

## **Genese der Sideritvererzungen der Östlichen Grauwackenzone – aktueller Stand der Forschung**

W. PROCHASKA & F. HENJES-KUNST

### **Inhalt**

Zusammenfassung

Einleitung und geologischer Überblick

Die verschiedenen Typen der Sideritmineralisationen in der Östlichen Grauwackenzone und ihre strukturellen und mineralogischen Charakteristika

    Sideritgänge im Ordovizischen Quarzporphyr

    Metasomatische Sideritkörper in Altpaläozoischen oder Permischen Karbonatgesteinen

    Gangförmige Sideritvererzungen in Permoskythischen siliziklastischen Nebengesteinen

Die chemischen Charakteristika der mineralisierenden Fluide

Die SEE-Verhältnisse der Sideritmineralisationen am Steirischen Erzberg

Die zeitliche Einstufung der Vererzungen

Das genetische Modell

Literatur

### **Zusammenfassung**

Die Sideritlagerstätten der Östlichen Grauwackenzone sind ausschließlich an Altpaläozoische Serien der Norischen Decke gebunden. Die Form der Erzkörper ist bei den verschiedenen Lagerstätten bzw. Vorkommen unterschiedlich und von der Lithologie der Nebengesteine (Stöcke, Gänge, Lagergänge) abhängig. Bei den Vererzungen in den Altpaläozoischen Karbonaten tritt neben Siderit als Erzmineral auch Ankerit auf und bildet stockartige Erzkörper mit diskordanten Kontakten zu den kalkigen Nebengesteinen. Bei den gangförmigen Lagerstätten im Porphyroid und in siliziklastischen Permischen Sedimenten tritt offensichtlich in höheren Bereichen der Mineralisationen auch Hämatit als das häufigste Erzmineral auf.

Alle untersuchten Vererzungen weisen sehr ähnliche Fluidcharakteristika auf. Die Einschlussfluide in den Sideriten bzw. in den Gangartmineralen sind hochsalinar (20 bis 30 % NaCl<sub>Äquiv.</sub>) und sind in Bezug auf Halit sehr stark fraktioniert. Dadurch kommt es zu einer starken Bromidanreicherung im Fluid, ein sehr wichtiger Indikator für die evaporitische Herkunft der vererzenden Lösungen. Demzufolge liegen die Fluidzusammensetzungen im Na-Cl-Br-Diagramm auf dem „Evaporationstrend“, wobei die Proben vom Erzberg die stärksten Br-Anreicherungen zeigen.

Die Siderite und Ankerite des Erzbergs weisen eine einheitlich positive Eu-Anomalie auf. Diese SEE-Muster sind Indiz für eine einphasige hydrothermale Bildung unter niedrigtemperierten Bedingungen und ohne durchgreifende spätere Überprägung bzw. Rekristallisation. Unterschiede im Sm/Nd-Verhältnis der Siderite, Ankerite und der tonig-organischen Matrix erlauben eine Datierung nach der Sm-Nd-Isochronenmethode. Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen lässt sich für die Sideritmineralisationen des Steirischen Erzbergs ein Obertriadisches Alter von  $208 \pm 22$  Ma bestimmen.

Auf Grund dieser Beobachtungen kommen für die Sideritbildung in der Östlichen Grauwackenzone Permische bis Untertriadische evaporitische Wässer in Betracht, die bei der Sedimentation dieser Gesteine als Formationswässer in diesen Serien fixiert wurden. Erst bei der Erhöhung des Drucks durch die diagenetische Auflast der Sedimentation der Mesozoischen Plattformkarbonate und der Schließung der Porenräume in der Obertrias wurden diese Fluide während der Diagenese mobilisiert. Diese reduzierenden, hochsalinaren, sauren Lösungen konnten während der Migration durch das Nebengestein Metalle (u.a. Fe) aufnehmen und als Chloridkomplexe transportieren. Je nach Kompetenz und Reaktionsfähigkeit der Gesteine wurden verschiedene Formen von Vererzungen gebildet.

Die Ähnlichkeit der Fluidcharakteristika und die innerhalb des analytischen Fehlers gleichen Bildungszeiten dieser Sideritlagerstätten, der Spatmagnesite der Grauwackenzone und der Bleiberger Pb-Zn-Vererzungen lassen ein einheitliches metallogenetisches Ereignis für die Bildung aller dieser Lagerstätten vermuten.

