

## **BOHNERZE VOM REITING, OBERSTEIERMARK**

Johann Raith<sup>1\*</sup> & Michel Schweizer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Rohstoffmineralogie, Montanuniversität Leoben, Peter-Tunner-Straße 5, 8700 Leoben

<sup>2</sup> Haiderhofweg 15, 8793 Trofaiach

\*email: johann.raith@unileoben.ac.at

### **Abstract**

Loose limonitic material of millimetre to several centimetre size has been found at several locations on the peak plateaus of Reiting and Eisenerzer Reichenstein. These weathered pebbles of rusty dark brown to black colour consist of a mixture of goethite and hematite. Goethite forms pseudomorphs after another iron phase, likely pyrite. Microbial and colloform microstructures are also documented. The studied material can be classified as „Bohnerz“; i.e., concretions of limonitic iron ores formed during karstification and paleoweathering. Bohnerz formation is thought to be related to the formation of karst plateaus in the central and eastern Northern Calcareous Alps during the Paleogene to early Neogene prior to sedimentation of the siliciclastic rocks of the Augenstein Formation. These materials have undergone continuous erosion and became eroded and reworked during uplift and exhumation of the Northern Calcareous Alps and were resedimented in karst crevasses and caves.

### **Zusammenfassung**

Im Gipfelbereich des Reiting und des Eisenerzer Reichenstein sind gehäuft Milli- bis Zentimeter große Stücke eines limonitischen Materials zu finden. Diese rostig braun bis schwarzbraunen Gerölle wurden als ein Gemenge von Goethit und Hämatit bestimmt. Goethit bildet zum Teil Pseudomorphosen nach anderen Phasen, vermutlich nach Pyrit. Auch mikrobiell entstandenen Mikrostrukturen und untergeordnet schalig-lagige Gefüge werden dokumentiert. Das untersuchte Material ist als Bohnerz im weiteren Sinne bzw. Pseudobohnerz zu klassifizieren. Die Bildung dieser Brauneisenerze kann mit einer flächenhaften Verkarstung der Nördlichen Kalkalpen im Paläogen in Zusammenhang gebracht werden, die vermutlich vor der Ablagerung der Augenstein Formation erfolgte. Im Zuge der Hebung und Exhumation der Kalkalpen wurden diese Gerölle in Karststrukturen wie Karstspalten und Höhlen umgelagert von wo sie durch bis heute andauernde Erosionsprozesse freigesetzt werden.

### **Einleitung**

Vom Gipfelplateau des Reiting und Eisenerzer Reichenstein wurde von einem der

Autoren (M. Schweizer) in den Jahren 2016-201 an zahlreichen Fundpunkten loses Material eines rostig braun bis schwarzbraun verwitternden, eisenreichen Gesteinsmaterials aufgesammelt, das als „Bohnerz“ bezeichnet werden kann (Abbildung 1). Bohnerze wurden mehrfach aus den zentralen und östlichen Teilen der Nördlichen Kalkalpen aber auch aus anderen geologischen Einheiten der Ostalpen beschrieben (KAHLER, 1941; SCHAUBERGER, 1952; BAUER, 1954; PICHLER, 1962; ZIRKL, 1965; SEEMANN, 1973, 1979; KAPPELMÜLLER, 2008; KANDUTSCH, 2011). Während Bohnerze vom Eisenerzer Reichenstein bereits in der Vergangenheit kurz beschrieben wurden (BRANDL, 1939), scheint es sich bei jenen vom Reiting um noch nicht näher dokumentierte Neufunde zu handeln.

In dieser mineralogischen Notiz präsentieren wir Ergebnisse der Untersuchung dieses Materials. Die Mineralphasen und die Mikrostrukturen wurden mittels Auflichtmikroskopie, Röntgendiffraktometrie (RDA), EDX und Raman-Spektroskopie identifiziert und analysiert. Wir präsentieren die Ergebnisse dieser mineralogischen Studie und diskutieren, basierend auf der Geologie und Literatur, die mögliche Entstehung dieser Vererzungen.

### **Geologischer Rahmen**

Das Reitingmassiv mit den Gipfeln Göbeck (2214 m), Grieskogel (2148 m), Kahlwandspitze (2090 m) wird aus Kalken des Devons der Reitingdecke aufgebaut (helle Bänderkalke, rötliche Bankkalke vom Typus der Polsterkalke; GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 2005). Diese werden östlich und westlich des Gebirgsstocks mit tektonischem Kontakt unterlagert von einer Abfolge schwach metamorpher altpaläozoischer siliziklastischer Metasedimente („Radschiefer“ – Tonschiefer, Sandsteine, schwarze Kieselschiefer, zwischengeschaltete Metabasiten; Silur), Karbonatgesteinen (Bunter Flaser- und Bänderkalk; U. Devon) und den Eisenerzer Schichten (Schiefer, Sandsteine; Karbon). Diese unterlagernden Gesteinseinheiten gehören der Norischen Decke an, die in der älteren geologischen Literatur der Grauwackenzone zugerechnet wird (SCHÖNLAUB, 1982). Nördlich des Reitingmassivs sind diese Gesteinsabfolgen der Norischen Decke in der Nordrahmenzone in einen komplexen tektonischen Decken- und Schuppenbau variszischen Alters eingebunden (SCHÖNLAUB, 1982, BRYDA, 2009, GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 2010). Zahlreiche Eisenvererzungen, von denen der Steirische Erzberg die mit Abstand wichtigste Lagerstätte darstellt, sind in den devonischen Kalken (v.a., Sauberger Kalk) dieser Nordrahmenzone zu finden (BERAN & THALMANN, 1978; THALMANN, 1979; SCHULZ et al., 1997; PROCHASKA, 2012).

