

ZINKBLENDE-VERERZUNGEN IN MARMOREN DER „BUNTEN SERIE“, BÖHMISCHE MASSE, NIEDERÖSTERREICH

Bernhard Kurz, Anton Beran* & Michael A. Göttinger

Institut für Mineralogie und Kristallographie, Universität Wien, Althanstraße 14, 1090 Wien

*email: anton.beran@univie.ac.at

Abstract

Dolomite-bearing calcite marbles and pure dolomite-marbles, overlain by amphibolite, show a striking sphalerite mineralization, occurring in quarries near *Kochholz* in ‘Dunkelsteinerwald’ and near *Lichtenau* and *Winkl* in ‘Waldviertel’. The locations belong to the “Variegated Sequence” (“Bunte Serie”) of the Bohemian Massif. Sphalerite is the only ore mineral in *Kochholz*, in *Lichtenau* also pyrite occurs in essential amounts and in *Winkl* sphalerite forms a paragenesis with galena. In all three localities, the sphalerites are characterized by high Ga-contents (54/229/104 ppm) and low Ge-contents (4/2/1 ppm). Based on the Ga/Ge ratio, which is used for a genetic characterization, sphalerite could best be assigned to the SEDEX-type. The “Variegated Sequence” is generally regarded as the metamorphic product of an epicontinental association of argillaceous to calcareous sedimentary rocks with intercalations of basic volcanic components. The high Mg-content of the marbles is indicative for a former evaporitic environment; the graphite content of the marbles indicates the presence of originally sapropelic rocks. The amphibolites as former tholeiitic basalts agrees with the assignment of the sphalerite mineralization to the volcano-sedimentary (SEDEX-) type. The trace element distribution also shows a partial coincidence with sphalerites from hydrothermal vein deposits. This could be explained by large-scale hydrothermal leaching processes of the originally Al-rich sedimentary rocks, which resulted in the unusually high Ga-contents of the sphalerites. The formation of coarse-grained sphalerite-crystals, by partial maintenance of primary sedimentary structures, is due to the first amphibolite-facies metamorphism. Sphalerite-crystals, broken by tectonic events and healed by calcite are a result of the later greenschist metamorphism.

Zusammenfassung

Dolomitische Calcit-Marmore sowie reine Dolomit-Marmore im Verband mit Amphiboliten zeigen in Steinbrüchen bei *Kochholz* im Dunkelsteinerwald sowie im Waldviertel bei *Lichtenau* und bei *Winkl* auffallende Zinkblende-Vererzungen. Die Vorkommen liegen innerhalb der „Bunten Serie“ in der Böhmisches Masse. In *Kochholz* ist die Zinkblende das praktisch einzige Erzmineral, in *Lichtenau* tritt neben Zinkblende Pyrit auf, in *Winkl* ist es neben Zinkblende Bleiglanz. In allen drei Vorkommen sind die Zinkblendungen durch relativ hohe Ga-Gehalte (54/229/104

ppm), bei niedrigen Ge-Gehalten (4/2/1 ppm) charakterisiert. Nach dem Ga/Ge-Verhältnis, das zur genetischen Charakterisierung herangezogen wird, können die Zinkblenden dem SEDEX-Typ zugeordnet werden. Wie allgemein angenommen, leiten sich die metamorphen Gesteine der „Bunten Serie“ von einer epikontinentalen, sandig-tonigen bis karbonatischen Sedimentfolge mit Einschaltungen basischer Vulkanite ab. Der hohe Mg-Gehalt der Marmore weist auf ein ehemals evaporitisches Milieu hin; der Graphit-Gehalt liefert den Hinweis auf ursprünglich vorhandene Sapropel. Die Amphibolite als ehemalige tholeiitische Basalte stehen in Übereinstimmung mit der Zuordnung der Vererzung zum vulkano-sedimentären (SEDEX-) Typ. Die Verteilung der Spurenelemente zeigt auch eine teilweise Übereinstimmung mit Zinkblenden aus hydrothermalen Ganglagerstätten. Dies ist als Hinweis auf weitreichende hydrothermale Auslaugungs-Prozesse der ursprünglich sandig-tonigen (Al-reichen) Sedimente zu verstehen, die für den ungewöhnlich hohen Ga-Gehalt der Zinkblenden verantwortlich sind. Die Ausbildung grobkörniger Zinkblenden unter teilweiser Beibehaltung eines primär-sedimentär angelegten Gefüges ist auf die erste Amphibolit-fazielle Überprägung zurückzuführen. Tektonisch zerbrochene Zinkblende-Kristalle mit Calcit-verheilten Bruchlinien sind das Ergebnis der späteren Grünschiefer-faziellen Metamorphose.

Einleitung

Die „Bunte Serie“ als ein Teil der Böhmisches Masse leitet ihren Namen von einer Vielzahl an Gesteinsarten ab, die auf engem Raum miteinander auftreten und die durch eine Vielfalt von Mineralen gekennzeichnet sind. Die Vorkommen von Erzmineralen sind jedoch verhältnismäßig selten und haben auch nie wirtschaftliches Interesse erlangt (siehe WEBER et al., 1997). Allerdings sind die zahlreichen Graphitschiefer-Vorkommen erwähnenswert, deren hohe Pyrit-Gehalte monomineralische Gesteinspartien im dm-Bereich aufbauen können.

Als mineralogische Besonderheit kann die von KNOBLOCH (2004) beschriebene Zinkblende-Vererzung im Marmor von *Kochholz* im Dunkelsteinerwald gesehen werden. Auch nördlich der Donau wurden zwei Buntmetall-Vererzungen mit Zinkblende-Dominanz in Marmoren bekannt, nämlich eine bei *Lichtenau* und eine bei *Winkl* (BRANDSTÄTTER & NIEDERMAYR, 2005, KURZ & GÖTZINGER, 2005). Alle drei Vorkommen befinden sich geologisch gesehen innerhalb der „Bunten Serie“ (Drosendorf-Formation). Aus historischen Quellen sind Stollen auf Silber-haltige Bleierz in Marmoren im Raum von Primmersdorf bekannt. Eine dahingehende Nachschau auf Erze blieb jedoch ohne Erfolg (ROETZEL & FUCHS, 2008). Ziel der vorliegenden Arbeit ist es nun die Zinkblende-Vererzungen in ihrem geologischen Rahmen mineralogisch zu beschreiben und ein Modell ihrer Entstehungsgeschichte zu entwickeln.

Geographischer Überblick

Kochholz liegt etwa auf halbem Weg zwischen Melk und Spitz, südöstlich der Donau im Dunkelsteinerwald, ca. 5 km von Aggsbach-Dorf entfernt. Der Fundpunkt ist ein verwachsener Steinbruch zwischen den Orten *Kochholz* und Im Liagl, etwa 400 m südlich des Ortszentrums von *Kochholz*, und liegt bei einer geographischen

Länge von 15°27'02" und einer Breite von 48°15'58" (siehe ÖK 1:50.000, www.austrianmap.at). Die beiden anderen Vorkommen, nördlich der Donau im Waldviertel, befinden sich in aktiv betriebenen Steinbrüchen. *Lichtenau* ist ca. 10 km westlich von Gföhl entfernt, die Ortschaft *Winkl* ca. 15 km westlich von Horn. Etwa 1300 m südöstlich des Ortszentrums von *Lichtenau* liegt der Fundpunkt im Steinbruch der ‚Firma Malaschofsky‘ bei einer geographischen Länge von 15°24'11" und einer Breite von 48°29'22". Etwa 800 m südöstlich des Ortszentrums von *Winkl* findet sich der Fundpunkt im Steinbruch der ‚Heeresforstverwaltung Allentsteig‘ bei einer geographischen Länge von 15°29'06" und einer Breite von 48°39'54".

Geologischer Überblick

F.E. SÜSS (1903) führte die Gliederung der Böhmisches Masse in ein hoch-metamorphes Moldanubikum, und ein östlich davon gelegenes, niedriger metamorphes Moravikum ein, wobei das Moldanubikum auf das Moravikum aufgeschoben wurde („moldanubische Überschiebung“). Beide Einheiten schließen östlich an den Südböhmischen Pluton an.