### **Einleitung und geologischer Überblick**

Es werden hier in der Folge nur jene geologischen Charakteristika diskutiert, die für die Sideritvererzungen der Grauwackenzone von Belang sind. Grundlegende generelle Untersuchungen zur Geologie der Grauwackenzone wurden u.a. von SCHÖNLAUB (1982) und NEUBAUER et al. (1994) durchgeführt.

Die Grauwackenzone bildet die primäre paläozoische Basis der Nördlichen Kalkalpen, wobei der ursprüngliche Verband meist tektonisch mehr oder weniger gestört ist. Besonders die Östliche Grauwackenzone ist durch einen intensiven Alpidischen Schuppenbau gekennzeichnet. Durch SCHÖNLAUB (1982) wurde ein Variszischer Decken- und Schuppenbau nachgewiesen, wobei besonders am Erzberg-Profil gezeigt wurde, dass der Variszische Schuppenbau durch die Präbichlschichten plombiert wurde. Der stratigraphische Umfang der Serien der Norischen Decke reicht vom Ordovizium bis ins Karbon.

Die Sideritvorkommen der Östlichen Grauwackenzone treten ausschließlich in dieser höheren tektonischen Einheit, der Norischen Decke auf. Die gesamte Serie der in der Norischen Decke auftretenden Gesteinsabfolgen (Karbonate, Metapelite, Quarzporphyre etc.) ist in unterschiedlichem Ausmaß von dem mineralisierenden Ereignis erfasst. Im Gegensatz dazu sind die Spatmagnetitvererzungen an die tiefere tektonische Einheit der Veitscher Decke gebunden. Die Form der Erzkörper hängt von der Kompetenz und Reaktionsfähigkeit des Nebengesteins ab. In den karbonatischen Nebengesteinen treten hauptsächlich stockförmige Erzkörper auf, während in den siliziklastischen und magmatischen Nebengesteinen gangartige Erzkörper vorliegen. Im Allgemeinen ist der Grad der Metamorphose gering und die Auswirkungen einer Alpidisch-metamorphen Überprägung der Erzkörper sind an Brüche und Störungen gebunden, wo metamorphe Fluide bevorzugt zirkulieren konnten.

Im Gegensatz zu den Sideritvorkommen sind die Spatmagnetitvererzungen in der Östlichen Grauwackenzone an die tiefere tektonische Einheit der Veitscher Decke gebunden. Aber schon früh (z.B. REDLICH, 1907; PETRASCHECK, 1932) wurde die Möglichkeit einer gemeinsamen Entstehung der Siderit- und Spatmagnetitlagerstätten wegen verschiedener großer Ähnlichkeiten dieser Vererzungen diskutiert.

Die Meinungen zur Genese und zur geodynamischen Stellung der Sideritvererzungen der Östlichen Grauwackenzone und im Besonderen des Steirischen Erzbergs sind seit langem sehr widersprüchlich. Die frühen Bearbeiter in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts bevorzugten syngenetische Modelle, während danach bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts epigenetische Vorstellungen entwickelt wurden. Mit der Entdeckung rezenter Vererzungsvorgänge vom Typ „Black Smoker“ wurden in der Folge auch solche sedimentär exhalative, also syngenetische Erklärungen für die Bildung der gegenständlichen Lagerstätten herangezogen. In den letzten beiden Jahrzehnten wurden wieder verstärkt hydrothermal-metasomatische Modelle publiziert. Von Vertretern syngenetischer Modelle wird zur Erklärung der vorherrschenden epigenetischen Vererzungsstrukturen häufig eine nicht näher definierte „Remobilisation“ angeführt. Dazu gibt es aber keine nachvollziehbaren Beobachtungen. Es wäre auch nicht zu erklären, warum nur die Siderite bzw. Magnesite von einem derartigen Ereignis betroffen wären, während die kalkigen Nebengesteine keine derartigen Überprägungen zeigen. Weiters fehlen in der Obertrias entsprechende thermische Ereignisse, die Eoalpine Metamorphose kann dafür jedenfalls nicht herangezogen werden, da ein sideritbildendes Ereignis nach der Deckenstapelung auch jüngere Mesozoische Serien erfasst hätte.



