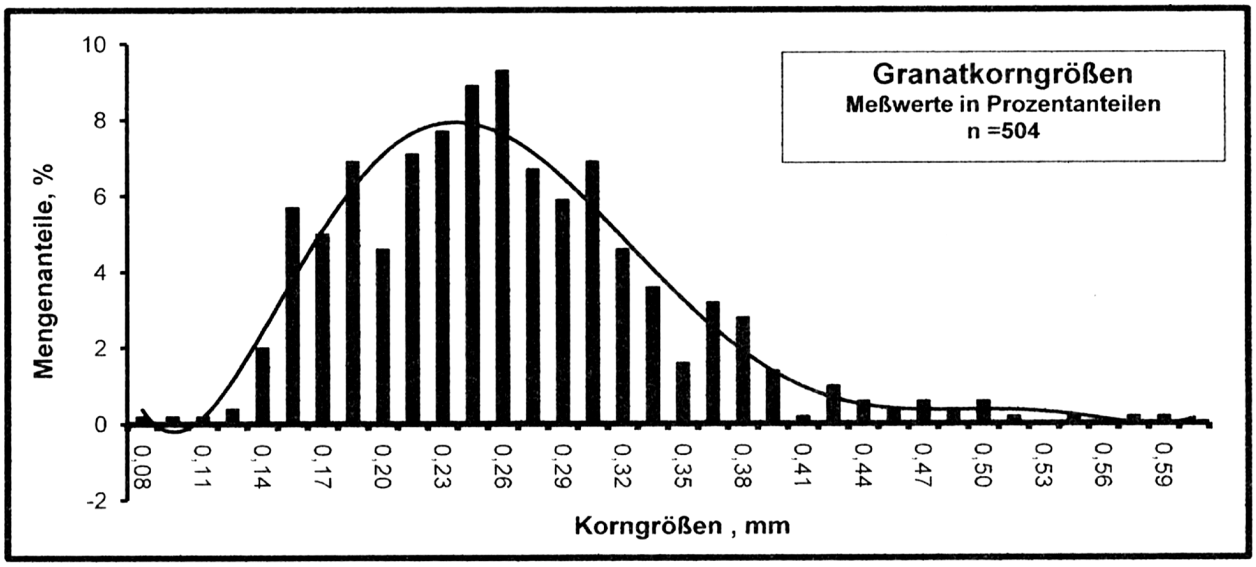


Abb. 1. Häufigkeitsverteilung der Granatkorngrößen in der abgetrennten Schwermineralfraktion 0,1-0,6 mm.

Fig. 1. Frequency distribution of the grain sizes of garnets in the separated heavy mineral fraction 0.1-0.6 mm.

Konformen a und b zu beobachten (Tafel 5, Bild 1 bis 6). Dabei handelt es sich offensichtlich um nahezu unveränderte Exemplare eines eindeutig detritischen Altbestandes. Sie sind meist etwas dunkler bis trüb. Ihre Oberflächen zeigen zumindest teilweise ebenfalls die o. g. parallel verwachsenen Kristallflächen (z. B. Tafel 5, Bild 1 und 6).

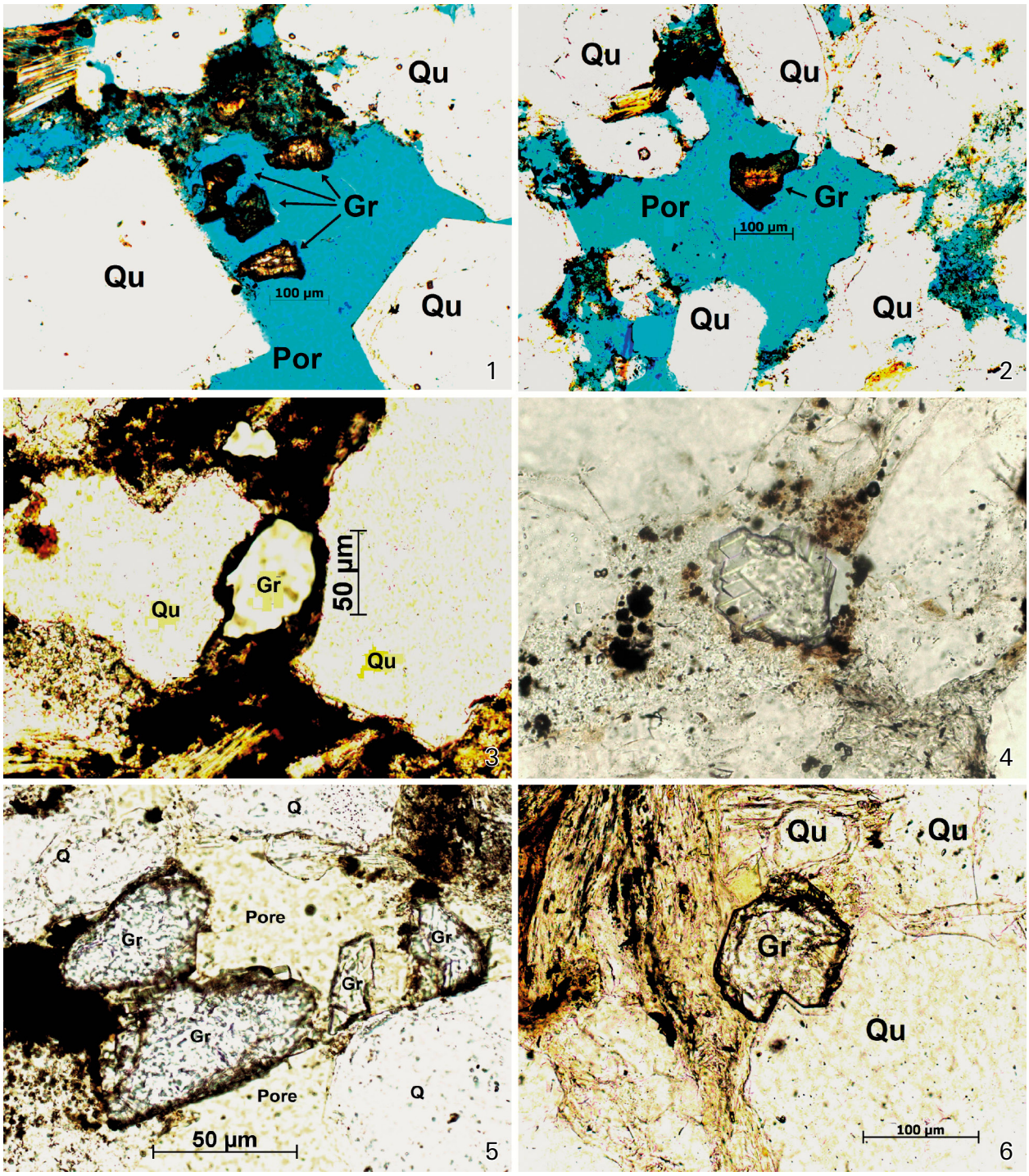
Die facettierte Struktur der Kornoberflächen (Tafeln 2 bis 4) ist auffälligstes Merkmal der untersuchten Granate. Derartige Oberflächenstrukturen an Granaten aus Schwermineralpräparaten sind in der Literatur seit der frühen Darstellung von Sauer (1900) häufig beschrieben worden. Von verschiedenen Autoren wurden sie mit den Begriffen „treppenstufenartig“ (Langbein 1965, Häusser & Kurze 1975), „terrassenförmige Abstufung“ (Müller 1958) oder „facettiert“ („faceted“) (Morton et al. 1989, Maurer 1982, Simpson 1976) charakterisiert oder auch als „Hügelchen“ (hillocks) bezeichnet (Simpson 1976) – letzterer Begriff hat bereits einen genetisch wertenden Charakter und suggeriert Aufwachsungen. Im Folgenden sollen die beobachteten Erscheinungen, der neueren Literatur folgend, neutral als facettierte Oberflächen bezeichnet werden. Sie markieren sich durch meist parallel verwachsene, Kristallflächen ähnliche Flächen mit tafeligem, seltener dickprismatischem Habitus und überwiegend ideal scharfen Kanten (Tafeln 2, 3 und 4).

Die Größe der Facetten liegt bei Kantenlängen zwischen 5 µm und ca. 150 µm, meist bei 20 µm bis 60 µm. Sie sind streng parallel (homoaxial) orientiert und sich überlappend vorwiegend treppenartig angeordnet, wodurch zahlreiche einspringende Winkel entstehen. Kleinere und größere Facetten treten sehr häufig gruppenweise gemeinsam auf ein und demselben Granatkorn auf.

Winkelmessungen an zweidimensionalen Abbildungen zeigten, dass die Flächenwinkel 70° und 110°, d. h. die Rautenwinkel der die Tracht von Granaten bestimmenden Rhombendodekaeder dominieren. Wesentlich seltener treten verzerrte Oktaeder, z. T. in Kombination mit dem Würfel auf. Einzelne Facetten zeigen auf dem Würfel aufsitzende gut ausgebildete Pyramiden, häufiger sind die Kanten der Würfel durch schmale Facetten unvollständig ausgebildeter Pyramidenflächen gebrochen. Granate mit dem Habitus gut ausgebildeter Oktaeder oder Rhombendodekaeder ohne Facettierung wurden in den untersuchten Schwermineralpräparaten nicht angetroffen.

Unter dem REM sind an einigen der facettierten Granate auf einem Teil der Flächen scharf begrenzte Vertiefungen mit einer Kantenlänge von 1 – 3 µm vorhanden (Tafel 6, Bild 1 bis 6), die auf Rhombendodekaederflächen einen rhombischen und auf Würfelflächen einen quadratischen Umriss besitzen. Diese Strukturen treten in der Regel nur auf einzelnen Flächen oder Partien der Granate auf und bedecken die betreffenden Exemplare nie vollständig auf allen umgebenden Flächen. Sie entsprechen den von Simpson (1976) als „pits“ bzw. interpretierend als „etch pits“ (Ätzgrübchen) beschriebenen Strukturen, die er genetisch von den facettierten größeren Flächen unterscheidet. In einigen Fällen wurden an den Zwickauer Granaten Übergänge zu partiell skelettähnlichen Strukturen festgestellt (Tafel 6, Bild 2 und 6).