Die folgende Übersicht über den inneren Aufbau des Moravikums und des Moldanubikums orientiert sich in wesentlichen Punkten an dem von MATURA (2003) entwickelten Modell (vgl. auch FUCHS & MATURA, 1980), in dem das Waldviertel-Kristallin in einen West- und einen Ostflügel der Waldviertelmulde unterteilt wird, die im Hangenden durch gemeinsame Einheiten verbunden sind (Abb. 1 und Abb. 2). Von Ost nach West, setzt sich das Moravikum aus Thaya-Pluton und Therasburg-Formation im Liegenden und der Pleissing- sowie der Biteš-Einheit im Hangenden zusammen. Das Moldanubikum setzt sich aus der anschließenden Gföhl-Einheit, der tektonisch niedrigeren Raabs-Einheit und der Ostrong-Einheit (Monotone Serie) im Liegenden zusammen. Im Hangenden repräsentiert die Gföhl-Einheit hoch-metamorphe Gesteine, nämlich den Gföhl-Gneis und einen Granulit. Die Ostrong-Einheit als Basis des Moldanubikums bestimmt mit dem Rastenbergr-Granodiorit einen wesentlichen Teil des westlichen Muldenflügels und wird teilweise direkt von der Gföhl- und Raabs-Einheit überlagert, aber auch großräumig von der Biteš-Einheit; diese schließt im Hangenden die Drosendorf-Formation („Bunte Serie“) ein und besteht im Liegenden aus Dobra- und Biteš-Gneis (Abb. 1 und Abb. 2; vgl. FINGER & SCHUBERT, 2015).

Die „Bunte Serie“ bezeichnet charakteristische Gesteinsfolgen der Drosendorf-Formation, die Gneise, Marmore, Amphibolite, Kalksilikatgesteine, Graphitschiefer, Graphitgneise und Quarzite umfassen. Nach FUCHS & MATURA (1980) leitet sich die „Bunte Serie“ von einer epikontinentalen sandig-tonigen bis karbonatischen Sedimentfolge mit Einschaltungen basischer Vulkanite ab. Die Marmore treten als Leitgesteine in Form schmaler Bänder mit großer Längserstreckung auf und beinhalten die zu diskutierenden Zinkblende-Vorkommen. Nach Sr-Isotopen Untersuchungen von FRANK et al. (1990) weisen die Marmore ein oberproterozoisches Alter auf. HÖGELSBERGER (1989) gibt für die erste Amphibolit-fazielle Hauptmetamorphose der Marmore PT-Bedingungen von 700 °C und 7 kbar an; für ein späteres Grünschiefer-fazielles Metamorphose-Ereignis, werden 500 °C und 4 kbar angegeben. Für beide Metamorphosen kann ein variszisches Alter angenommen werden, wobei jedoch eine durch die Hauptmetamorphose überdeckte vorva-

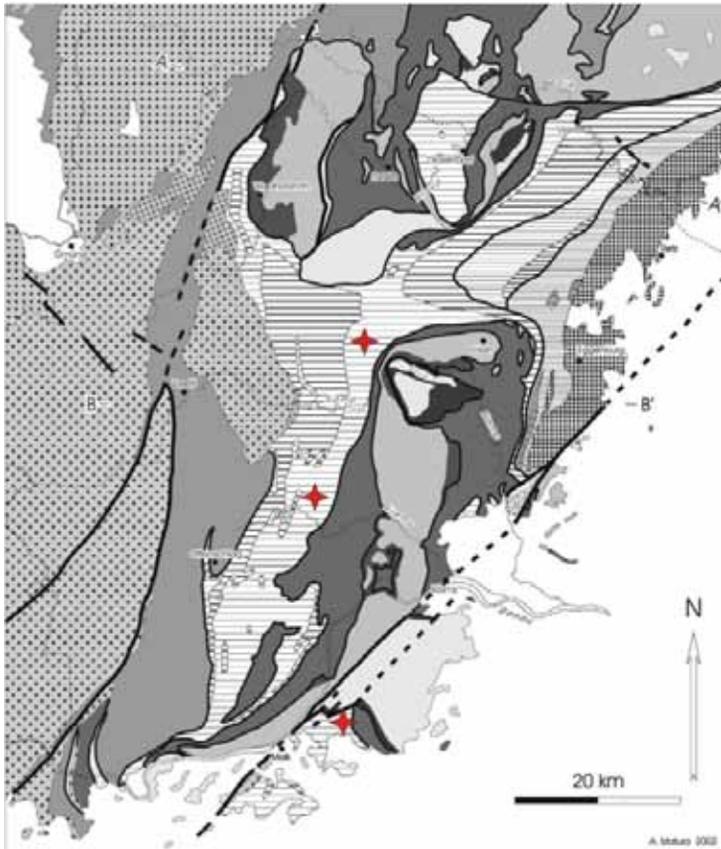


Abb. 1: Tektonische Übersicht über das Waldviertel, modifiziert nach MATURA (2003). Die Sterne verzeichnen die Fundpunkte Kochholz (südlich), Lichtenau (mittig), Winkl (nördlich). Die Legende ist der Abb. 2 zu entnehmen.

risische Metamorphose nicht auszuschließen ist (PETRAKAKIS & RICHTER, 1991). Nach SCHEELE & HOEFS (1992) ergibt die Graphit-Calcit Isotopenthermometrie für das prägende Metamorphose-Ereignis eine "Peak"-Temperatur zwischen 640 und 700 °C (vgl. LINNEN, 2013).

Nach der Geologischen Karte der Republik Österreich, 1:50.000, Blatt 37, Mautern (MATURA et al., 1983), befindet sich der Fundpunkt *Kochholz* in einem als Paragneis ausgeschiedenen Gebiet, das Einschaltungen von Quarzit, Glimmerschiefer, Amphibolit und Graphit-führendem Marmor enthält. Im als Fundpunkt angegebenen Steinbruch sind ein Graphit-führender Silikatmarmor, ein Amphibolit und ein als diskordanter Gang entwickelter Syenit aufgeschlossen. Der Silikatmarmor, der im Hangenden von Amphibolit überlagert wird, ist das Trägergestein der Zinkblende-Vererzung.

Der Fundpunkt *Lichtenau* findet sich in einem Marmorzug, der sich über einige km verfolgen lässt und innerhalb einer Paragneisserie mit Einschaltungen von Quarzit, Glimmerschiefer und Amphibolit liegt (MATURA et al., 1983). Eine massive Py-

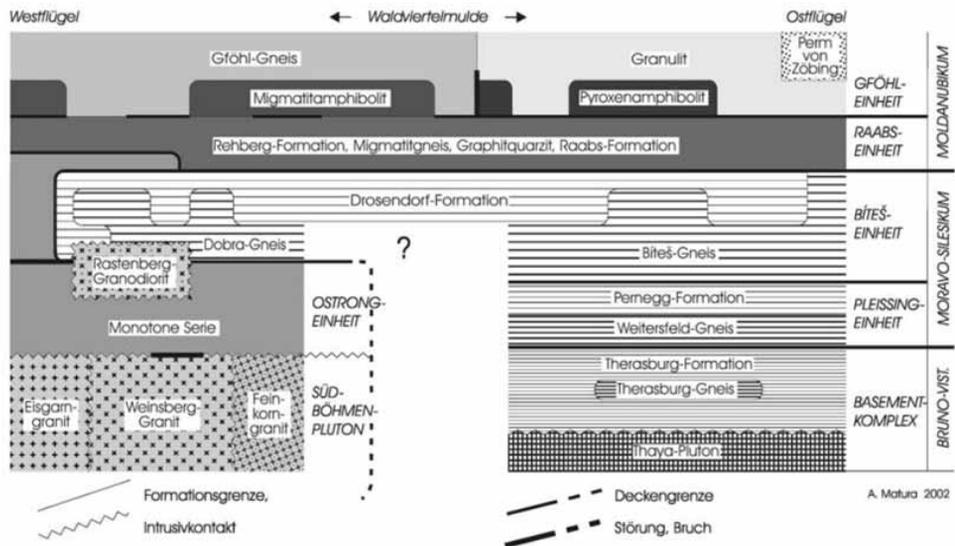


Abb. 2: Tektonisches Schema des Waldviertels mit Legende zu Abb. 1 nach MATURA (2003).

rit-Zinkblende-Vererzung in einem Graphit-haltigen Tremolit-Marmor ist auf der mittleren Etage des Steinbruchs zu beobachten. Mehrere, nur wenige cm-mächtige Pyrit-Zinkblende-Erzlagen finden sich über den Steinbruch verteilt.