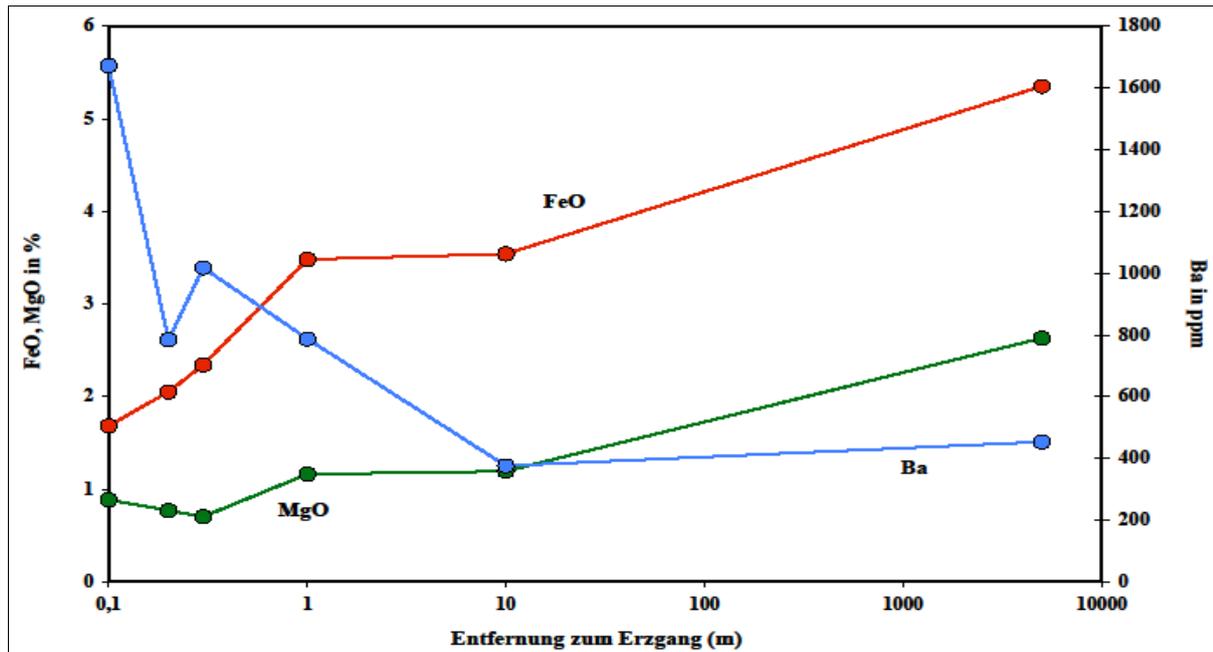


Abb. 2: Alterationsprofil und Übergang vom Erzgang in den nicht alterierten Porphyroid in der ehemaligen Lagerstätte Schendleck.

### Metasomatische Sideritkörper in Altpaläozoischen oder Permischen Karbonatgesteinen

Dieser Typ von Sideritlagerstätten ist der bedeutendste in der Östlichen Grauwackenzone und dazu gehört mit dem Steirischen Erzberg auch eine der größten Sideritlagerstätten der Welt. Die mächtigen Sideritkörper sind hier an feinkörnige, praktisch unmetamorphe Kalke Devonischen Alters gebunden oder in geringerem Ausmaß an die von kalkigen Komponenten dominierte Basisbrekzie. Es sind im Bereich des Erzbergs allerdings auch noch alle anderen im Lagerstättenbereich auftretenden Lithologien vererzt (Abb. 3).