An der Ostseite des Reiting, im Raum westlich/südwestlich von Trofaiach bis Kammern werden diese Gesteinsabfolgen von den neogenen fluviatilen bis flach lakustrinen Sedimenten des Trofaiacher Pull-apart Beckens überlagert, das im Zuge der miozänen lateralen Extrusion der Ostalpen angelegt wurde (GRUBER et al., 2004). An der Basis dieses Sedimentbeckens wurden flach liegende rötliche Konglomerate mit zwischengelagerten Rottonen und Paläoböden abgelagert und es sind auch einige Vorkommen von Braunkohlen in diesem Neogenbecken bekannt (PETRASCHKE, 1924). Im südöstlichen Reitingmassiv wurden Limonitvererzungen westlich Dirnsdorf (Dirnsdorf II) und bei Mochl NW-Fürstenberg abgebaut (IRIS, o.A.). Laut der geologischen Karte (GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT,

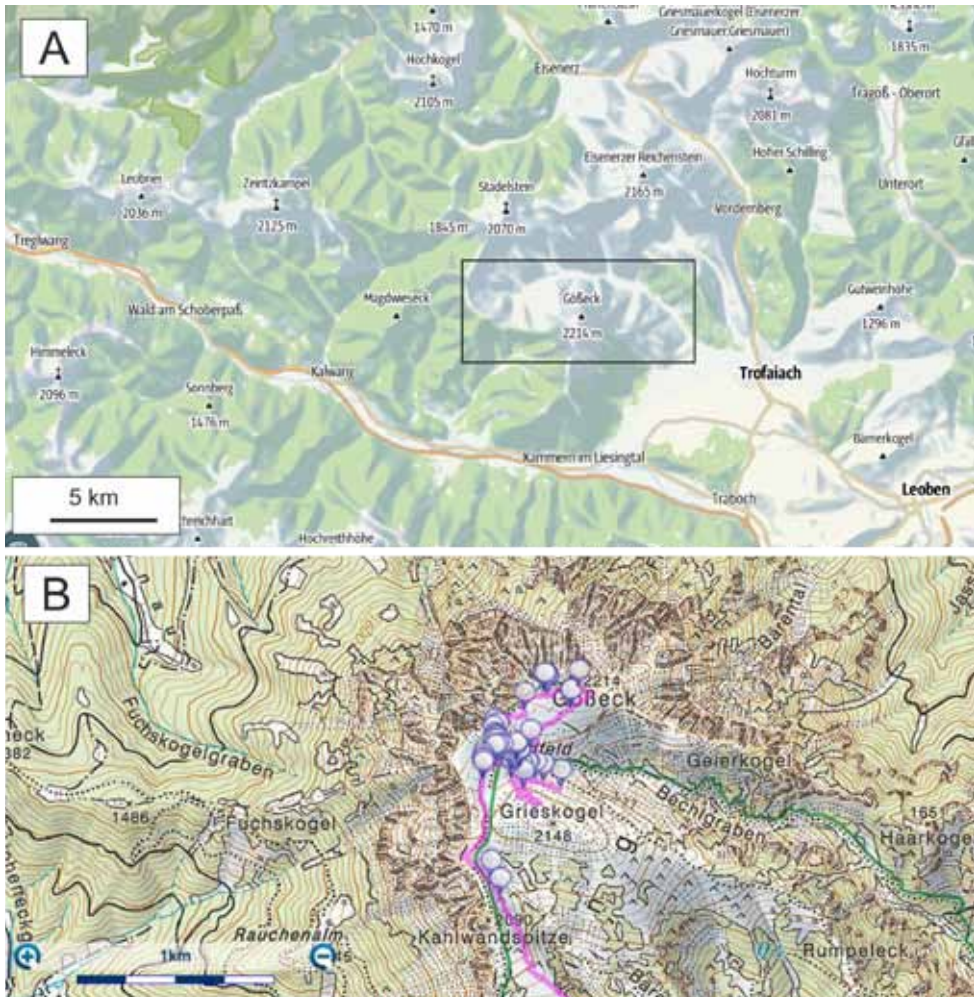


Abbildung 1: Fundpunkte von Bohnerzen im Gipfelbereich des Reiting. Die Fundpunkte liegen zwischen Göbeck, Grieskogel und Kahlwandspitze. Topographische Grundlage von ape@map.

2005) treten diese limonitischen Eisenerze in Kalkbrekzien auf. Sie waren Ziele einer bescheidenen Eisenerzgewinnung zur Versorgung lokaler Eisenwerke in der Umgebung (BRACHER, 1975, WEISS, 1981).

### Fundpunkte

Die Fundstellen liegen auf der topographischen Karte ÖK132 bzw. der entsprechenden geologischen Karte (GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 2005). Die meisten Fundpunkte am Reiting finden sich zwischen Grieskogel und dem Gipfel des Göbeck (Abbildung 1). Das erste Fundstück wurde unmittelbar am markierten Steig, der vom Bechlgraben heraufführt nach der Einmündung des Steiges der vom Rumpelack kommt und unter dem Grieskogel den Hang quert, gefunden. Bei weiteren Begehungen wurden zwischen Göbeck, Grieskogel und Kahlwandspitze



Abbildung 2. Fotos von Handstücken von Bohnerzen.

weitere Fundpunkte lokalisiert. An vegetationsfreien Stellen waren immer wieder, unregelmäßig verteilt, auffallend dunkelbraun bis schwarz gefärbte Stücke mit einer Größe von 2 mm bis zu 30 mm finden. Der südlichste Fundort befindet sich kurz vor der Kahlwandspitze auf 2050 m SH. Ein zweiter Fundstellenbereich liegt auf dem Eisenerzer Reichenstein.

Am markierten Steig nordwestlich der Reichensteinhütte im Höhenbereich zwischen 1900 m und 2100 m sind dort relativ häufig Stücke von Bohnerz ähnlicher Größe wie am Reiting anzutreffen. Ein weiterer, hier nicht näher bearbeiteter Fundpunkt liegt SSE des Lamingegg (1959 m), entlang des Wanderweges zum Hochturm.

### Methoden

Von losen Stücken wurden drei Anschliffe mit den Probenbezeichnungen REIT1 bis 3 hergestellt und mikroskopisch mit einem Zeiss Axioscop Polarisationsmikroskop mit einer digitalen Kamera AxioCamER im Auflicht untersucht und photographisch dokumentiert. Laser Raman spektroskopische Messungen erfolgten mit einem LabRAM HR Evo Gerät der Firma Horiba Scientific am Lehrstuhl für Rohstoffmineralogie der Montanuniversität Leoben (Anregung durch frequenzverdoppelten Nd-YAG Laser, 100 mW 532 nm). Die Mineralphasen wurden durch Vergleich der Spektren mit jenen in der Ruff Datenbank unter Verwendung der Software CrystalSleuth identifiziert (LAFUENTE et al., 2015). Pulver-Röntgendiffraktometrie (RDA) wurden an zwei Proben von der Firma ARP/ECV GesmbH, Leoben, durchgeführt. Die RDA Messungen erfolgten an einem Siemens D500 Diffraktometer; Winkelbereich  $4-64^\circ$  2 Theta, Schrittweite  $0,02^\circ$ , 1 sec. Die quantitativen chemischen EDX Analysen wurden von AGROLAB Austria GmbH, Meggenhofen, durchgeführt. Es wurde ein energiedispersives Röntgenmikroanalyse-System Oxford INCA Energy 250 EDX mit stickstoffgekühltem Si(Li) EDS Detektor und Oxford X-Max 20 EDXA-Auswerteeinheit verwendet.

### Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen

Handstücke des aufgesammelten Materials sind in Abbildung 2 gezeigt. Es handelt sich um eckige bis kantengerundete Komponenten, die bis mehrere Zentimeter groß werden können. Im Gelände fallen sie in dem durch helle Kalksteine dominierten Gebiet durch ihre rostig braunen bis schwarzen Verwitterungsfarben auf, aber auch durch die etwas höhere Dichte. Teilweise ist eine zellig-poröse Struktur erkennbar. Bereits im Auflichtmikroskop lassen sich im Wesentlichen zwei Eisenphasen unterscheiden. Goethit der etwas niedrigeres Reflexionsvermögen und mittelgraue Farbe zeigt und Hämatit mit etwas höherem Reflexionsvermögen und hellergrauen



Farben (Abbildung 3A). Auffällig sind die Mikrogefüge. Einerseits sind Pseudomorphosen nach einer anderen Mineralphase zu erkennen, mit eher rechtwinkligen Querschnitten (Abbildung 3B). Daneben sind euhedrale, zonierte Kristalle erkennbar. Sie zeigen häufig dreieckige Querschnitte und auffälligen Zonarbau (Abbildung 3C). Die Pseudomorphosen von Goethit sind ausgesprochen reich an Poren

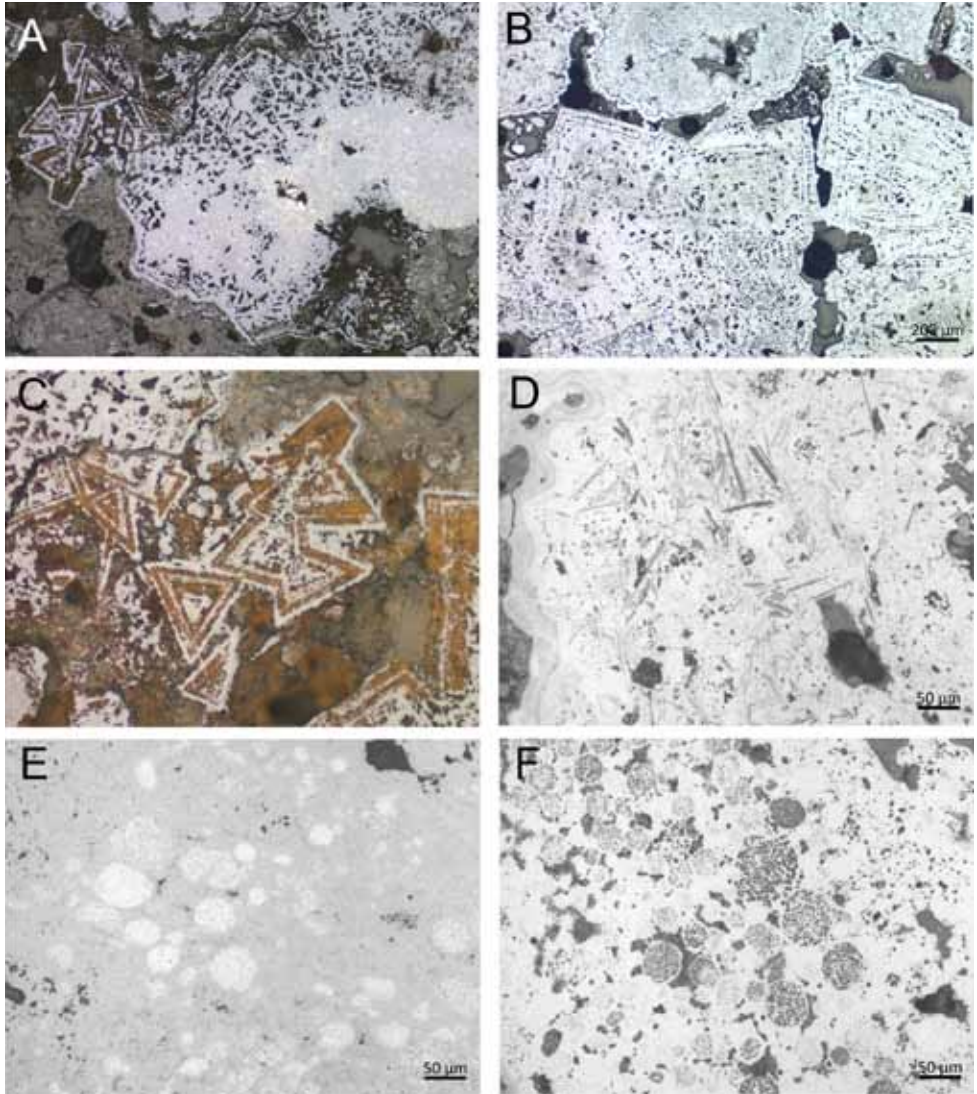


Abbildung 3. Auflicht-Mikrofotos. A. Pseudomorphosen von Goethit nach einem anderen Mineral. Die hellen Einschlüsse sind Hämatit. B. Detail der Pseudomorphosen. Die rechteckigen Querschnitte könnten darauf hinweisen, dass es sich beim Ausgangsmaterial um Pyrit gehandelt hat. C. Detail von A. Dreieckige Querschnitte und Zonarbau in Pseudomorphosen von Goethit. D. Goethit mit länglichen Mineraleinschlüssen. Am linken Rand sind lagig-schalige Strukturen zu erkennen. E. Mikrokügelchen von Hämatit in Goethit, die ihrerseits aus winzigen Nanokügelchen aufgebaut werden. Diese Mikrostrukturen werden als Produkte mikrobieller Prozesse interpretiert. F. Ähnliche Strukturen noch nicht in Hämatit umgesetzt.

und bereichsweise an Einschlüssen und sie zeigen ein netzwerkartiges Interngefüge. Stellenweise sind längliche Einschlüsse eines nicht näher bestimmten Minerals und ein schaliger Aufbau zu erkennen (Abbildung 3E). Runde Mikrostrukturen, die bis ca. 50  $\mu\text{m}$  groß werden, werden aus einer Vielzahl von Mikrokügelchen aufgebaut, die entweder Hämatit sind (Abbildung 3E) oder aus niedrig reflektierendem Material bestehen, das in der Goethitmatix eingebettet ist (Abbildung 3F). Hier werden mikrobielle Strukturen vermutet.