Etwa 60 % der untersuchten Granatkörner sind völlig klar, ohne sichtbare Inhomogenitäten, Trübungen oder Einschlüsse. Der übrige Teil enthält Einschlüsse unterschiedlicher Art und Größe (Tafel 7). In ca. 2 % der untersuchten Granate lassen sich unzweifelhaft kleine (ca. 0,01 – 0,02 mm) dickprismatische bis rundliche Rutile identifizieren (Tafel 7, Bild 1). Nicht selten treten schwarmweise feinste nadelförmige Einschlüsse auf, sehr wahrscheinlich Rutile einer jüngeren Generation (Tafel 7, Bild 2). Etwa 5 % der Granate enthalten farblose Einschlüsse, bei denen es sich offensichtlich um Quarz handelt (Tafel 7, Bild 3 und 4). Selten sind auch nicht

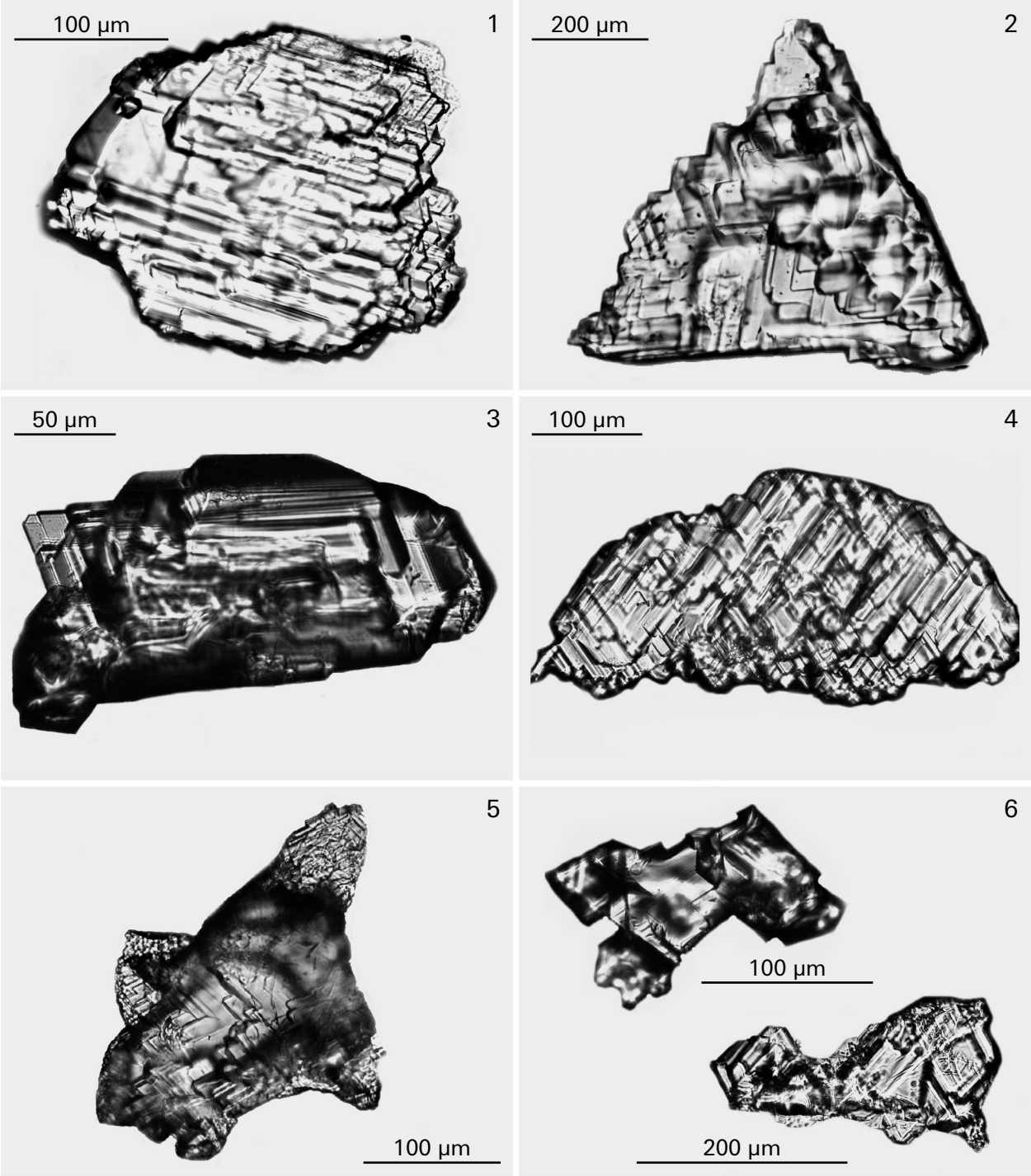


Tafel 1. Schwermineral-Granate in Dünnschliffbildbildern (Nicols parallel). **1**: Facettierte Granatkörner (Gr), umgeben von sekundär entstandenem Porenraum (Por, blau); **2**: Facettierter Granat (Gr), umgeben von sekundär entstandenem Porenraum (Por, blau); **3**: Facettierter Granat (Gr) im sekundären Porenraum zwischen Quarzkörnern (Qu); **4**: Facettierter Granat, umgeben von sekundär entstandenem Porenraum; **5**: Facettiertes Granatkorn (Fragment aus mehreren Teilen, Gr) mit sekundärem Porenraum durch Lösung zwischen Quarzkörnern (Q); **6**: Facettiertes Granatkorn (Gr), Verwachsung mit authigenem Quarz (Qu).

Plate 1. Heavy mineral garnets in thin section images (Nicols parallel). **1**: Faceted garnet grains (Gr) surrounded by secondary pore space (Por, blue); **2**: Faceted garnet (Gr) surrounded by secondary pore space (Por, blue); **3**: Faceted garnet (Gr) in secondary pore space between quartz grains (Qu); **4**: Faceted garnet surrounded by secondary pore space; **5**: Faceted garnet grain (fragment consisting of several parts, Gr) with secondary porosity due to dissolution between quartz grains (Q); **6**: Faceted garnet grain (Gr), intergrowth with authigenic quartz (Qu).

näher bestimmte opake Einschlüsse vorhanden (Tafel 7, Bild 5). Ca. 30 % der untersuchten Granate werden durch feinste nicht identifizierbare Partikel ganz oder partiell unterschiedlich stark getrübt (Tafel 7, Bild 6). Die Einschlüsse sind stets regellos in den Granatkörnern verteilt und markieren keine Andeutung eines Zonarbaus.

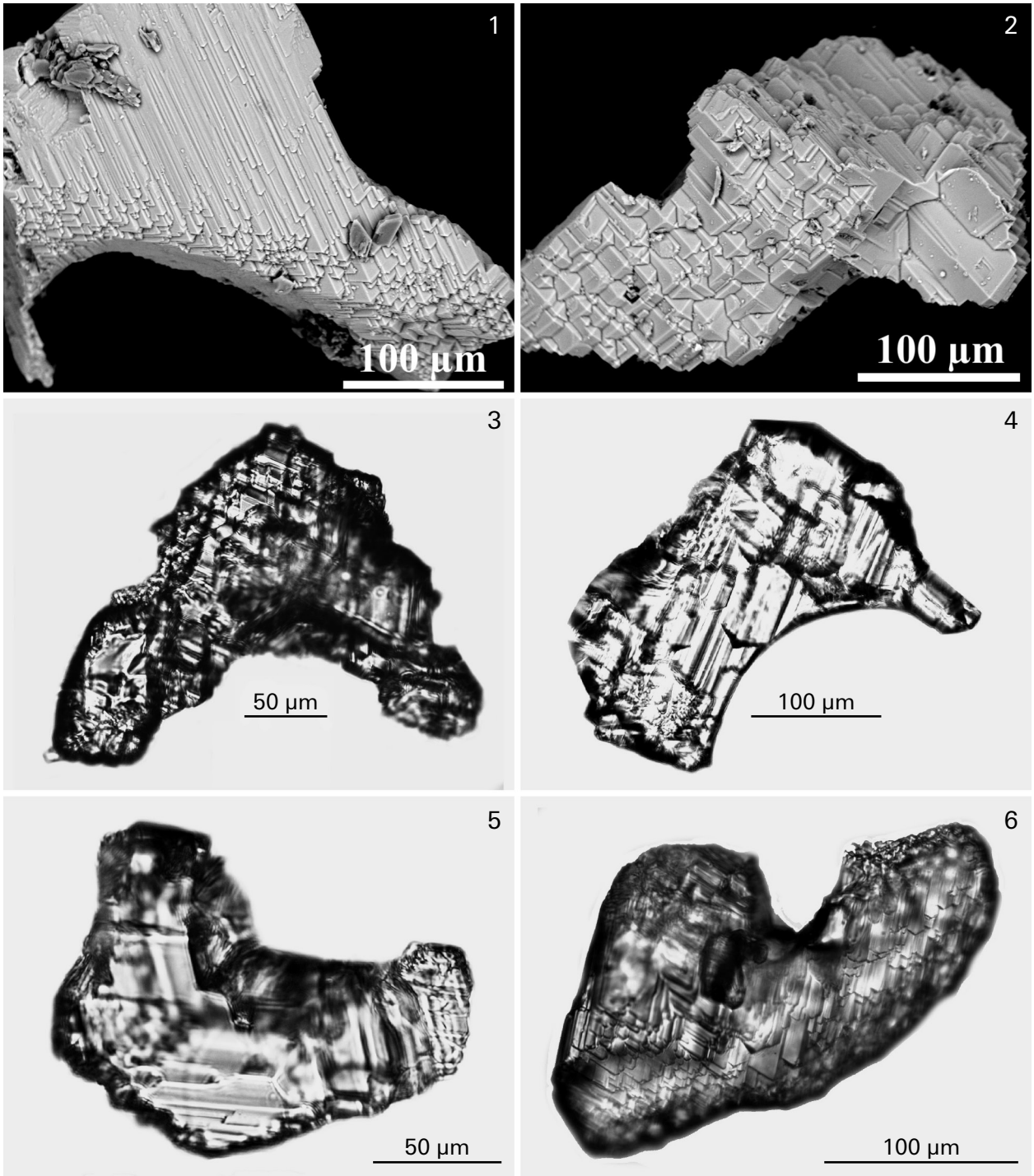
Bemerkenswert sind die in facettierten Oberflächen steckenden Quarzkörnchen (Tafel 7, Bild 3 und 4; Tafel



Tafel 2. Formen facettierter Granatkörner im Polarisationsmikroskop. **1**, **2**: Facettierte Granate mit isometrischer Form; **3**, **4**: Facettierte Granate mit länglicher Form; **5**, **6**: Facettierte Granate mit unregelmäßiger, bizarrer Form.