Der Marmor-Steinbruch mit dem Fundpunkt *Winkl* unterteilt sich in einen West- und einen Ostteil und liegt in einem Paragneis mit Einschaltungen von Quarzit, Glimmerschiefer, Amphibolit und Biotitgneis (MATURA et al., 1983). Es können hier drei Marmor-Typen unterschieden werden. Im Westteil ein reiner weißer, mit Bleiglanz und Zinkblende vererzter Marmor sowie ein nicht-vererzter Bändermarmor und ein im Ostteil vorkommender feinkörniger grauer, Graphit-führender, mit Pyrit vererzter Marmor.

Probennahme und Arbeitsmethoden

Es wurden von jedem der drei Fundpunkte repräsentative Proben von den Zinkblende-Erzen, den Trägergesteinen sowie von einigen Nebengesteinen genommen. Die Proben stammen über den Steinbruchbereich verteilt sowohl aus dem Anstehenden wie auch aus frischem Blockschuttmaterial. Für die durch- und auflichtoptischen Untersuchungen sowie die Rasterelektronen-mikroskopischen Untersuchungen wurden zahlreiche Dünn- und Anschliffe hergestellt. Die für Phasenanalysen und die Durchführung von chemischen Analysen benötigten Pulverproben wurden nach einer Vor-Auswahl von zerkleinertem Probenmaterial unter dem Binokular händisch aussortiert und zu feinem Pulver zerrieben.

Die Phasenanalyse wurde mit einem Philips PW3020 X'Pert Röntgen-Pulverdiffraktometer (PXRD) vorgenommen. Für die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung einzelner Mineralphasen wurde die Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit energiedispersiver Analytik (REM + EDS) verwendet, wofür ein

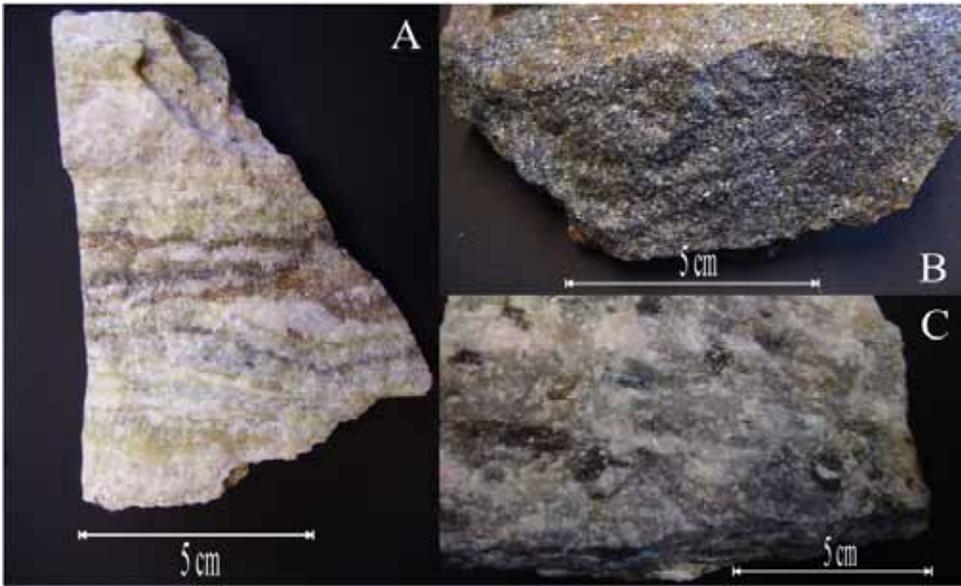


Abb. 3: Handstücke von im Steinbruch Kochholz vorkommenden Gesteinen. A: Braune Zinkblende-Lagen im Silikatmarmor; B: Massiger Amphibolit, C: Helles syenitisches Ganggestein mit dunklen Amphibolen.

JEOL JSM-6400 mit LINK eXL zur Verfügung stand. Mittels Sekundärelektronen wurden entsprechende REM Bilder erzeugt. Die Haupt- und Nebenelement-Bestimmung von den Gesteinsproben erfolgte mittels Röntgenfluoreszenz-Analytik unter Verwendung eines Philips PW 2400 Spektrometers. Um speziell die Elemente Na, K, Cu, Zn zu bestimmen, wurde die Atomabsorptions-Spektroskopie (AAS) eingesetzt. Als weitere Methoden zur Bestimmung der Haupt- und Nebenelemente sowie zur Bestimmung der Spurenelemente standen die ICP-OES-Analyse (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry) und die ICP-MS-Analyse (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) zur Verfügung. Des Weiteren wurden Schwefel-Isotopenanalysen vorgenommen.

Ergebnisse

Petrographie der Amphibolite

Die an die Marmore gebundenen Amphibolite stehen vor allem in *Kochholz* mit den vererzten Silikatmarmoren in engster Verbindung und sind damit von besonderem genetischem Interesse. Es handelt sich um ein schwarz-grünes, massiges, mittelkörniges Gestein (vgl. Abb. 3 B), das im Hangenden konkordant zum Marmor liegt. Im Dünnschliff zeigen sich die Amphibole als hypidiomorphe, braune bis grünlich-graue Kristalle; ihr Gesteinsanteil liegt bei etwa 50 Vol.%. Plagioklas (Oligoklas) ist mit etwa 40 Vol.% vertreten. Xenomorpher, undulös auslöschender Quarz sowie hellgrüner, diopsidischer Pyroxen treten untergeordnet auf. Rosa Granat kommt akzessorisch vor. Der Anteil an Ilmenit kann bis zu 5 Vol.% betragen. Nach EDS-Analysen sind die Amphibole der Pargasit-Reihe zuzuordnen. In Tabelle 1 sind die Haupt- und Nebenelemente der Amphibolite, sowie die Spurenelemente angegeben. Zum Vergleich sind die Daten eines Amphibolits der „Bunten Serie“ aus den Loja-Steinbrüchen nach ZAYDAN & SCHARBERT (1983) angeführt.

Tabelle 1: Röntgenfluoreszenz-Analysen der Haupt- und Nebenelemente sowie ICP-MS-Analysen der Spurenelemente des Amphibolits von Kochholz (Nb und Zr mittels ICP-AES bestimmt). Zum Vergleich sind Analysendaten von ZAYDAN und SCHARBERT (1983) des Amphibolits aus der Loja angegeben. Oxid-Gehalte in Gew.%, Spurenelement-Gehalte in ppm; LOI – Glühverlust, n.b. – nicht bestimmt.

	Kochholz	Loja		Kochholz	Loja		Kochholz	Loja
SiO ₂	45,93	43,16	As	0,61	n.b.	Mo	4,1	n.b.
TiO ₂	3,71	2,59	Ba	120	100	Nb	17	28
Al ₂ O ₃	12,76	12,23	Be	1,2	n.b.	Ni	45	50
Fe ₂ O ₃	18,21	16,76	Bi	0,06	n.b.	Pb	11	n.b.
MnO	0,27	0,21	Cd	0,15	n.b.	Rb	6,9	17
MgO	5,43	9,07	Co	42	n.b.	Sb	0,06	n.b.
CaO	9,97	12,41	Cr	86	137	Sn	1,9	n.b.
Na ₂ O	2,85	1,72	Cs	0,15	n.b.	Sr	236	174
K ₂ O	0,78	0,89	Cu	81	87	Tl	0,05	n.b.
P ₂ O ₅	0,50	0,50	Ge	1,7	n.b.	Zn	206	134
GV	0,65	1,48	Li	12	n.b.	Zr	196	168
Σ	101,06	101,02						

Mineralogie der Zinkblende-vererzten Marmore

Der Silikatmarmor von *Kochholz* ist ein massives, mittel- bis grobkörniges Gestein mit alternierend auftretenden Lagen aus mehrheitlich weißen, sowie grauen, Graphit-führenden Calciten, untergeordnet auftretenden Dolomiten, grünlichen Silikaten und braunen Zinkblende-Lagen (Abb. 3 A). Der Calcit-Gehalt lässt sich auf etwa 60 Vol.% abschätzen. Nach EDS-Analysen liegt der MgO-Gehalt des Calcits im Mittel bei 6,3 Gew.%. Die FeO- und MnO-Gehalte der Marmore liegen generell unter der Nachweisgrenze von 0,2 Gew.%. Die Silikatphasen sind mit Anteilen von etwa 20 Vol.% Serpentin und etwa 15 Vol.% Diopsid vertreten. Mikroskopisch sind