Laser Raman-Spektroskopie erlaubt es die beiden Eisenminerale als Goethit und Hämatit zu bestimmen, wobei teilweise sehr feinkörnige Verwachsungen vorliegen und daher Banden beider Minerale in den Spektren auftreten (Abbildung 4A, B). Die Röntgendiffraktometrie bestätigt zusätzlich diesen Befund. Die RDA Aufnahmen von zwei Proben (nicht gezeigt) ergeben idente Ergebnisse. In beiden Aufnahmen sind die Reflexe Goethit und Hämatit zuzuordnen. Andere Phasen (< 5%) sind nicht nachweisbar.

Ergebnisse der chemische EDX Analyse sind in Abbildung 5 und Tabelle 1 gezeigt. Neben Eisen und Sauerstoff sind Al, Si, Ca und Mn im Prozentbereich nachweisbar.

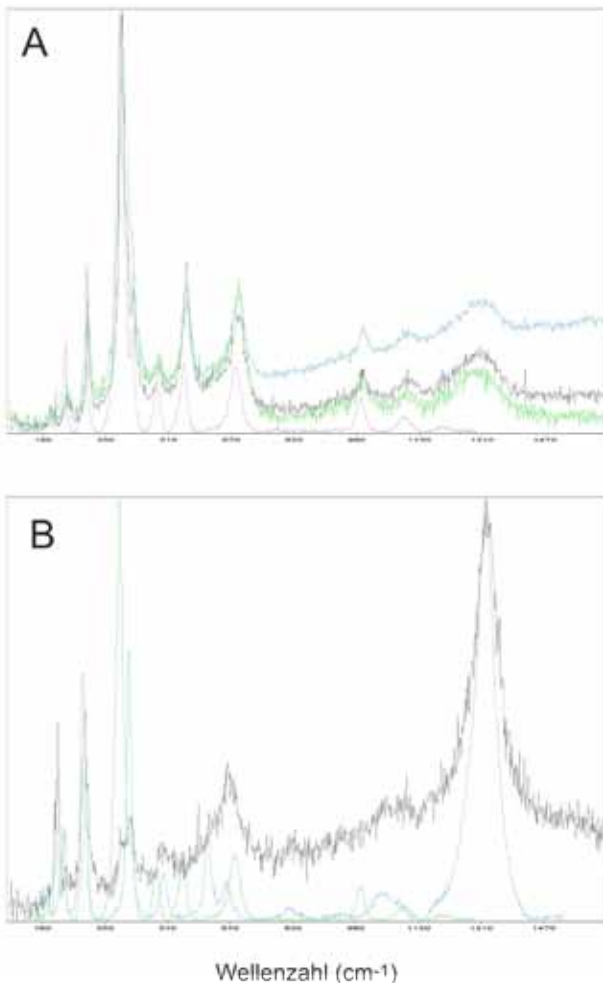


Abbildung 4. Raman-Spektren. A. Drei Spektren von Goethit mit untergeordnet Hämatit (ohne Untergrundkorrektur). Das korrigierte Vergleichsspektrum (unterstes Spektrum) ist Goethit aus der rruuff-Datenbank. B. Spektrum mit Banden von Hämatit (großer Peak bei ca. 1350  $\text{cm}^{-1}$ ) und Goethit mit Vergleichsspektren.

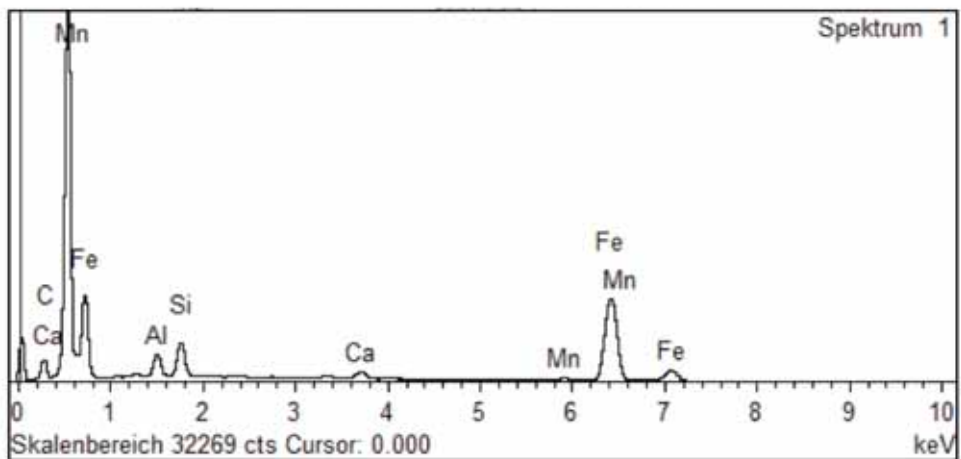
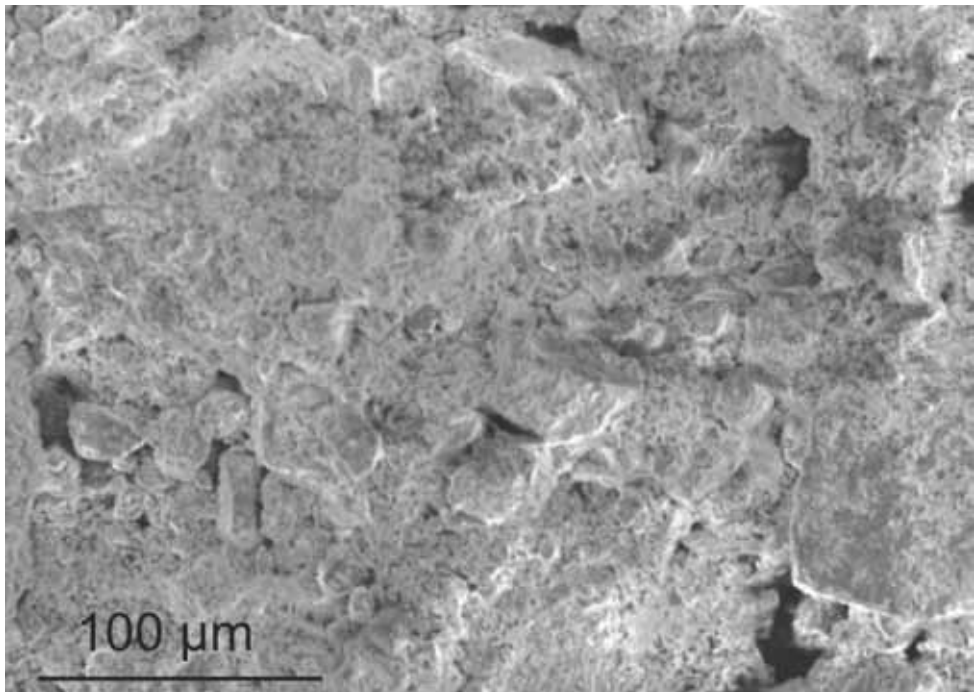
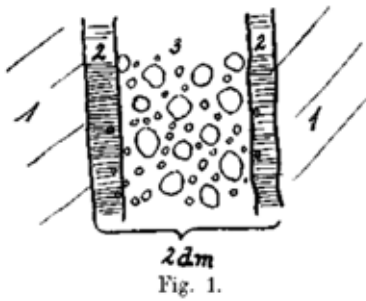