Plate 2. Shape of faceted garnet grains in polarizing microscope. **1**, **2**: faceted garnets with isometric shape; **3**, **4**: faceted garnets with elongated shape; **5**, **6**: faceted garnets with irregular, bizarre shape.

8, Bild 1 bis 2 und 4 bis 6), seltener auch Rutile (Tafel 8, Bild 2) mit gut ausgebildeten Kristallflächen. Hier wird aus dem Befund nicht ersichtlich, ob es sich um durch Lösungsprozesse freigelegte Einschlüsse handelt. Bei Hohlraumfüllungen mit Schichtsilikaten (z. B. Kaolinit, Tafel 8, Bild 3) ist das wohl ausgeschlossen. Grundsätzlich möglich wäre auch eine diagenetische Neubildungen in Folge von Lösung und erneuter Kristallisation von Teilen der Granatsubstanz. Walderhaug & Porten (2007) haben als mögliche Abbauprodukte der diagenetischen Zersetzung von Almandin-Granaten aus der Schwermineralfraktion Kaolinit, Quarz und Siderit vorgeschlagen. Letzterer dürfte im sauren Milieu der Porenlösungen nicht beständig gewesen sein. Kaolinit und authigener Quarz, die vor allem auch aus der Feldspatzersetzung abzuleiten sind, sind aber im



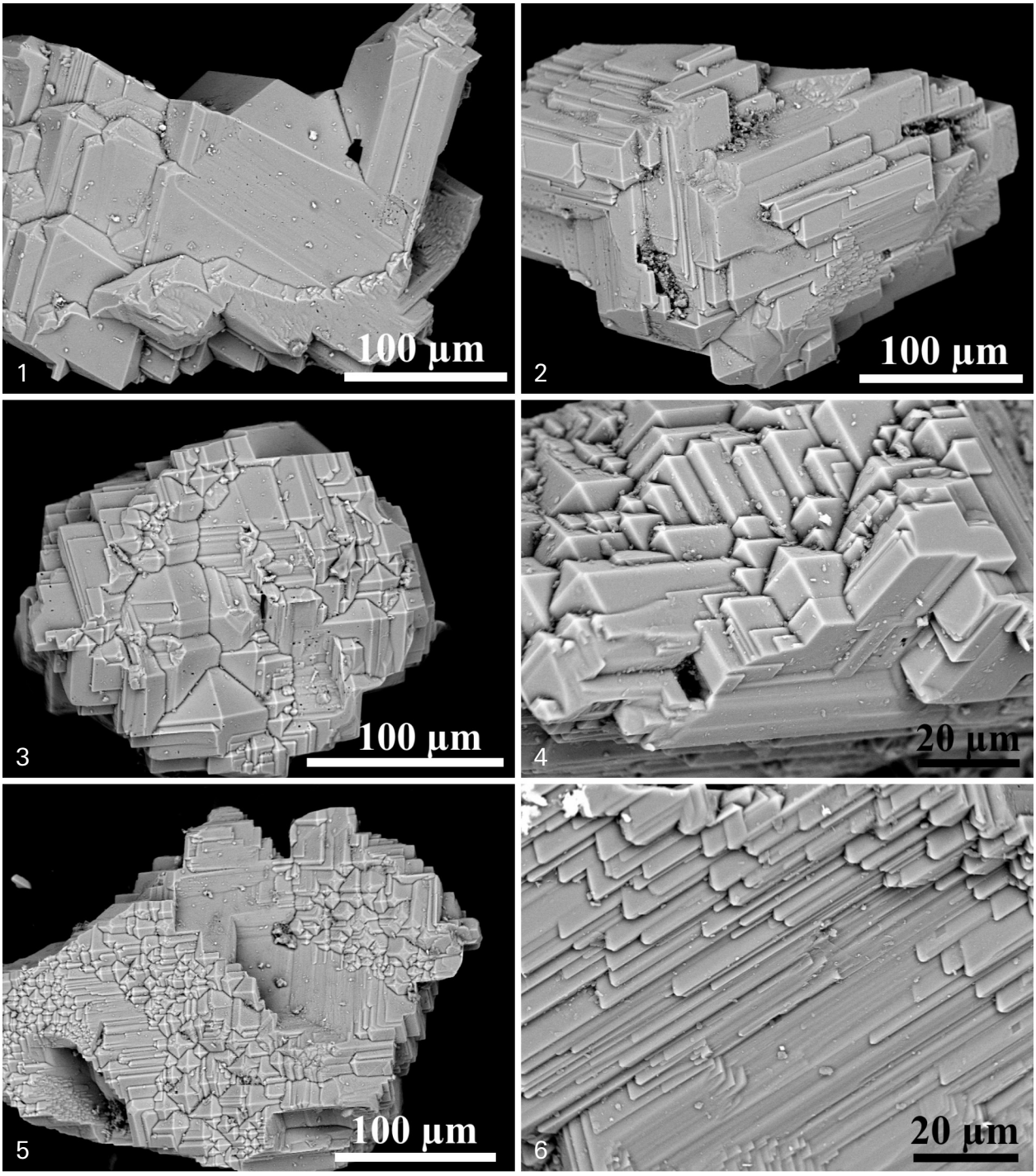
Tafel 3. Facettierte Granate mit konkaven Begrenzungen. **1**, **2**: Facettierte Granatkörner mit konkaven Begrenzungen im REM-Bild; **3**–**6**: Facettierte Granatkörner mit konkaven Begrenzungen unter dem Polarisationsmikroskop.

Plate 3. Faceted garnets with concave boundaries. **1**, **2**: Faceted garnet grains with concave boundaries in SEM images; **3**–**6**: faceted garnet grains with concave boundaries in polarizing microscope.

Zwickauer Sandstein allgegenwärtig. So erscheint eine diagenetische Neubildung von Quarz mit gut ausgebildeten Kristallflächen (Tafel 1, Bild 1) auch als unmittelbares Reaktionsprodukt der Granatzersetzung bzw. zeitgleich mit dieser durch weitere diagenetische Reaktionen möglich, was die mitunter beobachtete Verwachsung facettierter Granate mit authigenen Quarzen erklären würde (Tafel 1, Bild 6).

4.2. Chemische Zusammensetzung der Granate

Punktanalysen durch ESMA wurden an den Oberflächen von 68 Granatkörnern aus Streupräparaten durchgeführt. Die Schwankungsbreite der MgO-, CaO- und besonders der Al_2O_3-Werte zwischen den untersuchten Körnern ist gering. SiO_2 und Fe_2O_3 zeigen eine tendenziell negati-



Tafel 4. Facettierte Granate im rasterelektronenmikroskopischen Bild.

Plate 4. Faceted garnets in scanning electron microscope images.

ve Korrelation der Werte (Abb. 2). Die Einzelanalysen an Kornoberflächen dienten als Grundlage für die Berechnung der molekularen Zusammensetzung von Zwickauer Granaten. Sie sind in Abb. 3 im Diagramm nach Mange & Morton (2007) dargestellt.

Um die Homogenität der einzelnen Körner zu untersuchen, wurden an 10 angeschliffenen Granatkörnern insgesamt 3990 ESMA-Punktanalysen in Form von Linienscans über die Querschnitte ausgeführt. In Abb. 4 sind die Ergebnisse solcher Linienscans beispielhaft für ein untersuchtes Granatkorn dargestellt. Aus den Ergebnissen waren in keinem Fall gesetzmäßige Änderungen des Chemismus von den peripheren zu den zentralen Bereichen der Granate festzustellen.

Aus den Mittelwerten aller Punktanalysen an den 10 Granatanschliffen (Tab. 2) wurde jeweils die mittlere molekulare Zusammensetzung berechnet (Tab. 3). Abb. 5 zeigt die Mittelwerte der Anschliffuntersuchungen ebenfalls im Diagramm nach Mange & Morton (2007). Sie stimmen gut mit den an Oberflächen ermittelten

Zusammensetzungen überein (vgl. Abb. 3). Es handelt sich um Mischkristalle mit deutlicher Dominanz der Almandinkomponente. Der Mittelwert aus allen Anschliffuntersuchungen ergibt 21 % Grossular, 22 % Pyrop, 42 % Almandin und 15 % Spessartin (Tab. 3).