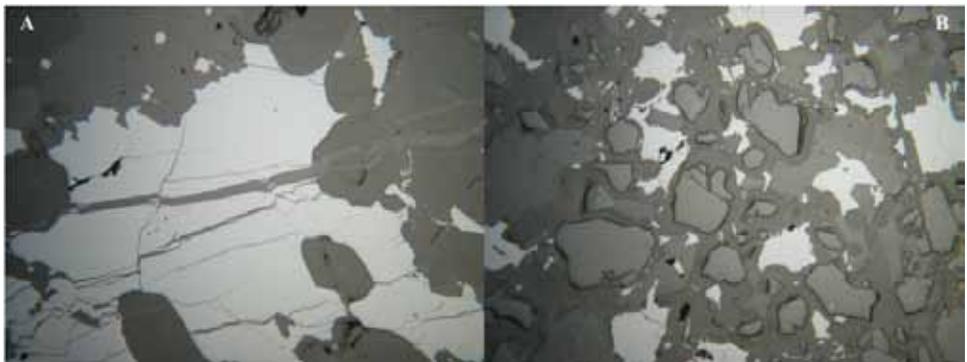


Abb. 4: Anschliff-Bilder der Zinkblende-Vererzung von Kochholz. A: (// Pol) Tektonisch zerbrochene, xenomorphe Zinkblende-Aggregate (hellgrau) mit Calcit verheilt in Karbonat-Matrix, (Vergr: 50 x). B: (// Pol) Feinkörnige xenomorphe Zinkblendes (hellgrau) zwischen serpentinierten Silikatkörnern (grau) in Karbonat-Matrix (dunkelgrau), (Vergr: 25 x).

Tabelle 2: Röntgenfluoreszenz-Analysen der Haupt- und Nebenelemente sowie der Spurenelemente Zn und Sr des Pyrit-Zinkblende-vererzten Tremolit-Marmors von Lichtenau sowie des Bleiglanz-Zinkblende-vererzten weißen Dolomit-Marmors (w.M.) und des nicht-vererzten gebänderten Marmors (g.M.) von Winkl. Zum Vergleich sind die Analysendaten von SCHRAUDER et al. (1993) eines reinen Calcit-Marmors von Eisenreith angegeben. Oxid-Gehalte in Gew.%, Spurenelement-Gehalte in ppm; LOI – Glühverlust, b.d. – unter der Nachweisgrenze.

	Lichtenau	Winkl-w.M.	Winkl-g.M.	Eisenreith
SiO ₂	5,82	1,89	3,86	2,57
TiO ₂	0,05	0,02	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	0,65	0,08	0,29	0,28
Fe ₂ O ₃	0,36	0,10	0,16	0,40
MnO	0,08	0,09	0,40	0,07
MgO	9,46	23,52	7,60	0,65
CaO	43,52	32,13	42,72	53,06
Na ₂ O	0,06	0,02	0,02	0,31
K ₂ O	0,19	0,05	0,08	0,02
P ₂ O ₅	0,03	0,02	0,02	0,01
LOI	39,65	41,61	45,04	41,80
Σ	99,87	99,53	100,22	99,20
Zn	410	360	b.d.	2
Sr	210	b.d.	170	666

in der Calcit-Grundmasse einzelne, oft stark zerbrochene Olivin (Forsterit)- sowie Pyroxen (Diopsid)-Körner zu beobachten, die teilweise oder gänzlich in Serpentin (Lizardit) umgewandelt sind. Die Zinkblende, die das praktisch einzige Erzmineral darstellt, tritt meist in Form rhythmisch alternierender Schichten auf (Abb. 3 A). Mit Calcit verheilte Bruchlinien von tektonisch zerbrochenen Kristallen weisen

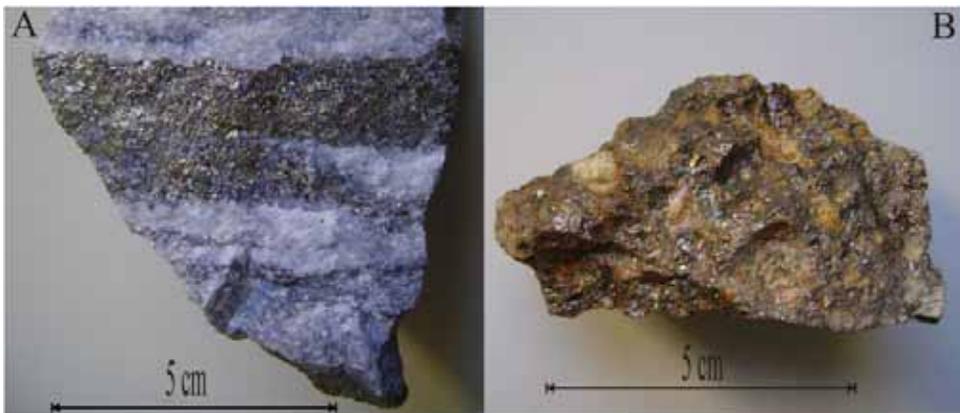


Abb. 5: Handstücke von im Steinbruch Lichtenau vorkommenden vererzten Gesteinen. A: Pyrit-Zinkblende-Lagen im Tremolit-Marmor, B: Massiger von Karbonaten durchsetzter Pyrrhotin.

Tabelle 3: ICP-OES-Analysen der Haupt- und Spurenelemente der Zinkblenden von Kochholz, KH, Lichtenau, LN und Winkl, WL (Co und As mittels ICP-MS bestimmt), sowie Vergleichsdaten für Haupt- und Spurenelement-Gehalte von Zinkblenden genetisch unterschiedlicher Vorkommen, aus Bleiberg, BB (Drauzug Mesozoikum) und Haufenreith, HR (Grazer Paläozoikum), beide nach SCHROLL (1997), aus Brand-Erbisdorf, B-E (permische Mineralisation) nach BAUER et al. (2019) und aus der ‚Black Angel‘-Lagerstätte in West-Grönland, BLA (Proterozoikum) nach HORN et al. (2019). Hauptelement-Gehalte in Gew.%, Spurenelement-Gehalte in ppm; b.d. – unter der Nachweisgrenze, n.b. – nicht bestimmt.

	<i>KH</i>	<i>LN</i>	<i>WL</i>	<i>BB</i>	<i>HR</i>	<i>B-E</i>	<i>BLA</i>
<i>Fe</i>	2,74	7,63	2,63	0,21-0,84	10	10-13	2,3-6,0
<i>Mn</i>	0,16	0,36	0,12	20-31 ppm	0,10	0,10-0,50	30-560 ppm
<i>Cd</i>	0,19	0,12	0,10	14-51 ppm	0,07	0,15-0,55	0,45-0,61
<i>Cu</i>	79	1199	185	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<i>Co</i>	2,1	0,2	0,1	0,5-1,0	500	0,2-2,0	n.b.
<i>Ga</i>	54	229	104	0,3-0,8	100	5-20	30-115
<i>Ge</i>	4	2	1	30-130	30	0,2-0,7	2-3
<i>Sn</i>	275	484	226	160-550	b.d.	20-300	n.b.
<i>Ag</i>	10	2	b.d.	5-24	30	5-90	2-24
<i>Pb</i>	45	30	18	n.b.	n.b.	0,5-20	n.b.
<i>As</i>	0,2	5,5	1,6	84-315	60	0,2-2,0	n.b.
<i>Sb</i>	28	31	26	1,0-2,5	b.d.	1-50	23
<i>Hg</i>	35	55	20	1450-2000	100	5-35	23-65
<i>In</i>	3	25	47	7-22	50	1-50	1
<i>Tl</i>	b.d.	1	b.d.	0,1-0,8	b.d.	0,1	n.b.

auf eine Deformation im Zuge einer retrograden Metamorphose hin (Abb. 4 A). Abb. 4 B zeigt das Auftreten von feinkörnigen Zinkblenden zwischen gerundeten serpentinisierten Silikatkörnern in der Karbonatmatrix. Vereinzelt enthält die Zinkblende feinste Einschlüsse von Bleiglanz und Kupferkies. Auf Grenzflächen mancher Zinkblenden finden sich weiße Krusten von Hydrozinkit sowie bräunliche Smithsonit-Aggregate. In Tabelle 3 sind die Analysen der Haupt- und Spurenelemente der Zinkblenden zusammengefasst.