Abbildung 5. Rasterelektronenmikroskopisches Bild des Messbereiches und EDX Spektrum.

## Diskussion

### Regionale Verbreitung von Eisenvorkommen

Die Eisenhydroxide/-oxide Goethit und Hämatit sind sehr häufig vorkommende Eisenminerale und typische, unter oxidierenden Bedingungen an der Erdoberfläche entstehende Verwitterungsprodukte von primären Eisenmineralen. Erwähnenswert scheinen sie in diesem Kontext vor allem wegen der Lokalität. Vom Reiting sind nämlich nach dem Kenntnisstand der Autoren bisher keine Funde von oxidischen/hydroxidischen Eisenerzen beschrieben worden. Im Folgenden wird vorab ein kur-



1 = Vererzter Kalk. 2 = Kalzitkrusten. 3 = Mit Augensteinen und Bohnerzen gefüllte Spalte.

Abbildung 6. Skizze einer mit Augensteinen und Bohnerz gefüllten Karstspalte vom Eisenerzer Reichenstein (aus BRANDL, 1939).

zer Überblick über die im Bereich der Eisenerzer Alpen bekannten Eisenvorkommen und Bohnerzvorkommen gegeben.

Im Umfeld des Steirischen Erzbergs sind im Eisenerzbezirk Norische Decke zahlreiche Fe-Vorkommen bekannt, mit der zentralen Lagerstätte

am Steirischen Erzberg in Eisenerz (IRIS, o.A.). Aus dieser karbonatischen Eisenlagerstätte wurden 2019 ca. 3,2 Millionen Tonnen Eisenerz (Siderit, Ankerit) von der VA Erzberg GmbH gewonnen (MAYER-JAUCK & SCHATZ, 2020). Für die genetische Deutung und zeitliche Einstufung dieser Lagerstätte ist relevant, dass diese Eisenvererzungen nicht auf die devonischen Kalke beschränkt sind, sondern auch Kalkkomponenten in den Brekzien und Konglomeraten der überlagernden Präbichl Formation zum Teil selektiv metasomatisch in Fe-Karbonate umgewandelt wurden. Exzellente Aufschlüsse, die diese metasomatische Verdrängung zeigen befinden sich zum Beispiel bei der Leobener Hütte (1582 m) (BRYDA et al., 2009).

In den südlich der Nordrahmenzone gelegenen Einheiten sind nur wenige Rohstoffvorkommen in IRIS aufgelistet: Es sind dies: die Eisenvererzungen vom Gößgraben – Lins mit Siderit und Limonit; Mochl NW Fürstenberg; Dirnsdorf II. Bei den beiden letztgenannten sind es Limonit und Pyrit, die als Eisenminerale genannt werden. Von Dirnsdorf (Gemeinde Kammern im Liesingtal) wurde auch eine Paragenese mit den Manganmineralen Manganit, Pyrolusit und Todorokit beschrieben (TAUCHER, 1996). Der Nachweis von Mangan in den Eisenerzen vom Reiting ist für die Interpretation der Bildung dieser Vererzung möglicherweise von Bedeutung. Mangan ist ein gängiges Begleitelement von Eisen in den karbonatischen Eisenlagerstätten der Norischen Decke.

Auf den alten Karsthochflächen bzw. in Höhlen der zentralen bis östlichen Nördlichen Kalkalpen sind Vorkommen von Bohnerzen weit verbreitet (BAUER, 1954; SEEMANN, 1979). Der Name „Bohnerz“ bezog sich ursprünglich nur auf die konzentrisch-schaligen PISOIDE von Limonit. Später umfasste dieser Begriff alle Eisenerzbildungen, die in Zusammenhang mit Verkarstung und Karstsedimentation standen. Es handelt sich um limonitische Brauneisenerze, die in unterschiedlichen Typen auftreten (SEEMANN, 1979). Häufig entstanden sie durch Umwandlung der Eisensulfide Pyrit oder Markasit, die sich in Höhlensedimenten bzw. verfüllten Karsthohlräumen gebildet haben und anschließend oxidiert und durch Erosion freigesetzt wurden.

Nur wenige Vorkommen von Bohnerzen sind bisher in den Eisenerzer Alpen und im Hochschwabgebiet bekannt geworden. SEEMANN (1979) nennt „Ooidische Limonitabscheidungen und wenige Pseudobohnerze, die fast ausschließlich in Höhlen auftreten“. Eisenreiche Gerölle wurden in Höhlenablagerungen im Frauenmauer Langstein Höhlensystem beobachtet (KOLMER & GAMERITH,



Tabelle 1. Chemische EDX Analyse der Bohnerze vom Reiting, Elementanalyse normiert auf 100 Masse%. Zusätzlich sind die Atom% und die Oxid-Masse% angegeben.