Das Fehlen signifikanter Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Oberflächenmessungen und der Messungen im Korninneren (über den Querschnitt im Anschliff) weist nochmals auf die Homogenität der Körner hin. Bei den vorliegenden Granaten handelt es sich demnach um homogene Mischkristalle, die in Übereinstimmung mit den lichtmikroskopischen Beobachtungen geochemisch keine Hinweise auf durch neugebildete Substanz postsedimentär umwachsene detritische Kerne geben.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt Borg (1986), der auf der Basis von 10 Mikrosonden-Analysen von facettierten Granaten aus der Schwermineralfraktion mit vorherrschender Almandin-Komponente aus der oberen Trias ebenfalls das Fehlen signifikanter Unterschiede im Chemismus zwischen der inneren und der äußeren Zone der Granate feststellte, ebenso wie Morton (1985) an Schwermineral-Granaten aus Jura-Sandsteinen der Nordsee. Der für eine solche Homogenität der Schwermineralgranate im Vergleich zu häufig zonierten Granaten in metamorphen oder magmatischen Herkunftsgesteinen ursächliche Korngrößeneffekt (Morton 1985) wurde bereits in Abschnitt 2 diskutiert.

Morton & Hallsworth (2007) haben verschiedene Arbeiten zur chemischen Zusammensetzung von Schwermineral-Granaten in tief versenkten Sedimenten ausgewertet und stellten fest, dass in größeren Tiefen Ca-arme und Fe-reiche Granate zunehmen, während sich die Mn- und Mg-Gehalte kaum verändern. Sie schlossen daraus auf eine abnehmende Stabilität Ca-reicher Granate mit zunehmender Versenkung, was bereits Milliken & Mack (1990) vermutet haben. Ein selektiver Abbau Ca-reicher Granate könnte auch im untersuchten Fall zum festgestellten, relativ einheitlich Fe-reichen und Ca-armen Chemismus der „überlebenden“ Granatkörner geführt haben.

Die Nutzung der chemischen Zusammensetzung von Schwermineral-Granaten für die Analyse der Herkunftsgesteine bzw. die Diskriminierung der Sedimentherkunft wurde von Morton (1985, 1987) vorgeschlagen und von Mange & Morton (2007) neuerlich zusammenfassend dargestellt. Letztere Arbeit zeigt, dass eine genaue Bestimmung der Herkunftsgesteine problematisch ist, obwohl eine Unterscheidung verschiedener Liefergebiete im Einzelfall möglich ist. So fallen die in dieser Arbeit analysierten Granate (Abb. 3 und 5) in das Feld der Granate vom „Typ C“ nach Mange & Morton (2007). Für diese Fe- und Mn-reichen, relativ Mg- und Ca-armen Granate wird eine Herkunft aus hochgradig metamorphen basischen Gesteinen, aber auch aus Quarz-Biotit-Gneisen für möglich gehalten. Nach Krippner et al. (2014) liegen auch Granate aus Granuliten in diesem Feld. Krippner et al. (2014) haben auf der Basis einer vergleichenden Darstellung von über 3.500 Granatanalysen aus bekannten Gesteinen aus der Literatur nochmals herausgestellt, dass die gegenwärtig zur Verfügung stehenden, in der Literatur benutzten Diagramme zur Analyse der Herkunftsgesteine von Schwermineral-Granaten nicht trennscharf genug sind. Eine weitergehende Aussage zur Herkunft des Sedimentmaterials kann demnach auf der Basis des Chemismus der Schwermineral-Granate nicht getroffen werden. Zudem muss in Betracht gezogen werden, dass sich das vielleicht ursprünglich heterogenere Spektrum chemischer Zusammensetzungen der Granate in der Schwermineralfraktion durch Zerstörung Ca-reicher Varietäten in der Diagenese in Richtung stabilerer, Fe-reicher Varietäten verändert haben könnte (Morton & Hallsworth 2007). Somit bieten auch die oben genannten potenziellen Herkunftsgesteine möglicherweise nur einen unvollständigen Blick auf die Herkunft des Verwitterungsmaterials.

5. Schlussfolgerungen zur Genese der facettierten Granate im Zwickauer Sandstein

Aus den Untersuchungen der Granate im Schwermineralbestand des Zwickauer Sandsteins ergeben sich verschiedene Schlussfolgerungen hinsichtlich ihrer Entstehung, die im Folgenden nochmals zusammenfassend dargestellt werden.

Die scharfkantigen Kristallflächen und z. T. grazilen Formen (Tafeln 2 bis 4) schließen einen präsedimentären Transport der Individuen aus, der mit mechanischer Beanspruchung verbunden gewesen wäre. Da hier Granate in der Korngrößenfraktion zwischen 0,1 und 0,6 mm untersucht wurden, kann auch ein für feine Körnungen denkbarer „schwebender“ Transport (vgl. Müller 1958) der bereits facettierten Granate in den Sedimentationsraum ausgeschlossen werden. Die Entstehung der facettierten Oberflächen muss also im Sediment nach der Ablagerung stattgefunden haben.

Die Substanz der Granate im Zwickauer Kohlesandstein ist in sich völlig homogen. Optische Anomalien (Zonarbau, Doppelbrechung) und Unterschiede im Chemismus zwischen den zentralen und peripheren Bereichen sind nicht nachweisbar. Ein Anwachsen der facettierten Oberflächen an Kerne eines detritischen Altbestandes während der Diagenese kann daher ausgeschlossen werden, weil in diesem Falle eine Zonierung nachweisbar sein sollte. Dass der im Mineralbestand kristalliner Gesteine an Granaten oft nachweisbare Zonarbau in den Schwermineralgranaten nicht abgebildet wird, kann durch die größere Dimension solcher Granatkörner und der entsprechenden Zonierungen im Vergleich zu den Durchmessern der in der Schwermineralfraktion vorliegenden Bruchstücke (vgl. Abb. 1) erklärt werden (Morton 1985).

Die Einbettung der facettierten Granate im Dünnschliff zeigt um die betroffenen Körner herum in der

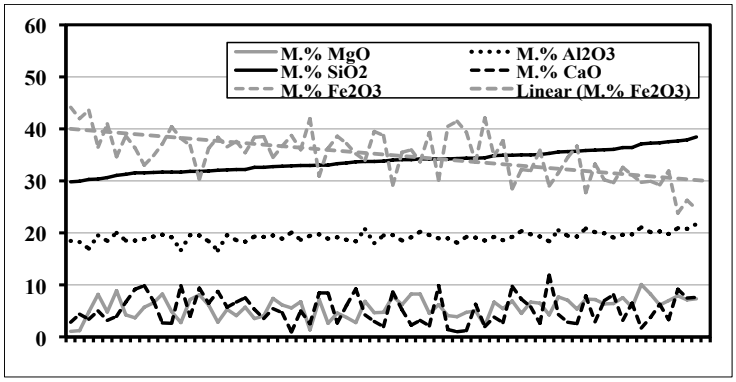


Abb. 2. Schwankungen der Kornoberflächen-Analysenwerte an allen untersuchten Einzelkörnern. Messwerte (n = 68) sortiert nach aufsteigenden SiO_2-Werten, mit Trendlinie für Fe_2O_3.

Fig. 2. Scattering of chemical analyses from the grain surfaces of all investigated single grains. The values (n=68) are presented in the order of increasing SiO_2 contents, with trend line for Fe_2O_3.

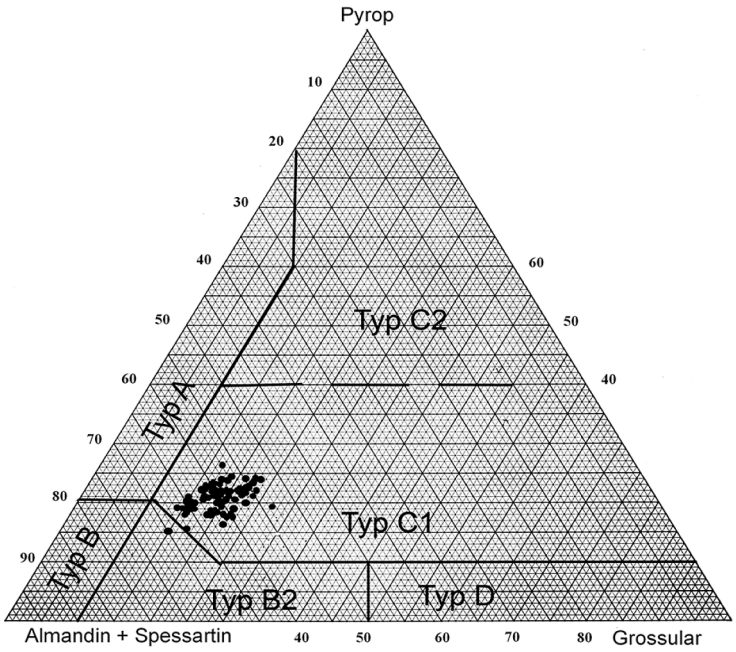
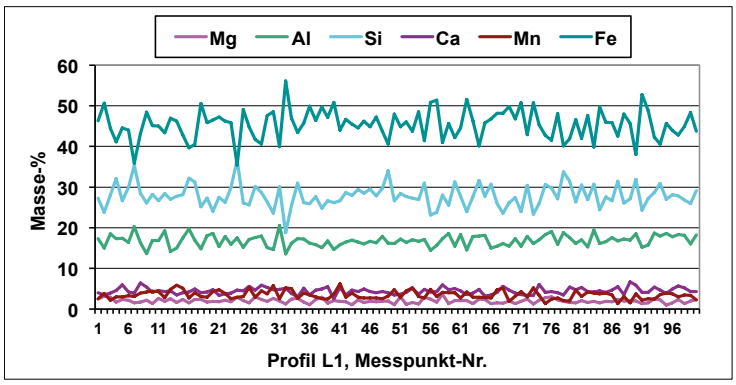
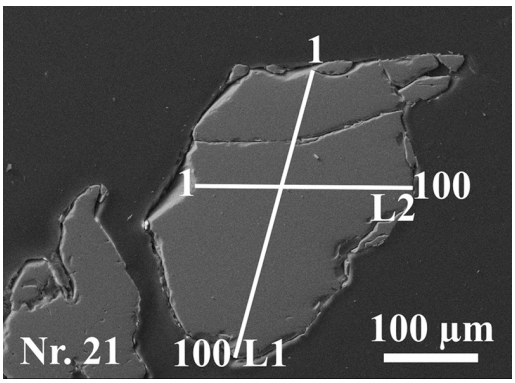


Abb. 3. Zusammensetzung der untersuchten Granate aus Zwickauer Sandstein (berechnet aus ESMA, n=68), dargestellt im Diagramm nach Mange & Morton (2007).