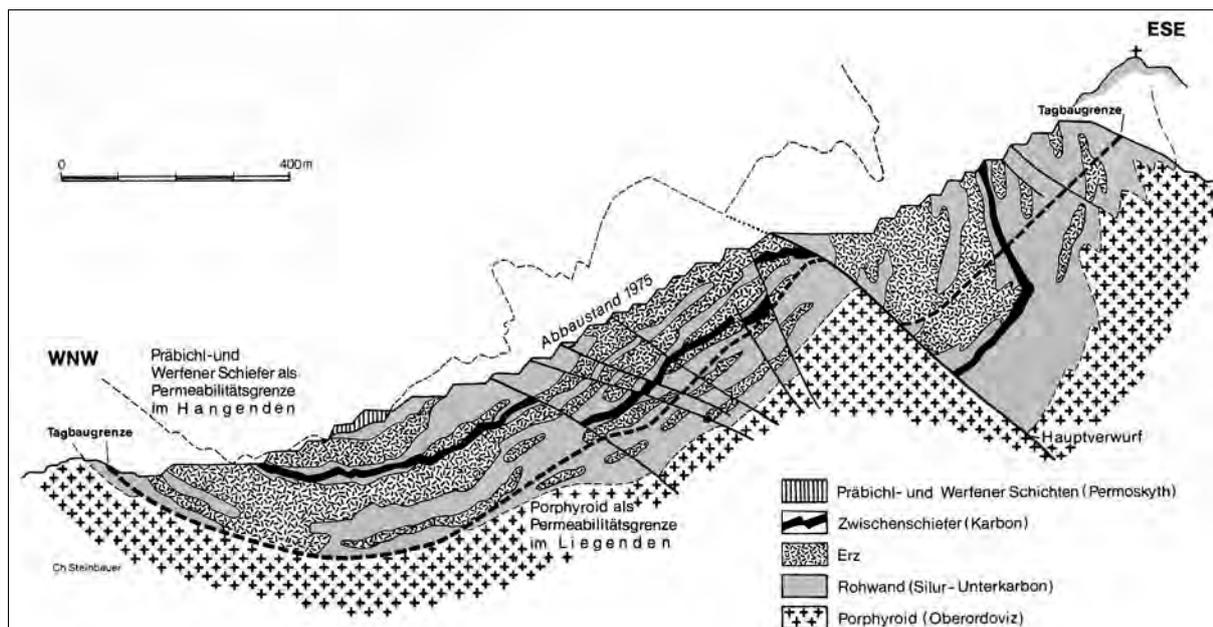


Abb. 3: Erzbergprofil: Schematisches Profil durch die Sideritlagerstätte am Steirischen Erzberg (OBERHAUSER, 1980).

Epigenetisch-metasomatische Strukturen sind vorherrschend. So zeigen die Erzkörper und Erzlinsen üblicherweise diskordante Kontakte zu den kalkigen Nebengesteinen. Entlang der Schichtung und Bankung der Kalke treten Lagergänge auf, es sind aber auch Gangstrukturen in den Karbonaten zu finden.



Abb. 4: Diskordante Kontakte der Sideritkörper zum umgebenden Altpaläozoischen Kalk und Lagergänge in das Nebengestein entlang der Schichtung (Photo: F. EBNER).

Wegen der Dichtigkeit und der hohen Reaktionsfähigkeit der Kalke sind an diesen Kontakten kaum Alterationen zu finden. In der Nähe zu den Kalken treten aber gehäuft ankeritische Beimengungen auf. Grobkörnige, regellose Erztexturen herrschen dort vor, wo Gänge gebildet wurden oder wo hydrothermale Siderite in Lösungshohlräumen abgesetzt wurden (z.B. Zebrastrukturen, siehe Abb. 5), während metasomatische Erze, wie z.B. Silikaterze, in der Regel feinkörnig sind. Dazu gehören auch die feinkörnigen, gebänderten Erze, die von verschiedenen Autoren aus dem ehemaligen Bergbau Radmer beschrieben wurden (BERAN, 1975, 1977, 1979; SCHULZ et al., 1997) und deren ursprüngliche sedimentäre Bänderung bei der Sideritmetasomatose übernommen wurde. Diese Erzstrukturen gaben Anlass zu der Entwicklung syngenetischer Entstehungsmodelle der Vererzungen (Abb. 6). Die von BERAN und THALMANN (1978) untersuchten Originalproben wurden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel „Die chemischen Charakteristika der mineralisierenden Fluide“). Im Allgemeinen weisen diese gebänderten, feinkörnigen Erze höhere Anteile an siliziklastischen Beimengungen auf.