Der Zinkblende- und Pyrit-führende Marmor von *Lichtenau* ist ein Tremolit-Marmor, bei dem die durch Graphit grau gefärbten Tremolit-Kristalle Korngrößen von einigen cm erreichen können. Relativ häufig ist eine Umwandlung der Tremolite in Talk zu beobachten. Die Tremolit-Marmore bestehen sowohl aus Calcit wie aus Dolomit, mit einem Dolomit/Calcit-Verhältnis von etwa 35/60. Der Tremolit-Anteil liegt bei etwa 4 Vol.%. Nach EDS-Analysen beträgt der MgO-Gehalt der Calcite im Mittel 2,2 Gew.%. In Tabelle 2 sind die Haupt- und Nebenelemente des dolomitischen Calcit-Marmors sowie die Zn und Sr Spurenelement-Gehalte angegeben. In Form kleinster gerundeter Körner konnte Skapolith akzessorisch festgestellt werden. Neben den cm-mächtigen Pyrit-Zinkblende-Lagen (Abb. 5 A), finden sich dünne Erzlagen von entweder nur Zinkblende oder nur Pyrit. Die

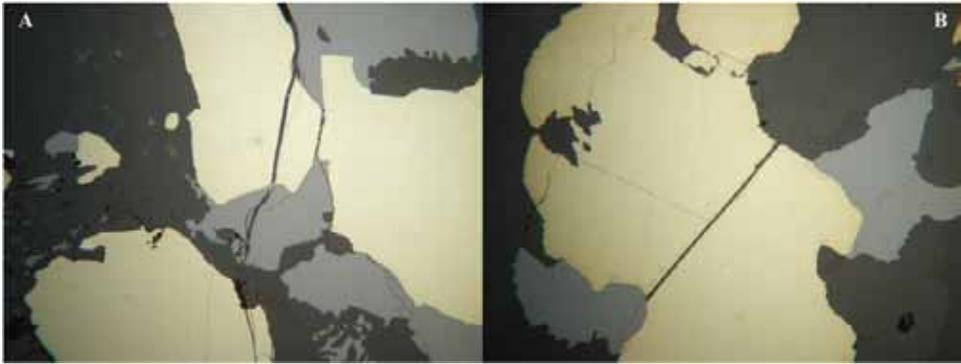


Abb. 6: Anschliff-Bilder der Pyrit-Zinkblende-Vererzung von Lichtenau. A: (// Pol) Hypidiomorphe Pyrit-Körner (hellgelb) und xenomorphe Zinkblende-Körner (hellgrau) in Karbonat-Matrix, gemeinsam tektonisch zerbrochen, (Vergr. 25 x). B: (// Pol) Tektonisch zerbrochener Pyrit (hellgelb) mit randlich auftretender Zinkblende (hellgrau), (Vergr. 25 x).

Zinkblendens sind mit dem mengenmäßig dominierenden Pyrit eng verwachsen und weisen Korngrößen im Bereich einiger mm auf; sie zeigen xenomorphe bis hypidiomorphe Korngestalt. Der Pyrit tritt meist in Form hypidiomorpher Kristalle auf, die durch Deformation teilweise zerbrochen sind; verheilte Risse setzen sich in der Zinkblende fort (Abb. 6 A, B). Bleiglanz findet sich selten in Form xenomorpher Aggregate; er füllt auch feinste Klüfte und Hohlräume der Karbonatmatrix. Vereinzelt tritt Kupferkies in den Zinkblendens als „chalcopyrite-disease“ auf. Zu erwähnen ist auch das Vorkommen eines verfrachteten, stark zerklüfteten Zinkblende-führenden Pyrrhotin-Blocks (Abb. 5 B).

Bei dem mit Zinkblende und Bleiglanz vererzten weißen Marmor von *Winkl* handelt es sich um einen mittel- bis grobkörnigen Dolomit-Marmor mit einem Dolomit/Calcit-Verhältnis von etwa 95/5. Als Nebengemengteile finden sich hellgrüner Diopsid und hellbrauner Phlogopit, Skapolith tritt akzessorisch auf. Der MgO-Gehalt der Calcite liegt im Mittel bei 5,1 Gew.%. Bei den nicht-vererzten Bändermarmoren handelt es sich um dolomitische Calcit-Marmore, deren Dolomit/Calcit-Verhältnis im Mittel bei 30/70 liegt. Die Haupt- und Nebenelemente des weißen Dolomit-Marmors und des nicht-vererzten Bändermarmors sowie die Zn- und Sr- Spurengehalte sind in Tabelle 2 angegeben. Zum Vergleich sind auch die von SCHRAUDER et al. (1993) ermittelten Daten eines reinen Calcit-Marmors aus dem Steinbruch von Elsenreith angeführt. In den Dolomit-Marmoren bilden mehrere mm große, etwa im gleichen Mengenverhältnis vorkommende Zinkblende- und Bleiglanz-Kristalle massige, linsenförmige Erzkörper (Abb. 7 A, C), ebenso treten schnurförmige Vererzungen in mm-Stärke von nur jeweils einer Erzphase auf (Abb. 7 B). Die eng miteinander verwachsenen Erzphasen der massigen Bleiglanz-Zinkblende-Vererzung enthalten häufig feinste Einschlüsse von idiomorphen Pyriten (Abb. 8 A, B). Sonst tritt idiomorpher Pyrit mengenmäßig stark zurück, ist aber wie Zinkblende tektonisch zerbrochen. Das aus EDS-Analysen abgeleitete Auftreten von Zinnkies (Stannit, $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$), findet sich in Form kleinster tropfenförmiger Einschlüsse meist an der Korngrenze von Bleiglanz und Zinkblende (Abb. 9). Bei den feinkörnigen Graphit- und Talk-führenden grauen Marmoren handelt es



Abb. 7: Handstücke von im Westteil des Steinbruchs Winkl vorkommenden Marmoren. A, B: Mit brauner Zinkblende und grauem Bleiglanz lagenförmig vererzter weißer Dolomit-Marmor; C: Massige Bleiglanz-Zinkblende-Vererzung im Dolomit-Marmor; D: Unvererzter Bändermarmor.

sich um Dolomit-Marmore mit einem Dolomit/Calcit-Verhältnis von 75/25. Diese Marmore weisen eine deutliche Pyrit-Vererzung auf.

Mineralchemie der Zinkblenden

In Tabelle 3 sind die Analysenwerte der Haupt- und Spurenelemente der Zinkblenden von *Kochholz*, *Lichtenau* und *Winkl* angegeben. Zu Vergleichszwecken sind Daten nach SCHROLL (1997) von Zinkblenden aus dem Drauzug Mesozoikum (Bleiberg), und aus dem Grazer Paläozoikum (Haufenreith) sowie nach BAUER et al. (2019) aus dem Freiburger Revier (Brand-Erbisdorf) und nach HORN et al. (2019) von der an Karbonate gebundenen, metamorph überprägten ‚Black Angel‘-Lagerstätte (W-Grönland) angeführt. Die Zinkblenden der Pyrit-Zinkblende-Vererzung von *Lichtenau* zeigen gegenüber denen von *Kochholz* und *Winkl* eindeutig erhöhte Fe- und Mn-Gehalte. Auffallend sind die mit 229 ppm ungewöhnlich hohen Ga-Gehalte. Ebenso zeigen diese Zinkblenden auffallend hohe Cu-Gehalte sowie erhöhte Sn- und Hg-Gehalte; die Cu-Gehalte sind zum Teil auf „chalcopyrite disease“ zurückzuführen, können aber auch für den Ladungsausgleich von Ga^{3+} durch Cu^{1+} für Zn^{2+} verantwortlich sein. Die erhöhten Zinn-Werte sind vor allem im Zusammenhang mit dem Vorkommen feinsten Zinnkies-Einschlüsse zu sehen. Die Zinkblende von *Kochholz* weist die höchsten Cd-Gehalte auf, sowie etwas erhöhte Pb- und Ag-Gehalte, was in Übereinstimmung mit vorhandenen Bleiglanz-Ein-