Fig. 3. Composition of investigated single grains of garnets from Zwickau sandstone (calculated from electron probe micro analysis (EPMA); n=68), displayed in diagram after Mange & Morton (2007).





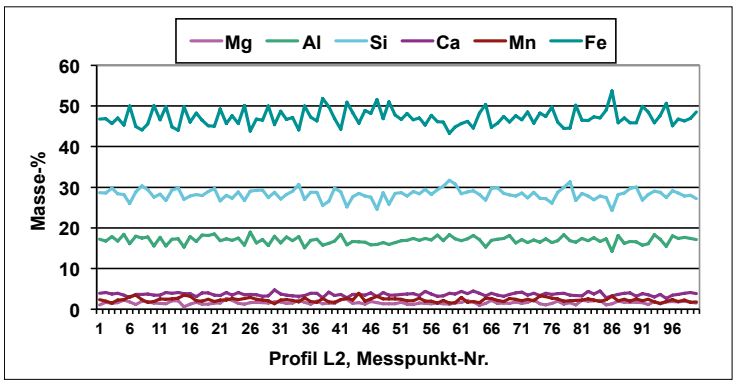


Abb. 4. Profile der Elementverhältnisse über den Querschnitt eines angeschliffenen Granatkorns aus Zwickauer Sandstein (ohne Sauerstoff, Summe aller dargestellten Elemente entspricht 100 %).

Fig. 4. Relation of main elements in profiles across a garnet grain (polished section) from Zwickau sandstone (without oxygen, total of all displayed elements = 100 %).

Tabelle 2. Oxid-Chemismus von Granaten aus Zwickauer Sandstein. Durchschnittswerte in Masse-% (berechnet auf der Basis von ESMA-Analysen der Hauptelemente an Anschliffen von 10 Einzelkörnern; MW = Mittelwert aller Analysen).

Table 2. Oxide chemism of garnets from Zwickau sandstone. Mean values in mass% (calculation based on results of EPMA analyses on polished sections of 10 single grains; MW = mean value of all analyses).

Granat Nr.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	MnO	n =
5469	36,3	18,6	32,6	3,0	7,4	2,1	400
5474	37,9	19,5	28,3	5,4	7,4	1,4	390
5476	38,0	18,7	24,6	5,5	10,9	2,3	500
5477	38,8	20,0	27,1	7,2	5,5	1,4	400
5481	39,0	19,0	28,8	6,2	5,5	1,5	500
5483	36,9	18,5	31,2	4,1	7,1	2,2	400
5484	38,1	19,3	30,6	7,3	2,9	1,7	400
5487	37,8	19,2	27,6	5,3	8,4	1,7	400
5489	38,2	18,8	29,5	7,1	4,3	2,3	400
5493	36,4	18,7	27,6	10,4	5,0	1,9	200
MW	**37,7**	**19,0**	**28,8**	**6,2**	**6,4**	**1,9**	**∑ 3990**

Tabelle 3. Zusammensetzung von 10 Granaten aus Zwickauer Sandstein in Masse-% (berechnet aus den Mittelwerten aus Tab. 3; MW = Mittelwert aller Analysen).

Table 3. Composition of 10 garnets from Zwickau sandstone in mass% (calculated from the mean values given in table 3; MW = mean value of all analyses).

Granat Nr.	Grossular $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	Pyrop $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$	Almandin $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$	Spessartin $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$
5469	21,4	18,7	45,2	14,6
5474	22,0	21,8	41,5	14,7
5476	25,3	21,7	37,6	15,4
5477	20,5	24,0	40,6	15,0
5481	20,2	22,7	42,2	15,0
5483	21,2	19,9	43,9	15,0
5484	17,6	23,7	43,8	15,0
5487	22,9	21,5	40,7	14,9
5489	17,8	21,5	47,5	14,2
5493	19,8	23,0	42,1	15,2
MW	**20,9**	**21,9**	**42,5**	**14,9**

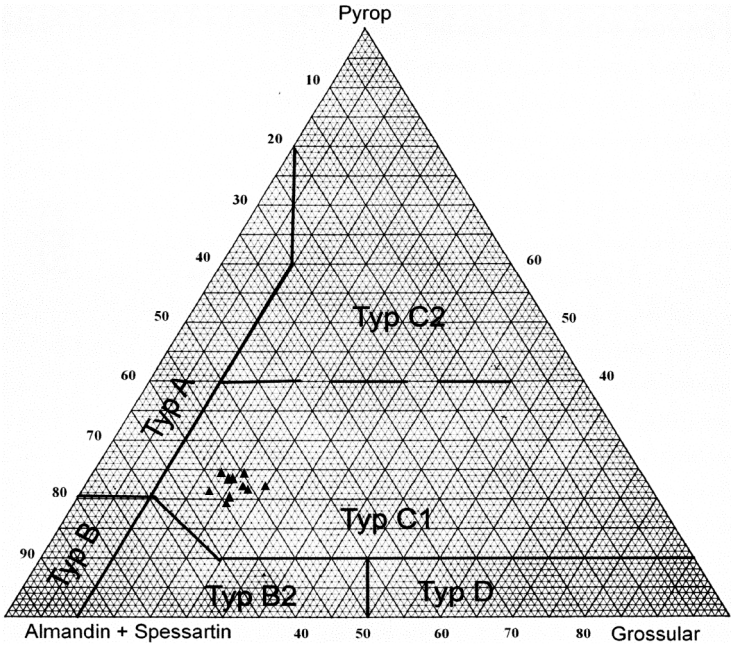
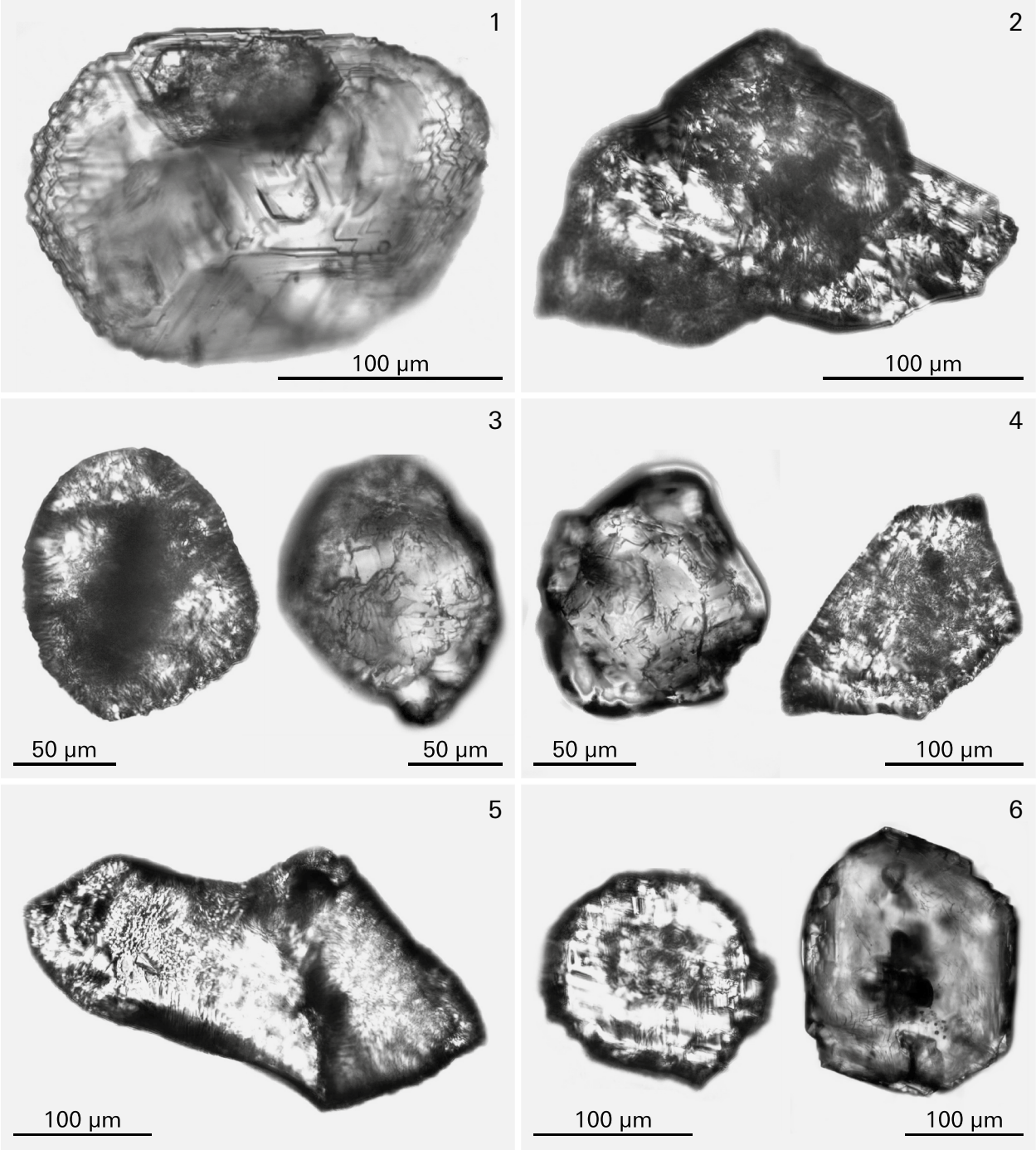


Abb. 5. Durchschnittliche Zusammensetzung der untersuchten Körner in Granatanschliffen (n = 10; vgl. Mittelwerte Tab. 3), dargestellt im Diagramm nach Mange & Morton (2007).