Die Vererzungen in der karbonatischen Basisbrekzie bilden ähnlich wie in den Altpaläozoischen Karbonaten wolkig-diffuse 3-dimensionale Erzkörper und Erzlinsen. Bei vollständiger metasomatischer Überprägung werden sowohl die Matrix als auch die Kalkkomponenten vererzt. Die Kalke werden zu Siderit umgewandelt, während die Serizit- bzw. Illitkomponenten der Matrix zu Chlorit umgewandelt werden. Die hydrothermale Natur dieser Vererzungen ist besonders schön dort zu sehen, wo die metasomatische Front zum Stillstand kam und gelegentlich einzelne Komponenten durchschneidet (Abb. 8).

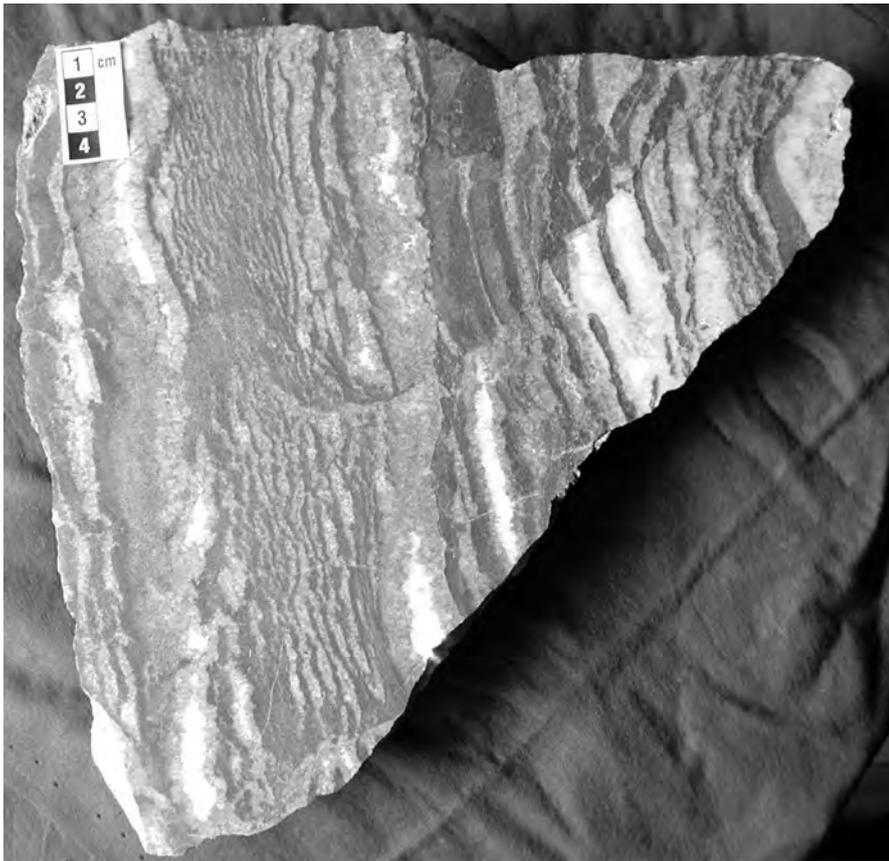


Abb. 5: Hydrothermale Bänderung von fein- und grobkörnigem Siderit und Ankerit, typische „Zebrastruktur“.