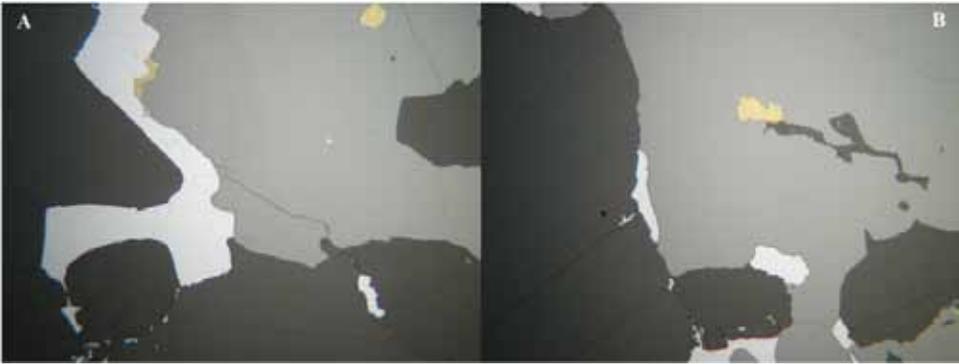


Abb. 8: Anschliff-Bilder der Bleiglanz-Zinkblende-Vererzung von *Winkl*. A: (// Pol) Zinkblende (hellgrau) mit Pyrit-Einschluss (hellgelb) und randlich an der Korngrenze zu Bleiglanz (weiß) auftretendem Pyrit, sowie Bleiglanz-Einschluss im Karbonat, (Vergr. 50 x). B: (// Pol) Zinkblende (hellgrau) mit Pyrit-(hellgelb) und Karbonat-(grau) Einschlüssen sowie mit randlich auftretendem Bleiglanz (weiß).

schlüssen steht; relativ gesehen, zeigt diese Zinkblende mit 4 ppm den auffälligsten Ge-Gehalt. Die Zinkblende der Bleiglanz-Zinkblende-Vererzung von *Winkl* zeigt mit 47 ppm den höchsten In-Gehalt.

Schwefel-Isotopenanalysen

Schwefel-Isotopenanalysen der Zinkblenden von *Lichtenau* und *Winkl* unterscheiden sich gegenüber den Zinkblenden von *Kochholz*, indem sie sich, bei durchwegs positivem $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT), durch besonders hohe Werte auszeichnen. Für *Kochholz* beträgt der $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Wert +10,2, für *Lichtenau* +26,3 und für *Winkl* +27,2. In ostalpinen Vorkommen sind nach GÖTZINGER & PAK (1983) derart hohe positive Werte für Zinkblenden ungewöhnlich. Als Ausnahme wird eine Zinkblende vom Arzriedel in dolomitisierten Gutensteiner Schichten mit +29,8 $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) angeführt. Ein $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Mittelwert von triadischen Gips- und Anhydrit-Gesteinen aus Evaporiten wird mit +25,9 angegeben. Eine ausführliche Übersicht über $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Werte von Sulfid- und Sulfat-Mineralen aus weltweit vorkommenden Pb-Zn-Vererzungen findet sich bei SCHROLL (1985). Für Zinkblenden aus Bleiberg werden von SCHROLL (1997) $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Werte mit -39,1 bis -1,4 angegeben (vgl. dazu BAUER et al., 2019). Entsprechende Werte für Pb-Zn-Erze aus dem Grazer Paläozoikum kommen den Werten von Zinkblenden der „Bunten Serie“ wesentlich näher und liegen im Bereich von +2,4 bis +19,2.

Diskussion

Nach ZAYDAN & SCHARBERT (1983) handelt es sich bei den Amphiboliten der „Bunten Serie“ um ehemalige Tholeiite. Die Analysendaten der Amphibolite von *Kochholz* (siehe Tabelle 1) zeigen weitestgehende Übereinstimmung mit den von ZAYDAN & SCHARBERT (1983) angegebenen Daten für einen Amphibolit aus den Loja-Steinbrüchen, womit auch für die im direkten Verband mit den vererzten Marmoren auftretenden Amphibolite die gleiche genetische Grundlage angenom-



Abb. 9: REM-Aufnahme eines Zinnkies-Einschlusses (siehe Bildmitte) an der Korngrenze zwischen Zinkblende und Bleiglanz, aus der Vererzung im weißen Dolomit-Marmor von Winkl, (Vergr. 150 x).

men werden kann (vgl. auch das Dreiecks-Diagramm Zr-Nb-Y von MESCHÉDE, 1986). Der Zn-Gehalt des Amphibolits von *Kochholz* ist mit 206 ppm gegenüber 134 ppm des Amphibolits der Loja etwas erhöht und ist als Hinweis auf einen Zusammenhang der ursprünglichen tholeiitischen Basalte mit der Vererzung der Karbonate zu sehen.

Bei der Entwicklung von genetischen Modellvorstellungen müssen auch die untergeordnet, aber in den vererzten Karbonaten doch in signifikanten Mengen auftretenden Graphite berücksichtigt werden. Die von BERAN et al. (1985) sowie von RICHTER et al. (1991) und SCHRAUDER et al. (1993) an den Graphitschiefern der „Bunten Serie“ durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es sich um ursprüngliche Sedimentbildungen in einem euxinischen Milieu handelt. Die Spurenelement-Gehalte von Ni, Co, Cu, Zn, Ti der Graphitschiefer stehen in Übereinstimmung mit den Durchschnittsgehalten von typischen „Schwarzschiefern“ (vgl. z.B. VINE & TOURTELOT, 1970). In diesem Zusammenhang sind auch die Graphitschiefer als eine mögliche Zn-Quelle zu sehen. Ihr hoher Feldspat-Anteil (bis 70 Vol.%) lässt auf Sapropel mit einem hohen Tonmineral-Anteil als Ausgangssedimente schließen. Der lokal sehr unterschiedliche, aber zum Teil hohe Turmalin-Gehalt (bis 15 Vol.%) weist auf eine im Zusammenhang mit vulkanischen Exhalationen stehende B-Zufuhr hin.

Das Erscheinungsbild der mit Zinkblende vererzten Marmore ist vielfältig. Nach den petrologischen Untersuchungen von HÖGELSBERGER (1989) dominieren Calcit-Marmore die „Bunte Serie“, Dolomit-Marmore treten hingegen wesentlich

seltener auf; Graphit ist ein häufiger akzessorischer Gemengteil. Die für Marmore der „Bunten Serie“ als typisch bezeichnete Skapolith-Führung konnte für die vererzten Marmore nur selten in Form kleinster Körner bestätigt werden. Beim Silikatmarmor von *Kochholz* handelt es sich um einen Dolomit-armen Calcit-Marmor. Die Forsterit- und Diopsid-Bildung könnte bei einer Amphibolit-faziellen Metamorphose (etwa 700 °C, 7 kbar) unter Beteiligung von Dolomiten erfolgt sein. Bei einer späteren Grünschiefer-faziellen Metamorphose (etwa 500 °C, 4 kbar) kommt es zur weitgehenden Serpentinisierung der Olivine und Pyroxene. Ganz ähnliche Verhältnisse bezüglich Temperatur- und Druck-Bedingungen können auch für die Vorkommen von *Lichtenau* und *Winkl* erwartet werden. Der vererzte Tremolit-Marmor von *Lichtenau* besteht sowohl aus Calcit wie aus Dolomit. Hier kommt es bei einer späteren Metamorphose zur Vertalkung der Tremolite. Beim Marmor von *Winkl*, der auch durch Diopsid- und Phlogopit-Führung gekennzeichnet ist, handelt es sich um einen praktisch reinen Dolomit-Marmor. Damit ist der klare Zusammenhang von Vererzung und Dolomit-Führung erkennbar. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, liegen die MgO-Gehalte der dolomitischen Calcit-Marmore von *Lichtenau* und die der gebänderten dolomitischen Calcit-Marmore von *Winkl* in einem vergleichbaren Bereich. Die Spurengehalte von Sr korrelieren eindeutig mit den an Calcit gebundenen CaO-Werten; im Dolomit-Marmor liegt Sr unter der Nachweisgrenze der RFA. Nach SCHRAUDER et al. (1993) beträgt der Sr-Gehalt des reinen Calcit-Marmors von Elsenreith 666 ppm. Relativ hohe Zn-Gehalte können mit 410 ppm im Tremolit-Marmor von *Lichtenau* und mit 360 ppm im reinen Dolomit-Marmor von *Winkl* bestätigt werden. Der Zn-Gehalt des Calcit-Marmors von Elsenreith beträgt nur 3 ppm. Nach HÖGELSBERGER (1989) kann für die Marmore der „Bunten Serie“ ein teilweise evaporitischer Ursprung angenommen werden. Hohe Mg-Gehalte mit entsprechend hohem Mg/Ca-Verhältnis, sowie niedrige Fe-Gehalte mit niedrigen Na- und höheren K-Gehalten sind nach MOINE et al. (1981) wesentliche Kriterien für das Vorliegen ehemaliger Evaporite. Damit bestätigen die analytischen Daten der Tabelle 2, dass die Zinkblende-führenden dolomitischen Calcit-Marmore und Dolomit-Marmore zu einem wesentlichen Teil aus Evaporiten hervorgegangen sind.