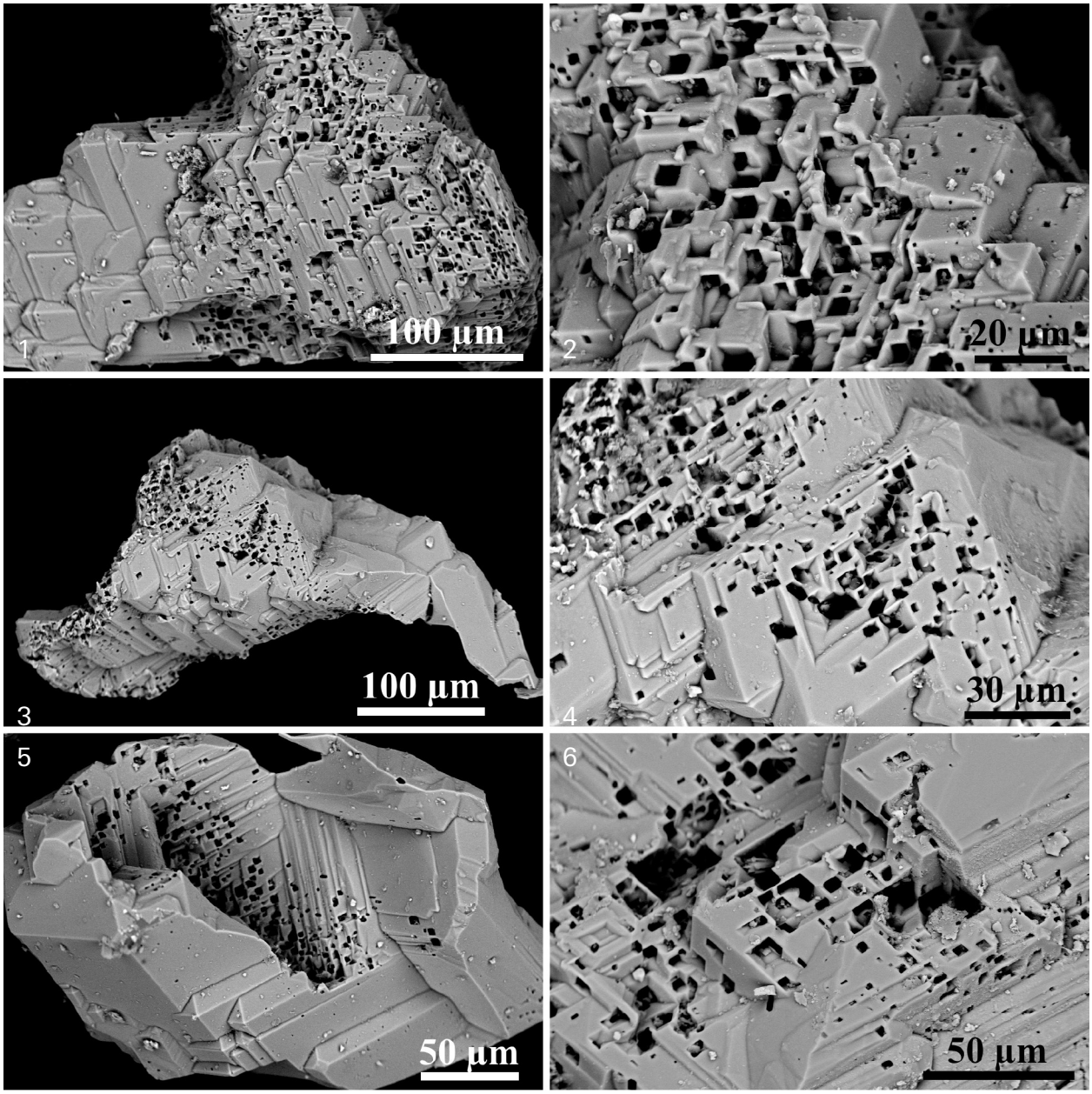
Fig. 5. Average composition of investigated garnet grains in polished sections (n = 10, cf. Mean values in table 3), displayed in diagram after Mange & Morton (2007).



Tafel 5. Detrische Granatkörner.

Plate 5. Detrital garnet grains.

Regel eine Porosität, deren Form auf den Substanzverlust ursprünglich größerer, detritischer Körner zurückgeführt werden kann (vgl. Walderhaug & Porten 2007, Hansley 1987). In den untersuchten Schwermineralpräparaten sind nur äußerst selten (weniger als 0,1 % aller untersuchten Körner) Granate mit Merkmalen (Rundung, Oberflächenstrukturen) vorhanden, die auf eine erhaltene primäre detritische Formgebung hindeuten. Dies lässt darauf schließen, dass die facettierten Oberflächen Lösungs- bzw. Ätzstrukturen darstellen, die in einem fortgeschrittenen Stadium der Diagenese entstanden sind. Darauf weist auch der wenig diverse Bestand an sonstigen Schwermineralen (Turmalin, Rutil, Ilmenit und selten Zirkon) hin. Dieser gefundene Schwermineralbestand ist noch in größeren Versenkungstiefen im Rahmen der Diagenese stabil gegenüber dem Angriff von intrastratalen Lösungen (Walderhaug & Porten 2007, Milliken & Mack 1990, Morton 1987), während detritische Granate – wie bereits in Abschnitt 2 ausgeführt – bei größeren Versenkungstiefen (ab > 1000 – 2000 m) zunehmend von solchen Lösungen angegriffen werden und die entsprechend facettierten Oberflächenstrukturen zeigen (Morton



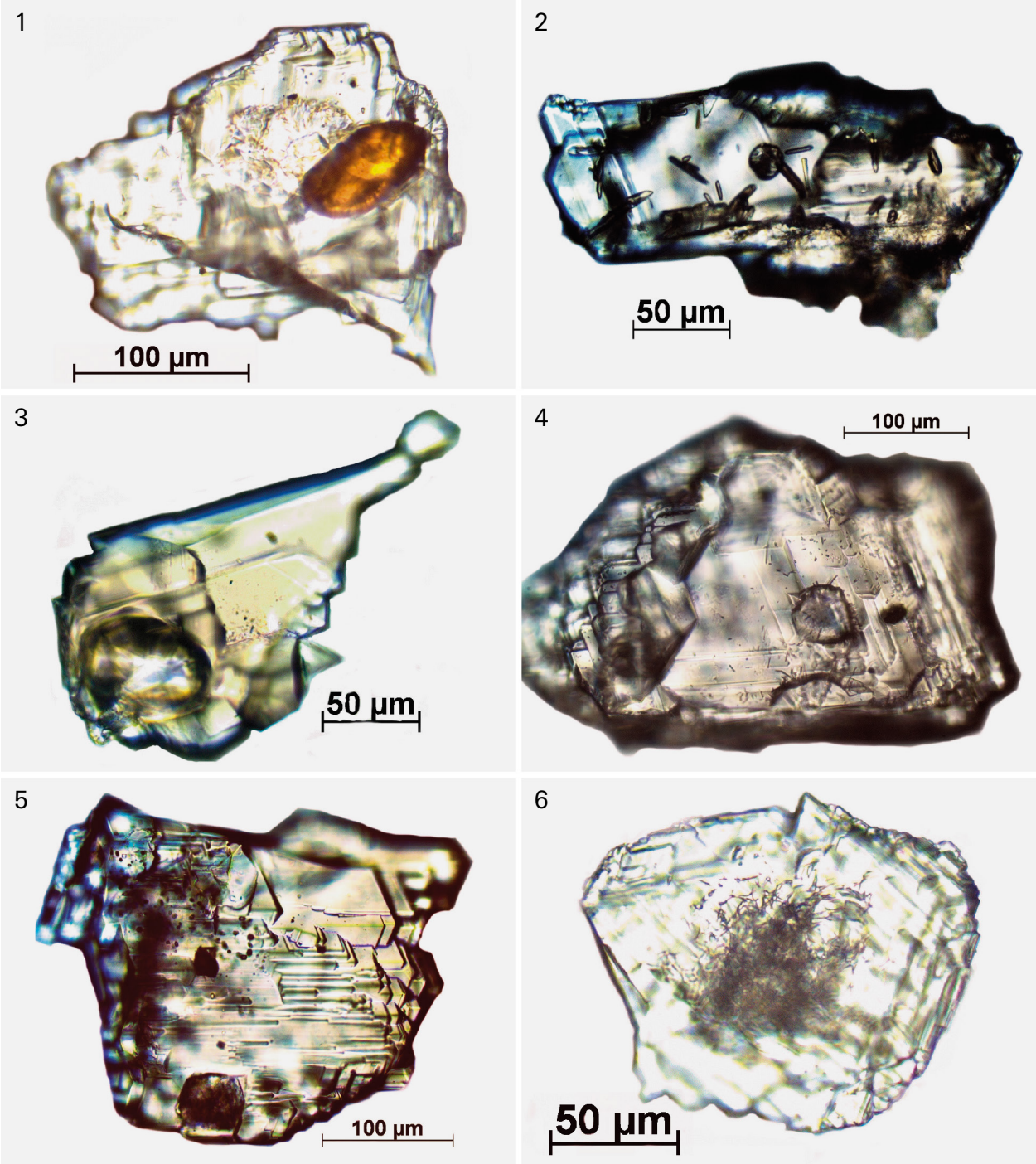
Tafel 6. Oberflächen facettierter Granate mit Ätzgrübchen in REM-Bildern. 1: Facettierte Oberflächen mit Ätzgrübchen; **2**: vergrößerter Ausschnitt aus Bild 1; **3**: facettierte Oberflächen mit Ätzgrübchen; **4**: vergrößerter Ausschnitt aus Bild 3; **5**: facettierte Oberflächen mit Ätzgrübchen; **6**: facettierte Oberflächen mit Ätzgrübchen.