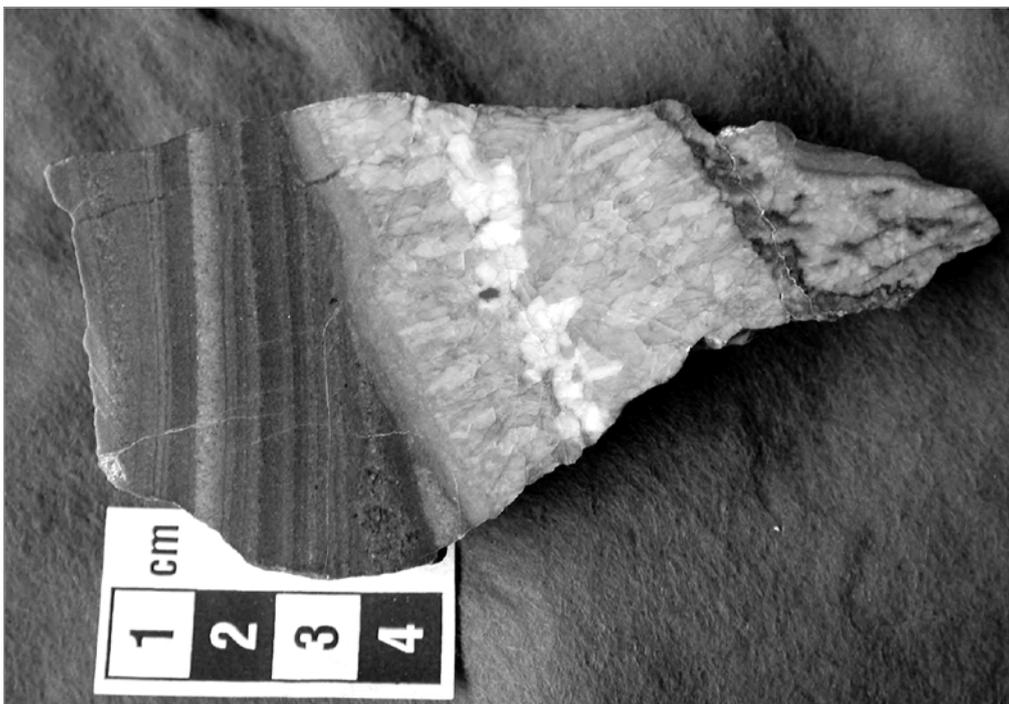


Abb. 6: Feinkörnige, gebänderte Eisenerze der ehemaligen Sideritlagerstätte Radmer.



Abb. 7: Teilweise zu Siderit umgewandelte Basisbrekzie vom Steirischen Erzberg. Die metasomatische Front verläuft mitten durch einzelne Kalkkomponenten.

Allgegenwärtig sind kleine, idiomorphe Quarzkristalle, die entweder übernommene authigene Quarze aus dem Altbestand der Flaserkalke sind (Abb. 6) oder aber Neubildungen im Zuge der hydrothermalen Aktivität. Diese idiomorphen Quarzkristalle beweisen jedenfalls das Fehlen einer nennenswerten durchgreifenden Überprägung der Vererzung. Das einzige Erzmineral von ökonomischer Bedeutung ist Siderit, es treten aber untergeordnet häufig Ankerithöfe um die Vererzungen auf. Untergeordnet sind auch geringe Anteile an Quarz, Hämatit und Schwespat zu finden. Kupferkies, Fahlerze und Zinnober ebenfalls zusammen mit Quarz sind Teil einer späteren, sekundären Paragenese.

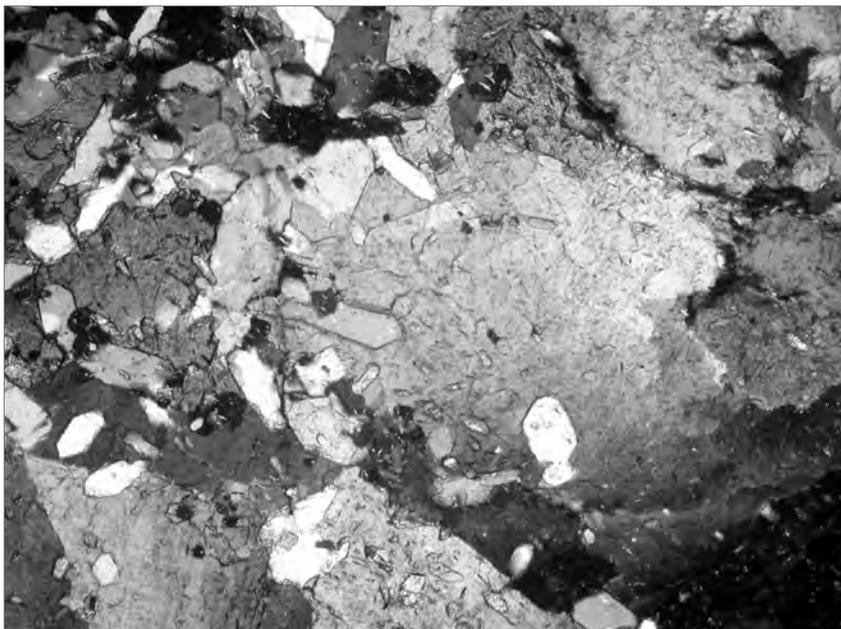


Abb. 8: Idiomorphe Quarze im Schiefererz vom Steirischen Erzberg.