Vergleich der Spurenelemente der Zinkblenden

Bei den in Tabelle 3 nach SCHROLL (1997) zu Vergleichszwecken aufgelisteten Daten handelt es sich um Zinkblenden aus triadischen, an Karbonate gebundene Pb-Zn Erze vom „Typ Bleiberg“, die dem epigenetischen Mississippi Valley-Typ (MVT) zuzuordnen sind (EBNER et al., 1999). Außer für Sn und Ag zeigt sich keinerlei Übereinstimmung mit Daten der untersuchten Zinkblenden. Die Ge-Gehalte sind gegenüber den Ga-Gehalten in MVT- Lagerstätten stark erhöht. Ebenso sprechen die deutlich positiven $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Werte gegen eine Vererzung dieses Typs (vgl. SCHROLL, 1985). Des Weiteren sind die Spurenelement-Gehalte von Zinkblenden aus dem Grazer Paläozoikum (silurisch-devonisch) angeführt, die dem sedimentär-exhalativen (SEDEX) Vererzungs-Typ zugerechnet werden (EBNER et al., 1999). Hier sind mit den untersuchten Zinkblenden vergleichbare Mn- und Cd-Gehalte sowie ähnliche Ga- und In-Gehalte erkennbar. Die Ge-Gehalte sind im Vergleich zu den Ga-Gehalten äußerst niedrig. Auch sind die deutlich positiven

$\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Werte mit diesem Vererzungs-Typ vereinbar. Die nach BAUER et al. (2019) angegebenen Daten von Zinkblenden aus permischen hydrothermal gebildeten Ganglagerstätten aus dem Freiburger Revier (Ag-Sb-Pb- Karbonat Paragenese) stehen in teilweiser Übereinstimmung mit den untersuchten Zinkblenden, bei denen die Elemente Mn, Co, As, Sb, Hg und In vergleichbare Gehalte zeigen. Demnach lässt sich aus diesen Daten ein deutlich hydrothermal Einfluss ableiten. Eine auffallende Ähnlichkeit zeigt sich bei den Fe-, Ga-, Ge-, Ag-, Sb- und Hg-Gehalten mit den Daten von Zinkblenden der ‚Black Angel‘-Lagerstätte in W-Grönland. Dabei handelt es sich nach HORN et al. (2019) um eine (wie bei den Zinkblenden der ‚Bunten Serie‘) proterozoische, an Dolomit- und dolomitische Calcit-Marmore gebundene und metamorph überprägte Zn-Pb-Ag-Lagerstätte, bei der auch der Einfluss hydrothermaler Fluide eine wesentliche Rolle spielt.

Es ist ein auffälliges Merkmal der Zinkblenden aus den Marmoren der ‚Bunten Serie‘, dass sie hohe Ga-Gehalte bei niedrigen Ge-Gehalten sowie signifikant hohe In-Gehalte zeigen. Diese kritischen Elemente werden mehrfach zur genetischen Charakterisierung von Zinkblenden herangezogen. So nimmt SCHROLL (1985) auf der Grundlage des Ga/Ge-Verhältnisses der Zinkblenden von Bleiberg eine Typisierung der Pb-Zn-Vererzungen vor (vgl. auch SAHLSTRÖM et al., 2017). FRENZEL et al. (2016) charakterisieren auf Grundlage der Ge- Ga- und In-Werte von Zinkblenden unter Einbeziehung der Fe- und Mn-Gehalte fünf Lagerstätten-Typen: MVT-Lagerstätten, SEDEX-Lagerstätten, Vulkanogene Massiv-Sulfidlagerstätten, Ganglagerstätten und Hochtemperierte hydrothermale Verdrängungs-Lagerstätten. Mit Ausnahme der MVT-Lagerstätten, liegen in den anderen Lagerstätten-Typen die Ga-Gehalte deutlich über den Ge-Gehalten. Nach dieser Einteilung können die Zinkblenden der ‚Bunten Serie‘ dem SEDEX-Typ zugeordnet werden. Nach ETSCHMANN et al. (2019) erfolgt in hydrothermalen Fluid-Systemen der Transport des Zinks bei niedrigen Temperaturen (<200 °C) in Form von Chlorid-Komplexen. Bei höheren Temperaturen wechselt Zink zu einer Komplexierung mit Bisulfid (vgl. SANGSTER, 2018).

Genetische Schlussfolgerungen

Nach FUCHS & MATURA (1980) leitet sich die ‚Bunte Serie‘ mit ihren Gneisen, Marmoren, Amphiboliten, Graphitschiefern, Kalksilikatgesteinen und Quarziten von einer epikontinentalen, sandig-tonigen bis karbonatischen Sedimentfolge mit Einschaltungen basischer Vulkanite ab. Bei den Zinkblende-vererzten Marmoren dominieren die Dolomit-reichen Marmore, wobei der hohe Mg-Gehalt auf ein evaporitisches Milieu zurückzuführen ist. Eine thermochemische Sulfat-Reduktion (TSR) kann bei Temperaturen >100 °C erfolgen. Dies steht in Übereinstimmung mit den stark positiven $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Werten von evaporitischem Sulfat-Schwefel mit dem Sulfid-Schwefel der Zinkblenden vor allem von *Lichtenau* und *Winkl*. Die Graphit-Gehalte der Marmore liefern den Hinweis auf ursprüngliche Sapropelle, was auf eine bakterielle Sulfat-Reduktion (BSR) bei niedrigeren Temperaturen schließen lässt und den niedrigeren positiven $\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT) Wert der Zinkblende von *Kochholz* erklärt. Damit können die für den Zn-Transport verantwortlichen Chlorid-Komplexe mit dem durch TSR und BSR produzierten Sulfid reagieren. Die Amphibolite als ehemalige tholeiitische Basalte bestätigen einen vulkanischen

Einfluss und stehen mit einem vulkano-sedimentären (SEDEX) Vererzungs-Typ in Übereinstimmung, der auch mit dem Ga/Ge-Verhältnis der Zinkblenden (hohe Ga-, niedrige Ge-Gehalte) in Einklang steht. Die Verteilung der Spurenelemente zeigt auch eine teilweise Übereinstimmung mit den Zinkblenden aus hydrothermalen Ganglagerstätten, sowie mit metamorph überprägten, hydrothermal beeinflussten Pb-Zn-Ag-Vererzungen. Daraus lässt sich auf hydrothermale Auslaugungs-Prozesse von vorwiegend tonigen Sedimenten schließen, was die hohen Ga-Gehalte (Ga-Affinität zu Al) der Zinkblenden erklären kann. Die erste Amphibolit-fazielle Überprägung der Marmore ist – unter teilweiser Beibehaltung eines primär-sedimentären Gefüges – für die Ausbildung massiver Sulfid-Anreicherungen verantwortlich, ebenso für die Bildung der silikatischen Komponenten (Olivin, Pyroxen, Amphibol). Die spätere, Grünschiefer-fazielle Metamorphose hinterlässt ihre Spuren in der Serpentinisierung und Talk-Bildung sowie in Deformations-Erscheinungen, die sich in charakteristischer Weise als mit Calcit verheilte Bruchlinien von tektonisch zerbrochenen Zinkblende-Kristallen zeigen.