Element/ Linie	Masse %	Atom %	Oxid	Masse %
Al K	2,63	3,14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,96
Si K	4,06	4,67	SiO <sub>2</sub>	8,69
Ca K	1,30	1,04	CaO	1,81
Mn K	1,23	0,72	MnO	1,59
Fe K	64,47	37,29	FeO	82,94
0	26,31	53,12		
Total	100,00			

1966). Bei diesen Geröllen handelt es sich um mit Hämatit und Limonit zementierte Quarz-Muscovit Gerölle (Typ A) bzw. Hämatit führende Limonit Komponenten (Typ B); letztere entstanden vermutlich durch Verwitterung eines Karbonats. Augensteinfunde in Assoziation mit Bohnerzen sind außerdem vom Trenchtling zwischen Lamingsattel und Hochturm (2081 m) und vom Plateau des Eisenerzer Reichenstein bekannt (BRANDL, 1928, 1939). Wichtig für unsere Studie ist die Beobachtung, dass in den devonischen Kalken auf dem Eisenerzer Reichenstein bis mehrere Meter Spalten auftreten, die mit einer brekziösen Masse ausgefüllt sind in der neben Klasten von Kalken und Werfener Schiefen auch Bohnerze auftreten (Abbildung 6, BRANDL, 1939).

### Entstehung der Bohnerze

Zwei Hypothesen zur möglichen Entstehung der untersuchten Brauneisenerze seien hier kurz diskutiert: (1) Rezente Verwitterung von primären karbonatischen Eisenerzen; (2) Karsteisenerze, die im Zuge von Paläoverwitterung entstanden.

In den Eisenerzer Alpen treten häufig gang-, lager- bis stockartige Vererzungen von Ankerit und Siderit in den paläozoischen Kalken auf. Die größte dieser Lagerstätten am Steirischen Erzberg ist nachweislich seit dem Mittelalter in Produktion (EFFENBERGER & MELCHER, 2017). Kleinere Lagerstätten wie etwa in Radmer waren Ziel historischer Eisengewinnung (BERAN & THALMANN, 1978). Die Meinungen zur Genese dieser Lagerstätten sind immer noch kontrovers. Modellen einer syngenetischen/sedimentären Anlage (BERAN & THALMANN, 1978; SCHULZ & VAVTAR, 1991) stehen solche einer epigenetisch hydrothermal-metasomatischen Entstehung gegenüber; letztere werden durch Geländebeobachtungen, Fluiduntersuchungen und Altersdatierungen untermauert (PROCHASKA, 2016). Im Zuge der Verwitterung kommt es zu einer Oxidation der primären karbonatischen Erze und es entstehen in der Oxidationszone (Eiserner Hut) limonitische Eisenerze. Die Limonitisierung wird in diesem Fall als eine Folge

rezenten Verwitterungsprozesse interpretiert. Der geologische Befund unterstützt dieses Modell für die untersuchten Vorkommen allerdings nicht: Es ist im Gelände kein Zusammenhang der Bohnerzvorkommen mit primären Vererzungen zu erkennen. Die flächenhafte Verteilung der Bohnerze in einem gewissen Höhengniveau über 2000 m Seehöhe kann damit ebenfalls nicht erklärt werden.

Das zweite Modell der Karsteisenerze geht von der Bildung im Zuge einer Paläoverwitterung und Verkarstung aus und interpretiert sie als Bohnerze. Der Begriff Bohnerz, wie er auch in dieser Arbeit verwendet wird, fasst unterschiedliche Typen von Eisenhydroxid reichen Gesteinen zusammen. Es handelt sich um limonitische Brauneisenerze, mit Übergängen von primären Gangerzen über Derberze zu Pseudobohnerzen und Bohnerzen *sensu stricto* (SEEMANN, 1979). Letztere sind eisenreiche runde Konkretionen oder PISOIDE mit schalig-lagigem Aufbau. Das untersuchte Material, dem dieser schalige Aufbau meist fehlt, ist nach der Nomenklatur von Seemann daher eher als Pseudobohnerz zu bezeichnen. Als Ausgangsmaterialien kommen primäre Eisenminerale – vor allem die Eisensulfide Pyrit oder Markasit, Eisenkarbonate oder auch Eisenoxide – in Betracht, die unter speziellen paläoklimatischen Bedingungen einer starken Oxidation unterworfen wurden.

Für die untersuchten Proben ist die Frage des Ausgangsmaterials nicht zweifelsfrei zu klären. Die Goethit Pseudomorphosen mit rechtwinkligen bzw. dreieckigen Kristallumrissen im Anschliff (Abbildung 3 A-C) lassen Pyrit vermuten. Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung fällt allerdings der hohe Gehalt an Mangan (1,6 Masse %) in der untersuchten Probe auf (Tabelle 1). Dies ist für die eigentlichen Bohnerze in den Nördlichen Kalkalpen untypisch, wurde aber von den Gangerzen, die als Ausgangsmaterialien diskutiert wurden bestätigt (ca. 2,8 Masse%, SEEMANN, 1979); dieser Typ der Gangerze ist auch durch die höchsten Gehalte an den chalkophilen Elementen Zn, Pb, Cu gekennzeichnet. Erhöhte Mangangehalte sind aber auch bei Eisenkarbonaten als Ausgangsmaterial zu erwarten. Die primären ankeritischen/sideritischen Erze des Steirischen Erzbergs sind alle durch Mangangehalte im mehrere %-Bereich gekennzeichnet (BERAN, 1975).

Die runden Mikrostrukturen, die ihrerseits aus winzigen Nanokügelchen, -kristallen aufgebaut werden (Abbildung 3 E, F), sind als mikrobiell entstandene Mikrostrukturen zu interpretieren. Ähnliche „Mikrofossilien“ und Framboidpyrite, allerdings aus Fe-Sulfiden, wurden auch von SEEMANN (1979) beschrieben und als solche gedeutet. Schwefelisotopenuntersuchungen mit deutlich negativen  $\delta^{34}\text{S}$  Werten von -23 bis -18‰ an der ersten Pyritgeneration untermauerten diese Interpretation.