Plate 6. Surfaces of faceted garnets with etch pits in SEM images. 1: Faceted surfaces with etch pits; **2**: Enlarged detail from Fig. 1; **3**: faceted surfaces with etch pits; **4**: enlarged detail from Fig. 3; **5**: faceted surfaces with etch pits; **6**: faceted surfaces with etch pits.

et al. 1989, Walderhaug & Porten 2007, Morton & Hallsworth 2007).

Hansley (1987) hat am Beispiel jurassischer fluviatiler Sandsteine aus New Mexico gezeigt, dass thermisch zersetzte organische Substanz durch die Freisetzung von organischen Säuren die nötigen stofflichen Voraussetzungen für die Bildung facettierter Almandin-Spessartin-Granate durch Ätzung liefern kann. Experimentell gelang mit Dicarboxylsäure die Erzeugung von Ätzstrukturen, die denen der natürlich facettierten Granate sehr ähnlich waren. In den Dünnschliffen des Zwickauer Sandsteins wurden Reste organischer Substanz in den Porenräumen in unmittelbarer Nähe der facettierten Granate gefunden (Tafel 1). Makroskopisch ist organische Substanz in den Kohlelagen und -schmitzen im Sandstein verbreitet. Entsprechende saure Lösungen sind für den Zwickauer Sandstein somit zwanglos herleitbar. Hansley (1987) gibt für die jurassischen Sandsteine der Morrison-Formation in New Mexico mit facettierten Granaten geschätzten Versenkungstiefen von 2000 m mit Temperaturen zwischen 65 und 79 °C an, vermutet jedoch zusätzlich den Einfluss von heißen Tiefenwässern (bis ca. 130 °C).

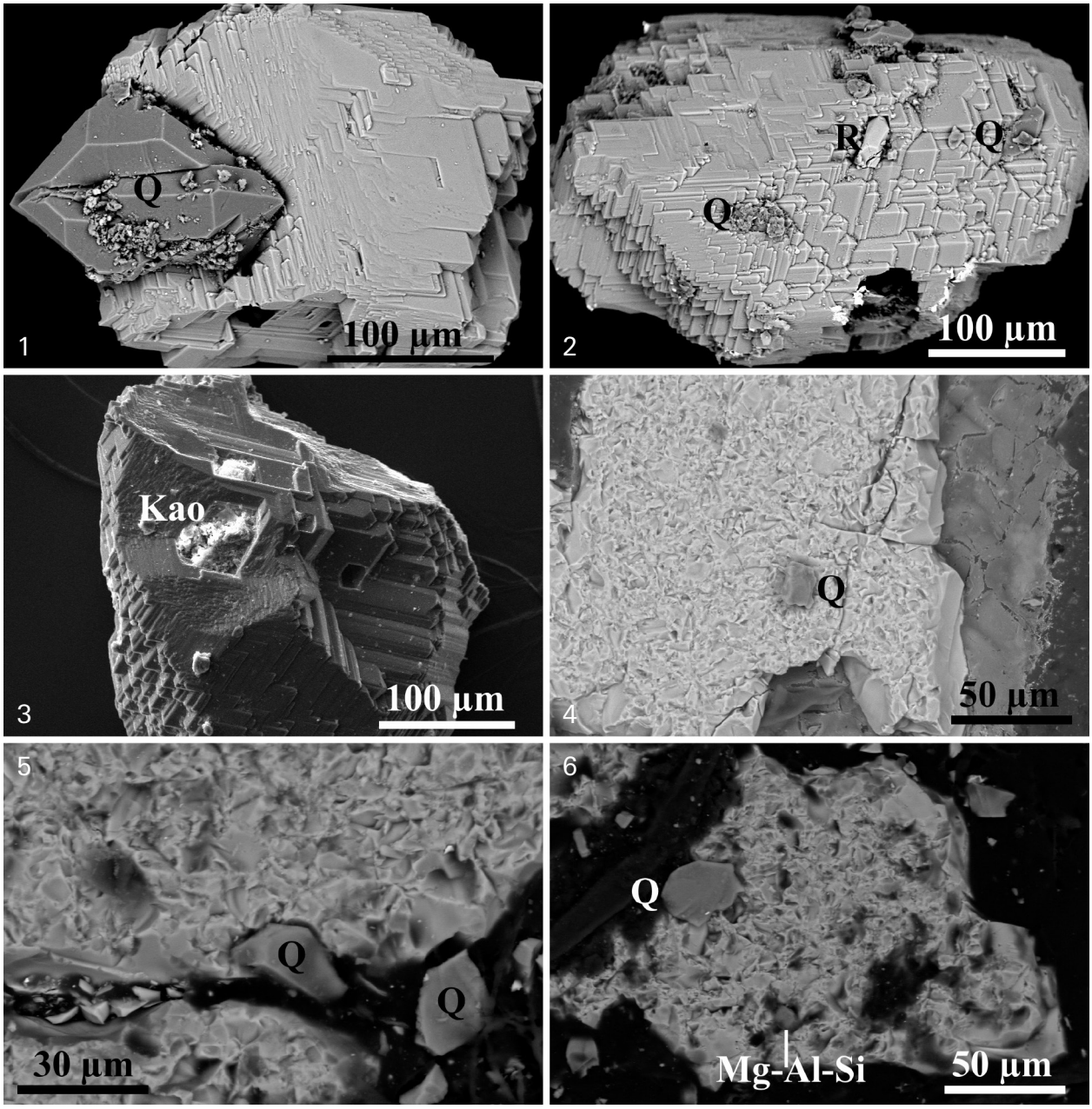
Verwachsungen von Granatkörnern mit teilweise oder vollständig von Kristallflächen umgebenen Quarzen im Zwickauer Sandstein können im Fall kleinerer, voll-



Tafel 7. Einschlüsse im Polarisationsmikroskop. 1, **2**: Rutil-Einschluss in Granatkorn; **3**, **4**: Quarz-Einschluss in Granatkorn; **5**: opake Einschlüsse in Granatkorn; **6**: Mikropartikel als Einschlüsse im Granat.

Plate 7. Inclusions in polarizing microscope. 1, **2**: Rutile inclusion in garnet grain; **3**, **4**: Quartz inclusion in garnet grain; **5:** opaque inclusions in garnet grain; **6** micro particles as inclusions in garnet.

ständig umschlossener Quarzkörner (Tafel 8, Bilder 2, 4, 5 und 6) als durch Ätzung freigelegte Einschlüsse in den Granatkörnern des detritischen Altbestandes angesehen werden. Größere mit facettierten Granaten verwachsene Quarzkörner sind auch als authigene Neubildungen während des Granatabbaus interpretierbar (Tafel 8, Bild 1). Eine sichere genetische Deutung der Verwachsungsverhältnisse ist vielfach nicht möglich. Quarzneubildung ist eine Begleiterscheinung der fortgeschrittenen Diagenese (u. a. Walderhaug & Porten 2007). Das SiO_2 für die Neubildung der auf den angeätzten Granatoberflächen bzw. in Vertiefungen derselben vorgefundenen Quarzkristalle könnte sowohl direkt aus den bei der Granatzersetzung freiwerdenden Abbauprodukten (Walderhaug & Porten 2007) als auch aus anderen Mineralreaktionen stammen, bei denen Kieselsäure frei wird (z. B. aus dem Abbau von Feldspäten). Im Falle einer diagenetischen Neubildung müssen die Quarzkristalle



Tafel 8. Einschlüsse/Kornverwachsungen. 1: Idiomorphes Quarzkorn (Q) verwachsen mit facettiertem Granatkorn; **2**: facettiertes Granatkorn mit Einschlüssen von Quarz (Q) und Rutil (R); **3**: facettiertes Granatkorn mit Kaolinit (Kao); **4**: Quarzeinschluss (Q) in Granatkorn (Anschliff); **5**: Quarzeinschlüsse(Q) in Granatkorn (Anschliff); **6**: Quarzeinschluss (Q) und nicht identifizierte Mg-Al-Si-Phase in Granatkorn (Anschliff).

Plate 8. Inclusions/intergrowth. 1: Idiomorphic quartz grain (Q) intergrown with faceted garnet grain; **2**: Faceted garnet grain with inclusions of quartz (Q) and rutile (R); **3**: Facetted garnet grain wit kaolinite (Kao); **4**: Quartz inclusion (Q) in garnet grain (polished section); **5**: Quartz inclusions (Q) in garnet grain (polished section); **6**: Quarz inclusion (Q) and not identified Mg-Al-Si phase in garnet grain (polished section).

± zeitgleich zu den Abbauprozessen in die entstehenden Hohlräume hineingewachsen sein (Tafel 1, Bild 6).