Danksagung

Proben aus dem Anstehenden vom Fundpunkt Winkl wurden B.K. freundlicherweise von den Herrn G. Knobloch, E. Löffler, A. Prayer, A. Körner sowie A. Ertl überlassen. Frau P. Körner, den Herrn W. Körner und P. Nagl danken wir für die gerätetechnische Hilfestellung. Herrn A. Wagner gilt unser Dank für die Anfertigung der Dünn- und Anschliffe.

Literatur

- BAUER, M.E., BURISCH, M., OSTENDORF, J., KRAUSE, J., FRENZEL, M., SEIFERT, T. & GUTZMER, J. (2019): Trace element geochemistry of sphalerite in contrasting hydrothermal fluid systems of the Freiberg district, Germany: insights from LA-ICP-MS analysis, near-infrared light microthermometry of sphalerite-hosted fluid inclusions, and sulfur isotope geochemistry. – *Miner. Dep.*, 54, 237-262.
- BERAN, A., FISCHER, R. & PICHLHÖFER, R. (1985): Zur Mineralogie der Graphitlagerstätten des Moldanubikums in Österreich. – *Fortschr. Mineral.*, 63, Beih. 1, 21.
- BRANDSTÄTTER, F. & NIEDERMAYR, G. (2005): Eine bemerkenswerte Sphalerit-Vererzung mit Apatit, Aragonit, Baileychlor, Galenit, Greenockit, Malachit (?), Phlogopit, Pyrit, Smithsonit und Tremolit aus dem Steinbruch „Malaschofsky“ bei Lichtenau, WSW Gföhl, Niederösterreich. *Neue Mineralfunde aus Österreich LIV*. – *Carinthia II*, 195, 296-297.
- EBNER, F., CERNY, I., EICHHORN, R., GÖTZINGER, M., PAAR, W.H., PROCHASKA, W. & WEBER, L. (1999): Mineral resources in the Eastern Alps and adjoining areas. In: NEUBAUER, F. & HÖCK, V. (Eds.), *Aspects of geology in Austria*. – *Mitt. Österr. Geol. Ges.*, 92, 157-184.
- ETSCHMANN, B., LIU, W., MAYANOVIC, R., MEI, Y., HEALD, S., GORDON, R. & BRUGGER, J. (2019): Zinc transport in hydrothermal fluids: On the roles of pressure and sulfur vs. chlorine complexing. – *Am. Mineral.*, 104, 158-161.

- FINGER, F. & SCHUBERT, G. (2015): Die Böhmisches Masse in Österreich: Was gibt es Neues? – Abh. Geol. Bundesanst., 64, 167-179.
- FRANK, W., SCHARBERT, S., THÖNI, M., POPP, F. & HAMMER, S. (1990): Isotopengeologische Neuergebnisse zur Entwicklungsgeschichte der Böhmisches Masse. – Österr. Beitr. Meteor. Geophys., 3, 185-228.
- FRENZEL, M., HIRSCH, T. & GUTZMER, J. (2016): Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type - A meta-analysis. – Ore Geol. Rev., 76, 52-78.
- FUCHS, G. & MATURA, A. (1980): Die Böhmisches Masse in Österreich. In: OBERHAUSER, R. (Wiss. Red.), Geol. Bundesanst. (Hrsg.), Der Geologische Aufbau Österreichs. – Springer, Wien New York, 121-143.
- GÖTZINGER, M.A. & PAK, E. (1983): Zur Schwefelisotopenverteilung in Sulfid- und Sulfatmineralen triadischer Gesteine der Kalkalpen, Österreich. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 29, 191-198.
- HORN, S., DZIGGEL, A., KOLB, J. & SINDERN, S. (2019): Textural characteristics and trace element distribution in carbonate-hosted Zn-Pb-Ag ores at the Paleoproterozoic Black Angel deposit, central West Greenland. – Miner. Dep., 54, 507-524.
- HÖGELSBERGER, H. (1989): Die Marmore und Kalksilikatgesteine der Bunten Serie – Petrologische Untersuchungen und geologische Konsequenzen. – Jb. Geol. Bundesanst., 132, 213-230.
- KNOBLOCH, G. (2004): Steinreicher Dunkelsteinerwald. – Begleitheft zur Ausstellung, Hellerhof Paudorf / NÖ, 3-11.
- KURZ, B. & GÖTZINGER, M.A. (2005): Zn-Fe-Pb-Cu-Mineralisationen in Marmoren der Bunten Serie, Böhmisches Masse, Niederösterreich. – Mitt. Österr. Miner. Ges., 151, 77.
- LINNER, M. (2013): Metamorphoseentwicklung und Deckenbau des Moldanubikums mit Fokus auf den Raum Melk - Dunkelsteinerwald. – Arbeitstag. Geol. Bundesanst., Melk 2013, 43-56.
- MATURA, A. (2003): Zur tektonischen Gliederung der variszischen Metamorphite im Waldviertel Niederösterreichs. – Jb. Geol. Bundesanst., 143, 221-225.
- MATURA, A., FUCHS, W. & GRILL, R. (1983): Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50.000, Blatt 37, Mautern. – Geol. Bundesanst., Wien.
- MESCHEDE, M. (1986): A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalt and continental tholeiites with Nb-Zr-Y diagram. – Chem. Geol., 56, 207-218.
- MOINE, B., SAUVAN, P. & JAROUSSE, J. (1981): Geochemistry of evaporite-bearing series: A tentative guide for the identification of metaevaporites. – Contrib. Mineral. Petrol., 76, 401-412.

- PETRAKAKIS, K. & RICHTER, W. (1991): Metamorphose im niederösterreichischen Moldanubikum – eine Übersicht. – Arbeitstag. Geol. Bundesanst., Wien 1991, 13-20.
- RICHTER, W., KOLLER, F. & BERAN, A. (1991): Exkursion in die metamorphen Serien und magmatischen Gesteinskomplexe des Waldviertels, Moldanubikum, Österreich. – Beih. Europ J. Mineral., 3, No. 2, 131-159.
- ROETZEL, R. & FUCHS, G. (2008): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000, Erläuterungen zu Blatt 8, Geras. – Geol. Bundesanst., Wien, 136.
- SAHLSTRÖM, F., ARRIBAS, A., DIRKS, P., CORRAL, I. & CHANG, Z. (2017): Mineralogical distribution of germanium, gallium and indium at the Mt Carlton high-sulfidation epithermal deposit, NE Australia, and comparison with similar deposits worldwide. – Minerals, 7, 213-241.
- SANGSTER, D.F. (2018): Toward an integrated genetic model for vent-distal SE-DEX deposits – Miner. Dep., 53, 509-527.
- SCHEELE, N. & HOEFS, J. (1992): Experimentell bestimmte Isotopengleichgewichte im System: Kalzit-Graphit-CO₂. – Contr. Mineral. Petrol., 112, 35-45.
- SCHRAUDER, M., BERAN, A., HOERNES, S. & RICHTER, W. (1993): Constraints on the origin and the genesis of graphite-bearing rocks from the Variegated Sequence of the Bohemian Massif (Austria). – Mineral. Petrol., 49, 175-188.
- SCHROLL, E. (1985): Geochemische Parameter der Blei-Zink-Vererzung in Karbonatgesteinen und anderen Sedimenten. – Archiv Lagerst.forsch. Geol. Bundesanst., 6, 167-178.
- SCHROLL, E. (1997): Geochemische und geochronologische Daten und Erläuterungen. In: WEBER, L. (Hrsg.), Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. – Archiv Lagerst.forsch. Geol. Bundesanst., 19, 395-538.
- SÜSS, F.E. (1903): Bau und Bild der Böhmisches Masse. In: DIENER, C. et al. (Hrsg.), Bau und Bild Österreichs. – Tempsky-Freytag, Wien, 1-322.
- VINE, J.D. & TOURTELOT, E.B. (1970): Geochemistry of black shale deposits, a summary report. – Econ. Geol., 65, 253-272.
- WEBER, L. et al. (1997): Die metallogenetischen Einheiten Österreichs. In: WEBER, L. (Hrsg.), Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. – Archiv Lagerst.forsch. Geol. Bundesanst., 19, 230-394.
- ZAYDAN, A. & SCHARBERT, H.G. (1983): Petrologie und Geochemie moldanubischer metamorpher Serien im Raume Persenbeug (südwestliches Waldviertel). – Jb. Geol. Bundesanst., 126, 181-199.