Für die Bohnerz-Hypothese spricht auch, dass auch die Fundpunkte am Reiting, ähnlich wie jene am Eisenerzer Reichenstein, vor allem im plateauartigen Gipfelbereich in einer Höhe von ca. 2000 bis 2200 m anzutreffen sind. In beiden Fällen handelt es sich um Teile einer verkarsteten Althochfläche, wie sie in den zentralen und östlichen Nördlichen Kalkalpen (z.B. Dachstein Gebiet) als Zeugen einer weiträumigeren Paläoverkarstung erhalten geblieben sind. Diese heute als Dachstein-Altfläche bezeichnete Karstlandschaft bildete sich im Eozän bis Unteren Oligozän und wurde durch spätere Erosionsprozesse nur mehr eingeschränkt umgestaltet (FRISCH et al., 2002). Nach einer Phase der Absenkung im Oligozän kam es zwischen 30-21 Millionen Jahren zu den ausgedehnten Ablagerungen von terrestrischen Sandsteinen und Konglomeraten der Augenstein Formation, die im Bereich des Dachsteins

ursprünglich mindestens 1,3 km mächtig war, von der heute aber als Folge der Erosion nur mehr die basalen Ablagerungen als Relikte erhalten sind. Mit Beginn der mehrphasigen Hebung der Kalkalpen ab dem Pannon vor etwa 10 Millionen Jahren wurden die Augenstein-Sedimente weitgehend erodiert (FRISCH et al., 2002). Teile wurden in die innerhalb der mächtigen Kalkstöcke entstandenen Höhlensysteme verschwemmt. Bei den Bohnerzkomponenten, die gemeinsam mit den Geröllen von Quarz etc. in den Höhlen und in Karstspalten auftreten, handelt es sich wohl um derart umgelagertes Material. Ein schönes Beispiel für umgelagerte Bohnerze ist von Eisenerzer Reichenstein dokumentiert (Abbildung 6). Dort treten in einer ca. 20 cm breiten Karstspalte Augensteinkomponenten gemeinsam mit Bohnerzen in den erzführenden Kalken des Devons auf (BRANDL, 1939). Über subvertikale Karststrukturen können diese Komponenten, inklusive der Bohnerze, auch in die darunter liegenden Höhlensysteme eingetragen werden; z.B., Frauenmauer-Langsteinhöhle (KOLMER & GAMERITH, 1966). Die Bohnerzbildung muss vor der Heraushebung der Kalkalpen, die im Pannon vor ca. 10 Millionen Jahren einsetzte und vermutlich auch vor der Ablagerung der Augenstein Formation erfolgt sein; i.e., prä-Oligozän im Zuge einer Paläobodenbildung auf verkarstungsfähigen Kalksteinen.

Wie eine derartige in den Alpen nicht mehr erhaltene Schichtfolge ausgesehen haben könnte, lässt sich an der Bohnerz Formation in der Schwäbischen Alp verdeutlichen, der in Süddeutschland und der Schweiz historisch große Bedeutung für die regionale Eisengewinnung zukam (HOFMANN, 1991; KONOLD et al., 2019). Dort werden stark verkarstete Kalke des Jura von einem mehrere Meter mächtigen, Bohnerz-Pisolithe enthaltenden roten Paläoboden überlagert, der seinerseits von siliziklastischen Sedimenten, die in einem terrestrischen bis brackischen Faziesraum abgelagert wurden, überlagert wird (siehe Abbildung 2 in HOFMANN et al., 2017). Bohnerze treten einerseits auf als PISOIDE in Paläoböden, wo sie gemeinsam mit kaolinit- und quarzreichen Sanden und Tonen vorkommen andererseits auch umgelagert in den überlagernden Konglomeraten bzw. in Karstschloten und Karstspalten (WERNER & GERLITZKI, 2019). Die Rottone mit den enthaltenen Pisoiden und Eisenkonkretionen der Bohnerz Formation wurden ursprünglich als residuale Produkte einer lateritischen Verwitterung unter tropischen Bedingungen wie sie während der Oberen Kreide bis ins Untere Eozän herrschten, interpretiert. (U-Th)-He Datierungen und He-Isotopenanalysen an Pisolithen ergeben allerdings Alter, die vom Oberen Eozän bis ins Miozän reichen und legen somit eine mehrere Millionen Jahre andauernde Verwitterung und Umlagerung nahe (HOFMANN et al., 2017). Die Paläoböden werden in dieser neueren Studie nicht als lateritische Bildung, sondern als Terra Rossa Böden, die sich in einem feuchtwarmen subtropischen, mediterranen Klima gebildet haben, interpretiert. Zukünftige Studien müssen zeigen, ob dieses Modell auch auf die Alpen übertragbar ist.

### **Dank**

Für die Herstellung der Anschliffe danken wir Hr. Maik Zimmermann. Die RDA Messungen wurden dankenswerterweise von der Arbeitsgemeinschaft ARP/ECV GmbH, die EDX Messungen von AGROLAB Austria GmbH durchgeführt. Für die editorielle Betreuung der Arbeit bedanken wir uns herzlichst bei Dr. Robert Krickl.

## Literatur

- BAUER, F. (1954). Zur Bedeutung der Augensteine, Bohnerze und pseudomorphosierte Pyrite in den Kalkalpen. Anzeiger Österreichische Akademie der Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, 91, 102-108.
- BERAN, A. (1975). Microprobe analyses of ankerites and siderites from the Styrian Erzberg. Tscherma's Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 22, 250-265.
- BERAN, A. & THALMANN, F. (1978). Der Bergbau Radmer-Buchegg — ein Beitrag zur Genese alpiner Sideritlagerstätten. Tscherma's Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 25, 287-303.
- BRACHER, K. (1975). IV: Waldeisen aus dem Reiting: Ein slawischer Erzberg? Der Leobener Strauß, 8, 37-39.
- BRANDL, W. (1928). Augensteinfundorte auf dem Trenchtling bei Vordernberg in Obersteiermark. Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1928, 98-99.
- BRANDL, W. (1939). Augensteinfundorte auf dem Eisenerzer Reichenstein. Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1939, 126-127.
- BRYDA, G. (2009). Die Geologie des Kartenblattes Eisenerz im Überblick. Arbeitstagung 2009 der Geologischen Bundesanstalt Blatt 101 Eisenerz, Leoben, 31.08. - 04.09.2009, 2009, 11-17.
- BRYDA, G., VAN HUSEN, D., SCHÖNLAUB, H. P. & STROBL, E. (2009). Mittwoch, 02. September Exkursion auf den Polster, Quartär und Hydrogeologie im Raum Eisenerz. Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt Blatt 101 Eisenerz, Leoben, 31.08. - 04.09.2009, 2009, 225-239.
- EFFENBERGER, H. & MELCHER, F. (2017). Exkursion zum Steirischen Erzberg und zu den Radwerken III und IV in Vordernberg. Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 163, 17-27.
- FRISCH, W., KUHLEMANN, J., DUNKL, I., SZÉKELY, B., VENNEMANN, T. & RETTENBACHER, A. (2002). Dachstein-Altfläche Augenstein-Formation und Höhlenentwicklung - die Geschichte der letzten 35 Millionen Jahre in den zentralen Nördlichen Kalkalpen. Die Höhle, 53, 1-35.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2005). Geofast 1:50 000. Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000, 132 Trofaiach, Stand 1999. Wien, Geologische Bundesanstalt Wien.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2010). Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50 000, 101 Eisenerz. Wien, Geologische Bundesanstalt.
- GRUBER, W., SACHSENHOFER, R. F., KOFLER, N. & DECKER, K. (2004). The architecture of the Trofaiach pull-apart basin (Eastern Alps): An integrated geophysical and structural study. Geologica Carpathica, 55, 281-298.