Konkave Kornformen an facettierten Granatkörnern mit ± ebenen Flächen, wie in Tafel 3, Bild 1 und 4 gezeigt, könnten dagegen als ehemalige Kontaktflächen zu benachbarten Quarz- oder anderen Mineralkörnern angesehen werden, die von den aggressiven Lösungen nicht erreicht worden sind. Konvex-konkave Kornkontakte mit konkaven Ausbuchtungen im Granatkorn setzen Drucklösungsvorgänge an dessen Korngrenze voraus, die vor oder während der Ätzung der übrigen Oberflächen stattgefunden haben sollten. Für eine mindestens teilweise Ausbildung solcher Kornkontakte vor der Ätzung spricht der Befund in Tafel 1, Bild 3, der die (in diesem Falle konvexe) Form des angeätzten, reliktischen detritischen Granatkorns zwischen zwei Quarzkörnern mit konkaven Oberflächen zeigt. Beurteilt man nur die Kornform separierter Einzel-Granatkörner, ohne den Kornverband zu berücksichtigen, könnten die konkaven Kornbegrenzungen auch als Ergebnis eines be-

hinderten authigenen Wachstums interpretiert werden (Umwachsung detritischer Quarzkörner). Eine Lösung von Granatsubstanz, Verlagerung über kurze Distanz und Wiederausfällung an einer anderen Oberfläche des Korns erscheint bei wechselnden pH-Verhältnissen im Sediment grundsätzlich nicht völlig ausgeschlossen, kann aber auch nicht bewiesen werden.

Für die Zwickauer Sandsteine werden von Hoth et al. (2008) für den gesamten Komplex der Marienthal-Pöhlauer Schichten Bedingungen der Diagenese mit Temperaturen < 200 °C angenommen, denen das Vorkommen veränderter detritischer Schwermineral-Granate mit angeätzten, facettierten Flächen entspricht (Walderhaug & Porten 2007, Morton 1985). Die bekannten thermischen Rahmenbedingungen der diagenetischen Veränderungen in den Oberkarbon-Sedimenten von Zwickau sind komplex; so geben beispielsweise die Ergebnisse der Vitrinit-Reflexionen an inkohlter Substanz ein teilweise widersprüchliches Bild. Eine begrenzte Wärmezufuhr durch den nahen, spätvariszischen Eibenstocker Granit ist neben Einflüssen der Versenkungsdiagenese sehr wahrscheinlich (Hoth et al. 2008). Zudem könnte der hohe Gehalt von organischer Substanz in den Sedimenten eine mögliche Freisetzung von organischen Säuren bereits bei Temperaturen unter 100 °C (Hansley 1987) begünstigt haben. Eine genauere Temperaturabschätzung für die Diagenese der Zwickauer Sandsteine durch den Vergleich mit anderen Vorkommen facettierter Granate, zu denen Aussagen über herrschende Temperaturbedingungen vorliegen (z. B. Walderhaug & Porten 2007), erscheint aus diesen Gründen problematisch und kann aus den vorliegenden Untersuchungen nicht abgeleitet werden.

Die in der Dimension von den Facetten deutlich unterscheidbaren Grübchen auf den Facettenflächen einiger untersuchter Granatkörner werden, Simpson (1976) folgend, als „etch pits“ von den Facetten unterschieden. Sie könnten Ätzfiguren einer zweiten Generation darstellen, wie dies von Velbel et al. (2007) für Strukturen ähnlicher Dimension, die sie der Verwitterung zuordnen, auf facettierten Schwermineral-Granaten in Böden postuliert wurde. Ob die „etch pits“ der Zwickauer Granate, die jedenfalls jünger als die facettierten Oberflächen sind, als Erscheinung einer weiter fortgeschrittenen Diagenese oder als postdiagenetische, möglicherweise erst nach der Heraushebung der Sandsteine in Oberflächennähe entstandene Strukturen interpretiert werden dürfen, muss hier offen bleiben. Grundsätzlich scheint jedoch auch ein Zirkulieren oberflächennaher saurer Wässer in den porösen Sandsteinen als Ursache für diese weniger tiefen und unvollständigen Ätzstrukturen denkbar.

6. Danksagung

Die Autoren danken den Senckenberg Naturhistorischen Sammlungen Dresden, Museum für Mineralogie und Geologie für die Möglichkeit, Untersuchungen am REM/ESMA-System der Einrichtung durchzuführen.

7. Literatur

Beljankin, D.S. & Petrow, P. (1939): Hibschite in Georgia. – Berichte der Akad. der Wissenschaften der UdSSR, **24**: 351.

Beveridge, A. (1960): Heavy Minerals in Lower Tertiary Formation in the Santa Cruz Mountains, California. – J. Sed. Petrol., **30**: 513 – 537.

Borg, G. (1986): Facetted garnets formed by etching. Examples from sandstones of Late Triassic age, South Germany. – Sedimentology, **33**: 141 – 146.

Bramlette, M.N. (1929): Natural etching of detrital garnets. – Amer. Miner., **14**: 336 – 337.

Hansley, P.L. (1987): Petrologic and experimental evidence for the etching of garnets by organic acids in the Upper Jurassic Morrison Formation, northwestern New Mexico. – J. Sed. Petrol., **57**: 666 – 681.

Häusser, I.; Kurze, M. (1975): Sedimentationsbedingungen und Schwermineralführung im Mesozoikum des Nordteils der DDR. – Z. geol. Wiss., **3**(10): 1317 – 1332.

Hemingway, J.E.; Tamar-Agha, M.Y. (1975): The effects of diagenesis on some heavy minerals from the sandstones of the middle limestone group in Northumberland. – Proc. Yorkshire Geol. Soc., **40**: 537 – 545.

Hoth, K., Brause, H.; Döring, H.; Kahlert, E.; Schultka, S.; Volkmann, N.; Berger, H.-J.; Adam, C.; Felix, M.; Wünsche, M. (2008): Die Steinkohlenlagerstätte Zwickau. – Bergbau in Sachsen, **15**: 1 – 160.

Kalkowsky, E. (1921): Mikroskopischer Coelestin im Röt von Jena als geologische Erscheinung. – Z. dt. Geol. Ges., **73**: 1 – 23.

Krippner, A.; Meinhold, G.; Morton, A.C.; von Eynatten, H. (2014): Evaluation of garnet discrimination diagrams using geochemical data of garnets derived from various host rocks. – Sed. Geol., **306**: 36 – 52.

Langbein, R. (1965): Zur Problematik der Granatführung im Buntsandstein Thüringens. – Geologie, **14**(8): 958 – 968.

Mange, M.; Morton, A.C. (2007): Geochemistry of heavy minerals. – Developments in Sedimentology, **58**: 345 – 392.

Maurer, H. (1982): Oberflächentexturen an Schwermineralkörnern aus der unteren Süsswassermolasse (Chattien) der Westschweiz. – Eclogae geol. Helv., **75**(1): 23 – 31.

Meagher, E.P. (1982): Silicate Garnets. – Reviews in Mineralogy, **5**: 25 – 57.

Milliken, K.L.; Mack, L.E. (1990): Subsurface dissolution of heavy minerals, Frio Formation sandstones of the ancestral Rio Grande Province, South Texas. – Sed. Geol., **68**:187 – 199.

Morton, A.C. (1985): A new approach to provenance studies: electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the North Sea. – Sedimentology **32**: 553 – 566.

Morton, A.C. (1987): Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the paleocene Forties Sandstone, Central North Sea. – J. Sed. Petrol., **57**: 1027 – 1032.

Morton, A.C., Borg, G., Hansley, P.L.; Haughton, P.D.W.; Krinsley, D.H.; Trusty, P. (1989): The origin of faceted garnets in sandstones: dissolution or overgrowth? – Sedimentology, **36**: 927 – 942.

Morton, A.C.; Hallsworth, C. (2007): Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. – Developments in Sedimentology **58**: 215 – 245.

Müller, H. (1958): Die Petrographie der Röt-Muschelkalkgrenzschichten bei Steudnitz nördlich Jena. – Chemie der Erde, **19**: 393 – 435.

Pustowaloff, L.W. (1955): Über sekundäre Veränderungen der Sedimentgesteine. – Geol. Rdsch., **43**: 535 – 550.

Rahmani, R.A. (1973): Grain surface etching features of some heavy minerals. – J. Sed. Petrol., **43**: 882 – 888.

Rinne, F.; Kulaszewski, L. (1925): Natürliche und künstliche Lösungskörper von Granat. – Tschermaks Min. Petr. Mitt., **38**: 376 – 381.

Roth, W. (1976): Stratigraphische, lithofazielle und paläotektonische Untersuchungen im Buntsandstein (Nordhausen- bis Solling-Folge) des Subherzynen Beckens. – Freiberger Forschungshefte, **C316**: 9 – 30.

Salvino, J.F.; Velbel, M.A. (1989): Faceted garnets from sandstones of the Munising Formation (Cambrian), northern Michigan: petrographic evidence for their origin by intrastratal dissolution. – Sedimentology, **36**: 371 – 379.

Sauer, A. (1900): Granat als authigenes Gemengteil im Bunten Keuper. – Berichte des oberrhein. Geol. Vereins, **33**: 42 – 46.

Schumacher, R.; Rötzler, K.; Maresch, W. V. (1999): Subtle oscillatory zoning in garnet from regional metamorphic phyllites and mica schists, Western Erzgebirge, Germany. – The Canadian Mineralogist, **37**: 381 – 402.

Siedel, H.; Kutschke, D. (2017): Zwickauer Kohlesandstein als Baugestein: Eigenschaften und historische Verwendung. – Geologica Saxonica, **63**: 103 – 119.

Simpson, G.S. (1976): Evidence of overgrowths on, and solution of, detrital garnets. – J. Sed. Petrol., **46**: 689 – 693.

Smale, D. (2007): Sediment trails in tectonically active islands: Heavy minerals use in New Zealand. – Developments in Sedimentology, **58**: 569 – 585.

Velbel, A.M.; McGuire, J.T.; Madden, A.S. (2007): Scanning electron microscopy of garnet from southern Michigan soils: Etching rates and inheritance of pre-glacial and pre-pedogenic grain-surface textures. – Developments in Sedimentology, **58**: 413 – 432.

Walderhaug, O. & Porten, K. W. (2007): Stability of detrital heavy minerals on the Norwegian continental shelf as a function of depth and temperature. – J. Sed. Research, **77**: 992 – 1002.