- HOFMANN, F. (1991). Neuere Befunde zur Geologie, zur Lagerstättenkunde und zum historischen Abbau der Bohnerze und Bolustone der Region Schaffhausen (Schweiz). *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen*, 36, 45-81.
- HOFMANN, F., REICHENBACHER, B. & FARLEY, K. A. (2017). Evidence for >5 Ma paleo-exposure of an Eocene–Miocene paleosol of the Bohnerz Formation, Switzerland. *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 168-175.
- IRIS INTERAKTIVES ROHSTOFF-INFORMATIONEN-SYSTEM (o.A.). IRIS Interaktives Rohstoff-Informationen-System, Geologische Bundesanstalt, <http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html>. Zugriff Mai 2021
- KAHLER, F. (1941). Bohnerze und Augensteinfelder in Kärnten. *Carinthia II*, 131/51, 63-69.
- KANDUTSCH, G. (2011). Neues aus der Dobratsch-Südwand. *Carinthia II*, 201/121, 187-202.
- KAPPELMÜLLER, H. (2008). Bohnerz, Hämatit und Eisennieren von der Wurzealm bei Spital am Pyhrn, Oberösterreich. *Oberösterreichische GEO-Nachrichten. Beiträge zur Geologie, Mineralogie und Paläontologie von Oberösterreich*, 23, 6-10.
- KOLMER, H. & GAMERITH, H. (1966). Untersuchungen an hämatitischen und limonitischen Geröllen aus der Langsteinhöhle bei Eisenerz (Steiermark). Ein Beitrag zur Frage der sogenannten „Bohnerze“ in Höhlen. *Mitteilungen der Abteilung für Mineralogie am Landesmuseum Joanneum*, 1966, 58-63.
- KONOLD, W., REGNATH, R. J. & WERNER, W. (2019). Bohnerze. Zur Geschichte ihrer Entstehung, Gewinnung und Nutzung in Süddeutschland und der Schweiz. *Bad Langensalza, Jan Thorbecke Verlag*.
- LAFUENTE, B., DOWNS, R. T., YANG, H. Y. & STONE, N. (2015). The power of databases: the RRUFF project. in: ARMBRUSTER, T. & DANISI, R. M. (Eds.). *Highlights in Mineralogical Crystallography*. Berlin, De Gruyter, 1-30.
- MAYER-JAUCK, H. & SCHATZ, M. (2020). *Österreichisches Montanhandbuch 2020*. Wien, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.
- PETRASCHEK, W. (1924). Kohlengeologie der Österreichischen Teilstaaten. VI Braunkohlenlager der österreichischen Alpen. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 72, 5-48.
- PICHLER, H. (1962). Bohnerz - Augenstein - Breccien auf dem Plateau des Zahmen Kaisers (Kaisergebirge, Tirol). *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 1961, 386-389.
- PROCHASKA, W. (2012). Siderite and magnesite mineralizations in Palaeozoic strata of the Eastern Alps (Austria). *Journal of Alpine Geology*, 54, 309-322.
- PROCHASKA, W. (2016). Genetic concepts on the formation of the Austrian magnesite and siderite mineralizations in the Eastern Alps of Austria. *Geologia Croatica*, 69, 31-38.



- SCHAUBERGER, O. (1952). Neu beobachtete Augensteinvorkommen im östlichen Dachsteingebiet. Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1952, 101-103.
- SCHÖNLAUB, H. P. (1982). Die Grauwackenzone in den Eisenerzer Alpen (Österreich). Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 124, 361-423.
- SCHULZ, O. & VAVTAR, F. (1991). Anlagerungs- und Korngefüge als Merkmale für sedimentär-metamorphe Genese der Sideritlagerstätte Steirischer Erzberg. Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, 13, 215-231.
- SCHULZ, O., VAVTAR, F. & DIEBER, K. (1997). Die Siderit-Erzlagerstätte Steirischer Erzberg: Eine geowissenschaftliche Studie, mit wirtschaftlicher und geschichtlicher Betrachtung. Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, 20, 65-178.
- SEEMANN, R. (1973). Die „Bohnerze“ des Mittagkogels bei Obertraun (Dachstein). Die Höhle, 24, 114-116.
- SEEMANN, R. (1979). Die sedimentären Eisenvererzungen der Karstgebiete der Nördlichen Kalkalpen. Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien, 82, 209-289.
- TAUCHER, J. (1996). Manganit, Pyrolusit und Todorokit vom Reiting, Steiermark. Der steirische Mineralog, 10, 20-22.
- THALMANN, F. (1979). Zur Eisenspatvererzung in der nördlichen Grauwackenzone am Beispiel des Erzberges bei Eisenerz und Radmer/Bucheck. Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1978, 479-489.
- WEISS, A. (1981). Zur Geschichte kleiner Eisenbergwerke in der Umgebung von Leoben: Die Erzversorgung des Gußwerkes St. Stefan. Der Leobener Strauß, 8, 297-310.
- WERNER, W. & GERLITZKI, M. (2019). Die alttertiären Bohnerze von Schlingeng im Markgräferland; Lagerstättenaufbau, chemisch-mineralogische Zusammensetzung, Entstehung. Ergebnisse eines Forschungsprogramms. in: KONOLD, W., REGNATH, R. J. & WERNER, W. (Eds.). Bohnerze. Zur Geschichte ihrer Entstehung, Gewinnung und Nutzung in Süddeutschland und in der Schweiz. Bad Langensalza, Thorbecke Verlag, 65-118.
- ZIRKL, E. J. (1965). Limonit vom Hohen Sarstein, Oberösterreich. Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 10, 256-264.