### ***Gangförmige Sideritvererzungen in Permoskythischen siliziklastischen Nebengesteinen***

Zahlreiche Fe-Vererzungen treten in der Östlichen Grauwackenzone in Permoskythischen siliziklastischen Nebengesteinen auf. Als typische Vertreter wurden im Zuge der laufenden Arbeiten die ehemaligen Siderit- bzw. Hämatitlagerstätten Grillenberg, Sohlenalm, Gollrad, und Altenberg untersucht. Die Vererzungen treten in Quarzkonglomeraten, Arkosen, Sandsteinen und schieferigen Gesteinen auf. Entsprechend der Kompetenz und der geringen Reaktionsfähigkeit der siliziklastischen Nebengesteine findet man in den Sandsteinen, Quarzkonglomeraten und Schiefern ausschließlich gangförmige Strukturen. Nebengesteinsalterationen sind sehr untergeordnet zu finden und treten nur auf, wenn diese Gänge Arkosen durchschlagen (z.B. Grillenberg).

Im Zusammenhang mit den Permischen Konglomeraten und Brekzien wurde immer wieder die Frage nach dem Auftreten von Siderit- oder Magnesitklasten diskutiert. Es ist die Tatsache erwähnenswert, dass am Steirischen Erzberg keine einzelnen Sideritkomponenten in den Präbichlgesteinen auftreten. Bei den schwarzen, spätigen, Fe-reichen Magnesitkomponenten im Präbichlkonglomerat, wie sie z.B. im Rötzgraben auftreten (G. BRYDA, mündl. Mitteilung), scheint es sich um saline Bildungen aus dem Haselgebirge zu handeln bzw. um ähnliche Magnesitmineralisationen, wie sie im Kaswassergraben auftreten.

Besonders bei diesem Typ von Fe-Lagerstätten tritt neben Siderit auch häufig Hämatit als wichtiges Erzmineral auf, was bis zur Bildung von Hämatitlagerstätten führen kann.

### **Die chemischen Charakteristika der mineralisierenden Fluide**

Um die Natur und die ursprüngliche Charakteristik und Herkunft der vererzenden Lösungen zu untersuchen, wurden Fluideinschlüsse sowohl direkt an den Vererzungen als auch an Gangartmineralen und Nebengesteinen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Einschlussfluide durch mechanisches Aufbrechen der Einschlüsse freigesetzt und mit Deionat extrahiert. Die angewandte Methode der Fluidextraktion folgt mit geringen Abweichungen den Angaben von BOTTRELL et al. (1988). Im Anschluss erfolgte die Analyse von signifikanten Kationen und Anionen mittels Ionenchromatographie. Diese Methode wurde in der Vergangenheit sehr erfolgreich bei der Untersuchung von Mississippi-Valley-Type-Lagerstätten eingesetzt (z.B. KESLER et al., 1996) und eignet sich sehr gut, um meteorische Wässer, Meerwasser und evaporitische Wässer zu unterscheiden. Es wird hier in der Folge nur das sehr aussagekräftige Na-Cl-Br-System diskutiert, das sich wegen des konservativen und inkompatiblen Verhaltens von Br sehr gut eignet, Evaporationsprozesse in Paläofluiden zu erkennen. Die chemischen Veränderungen von Meerwasser bei Eindampfungsprozessen wurde besonders von McCAFFEREY et al. (1987) untersucht. Trotz der ähnlichen Ionenradien von Cl und Br ist das Fraktionierungsverhalten dieser beiden Elemente bei Evaporationsprozessen sehr unterschiedlich. Ab einem Evaporationsindex von 10 wird Halit ausgefällt und damit Na und Cl dem residualen Meerwasser entzogen. Bei fortschreitender Evaporation steigen ab diesem Zeitpunkt die Na/Br- und Cl/Br-Verhältnisse stetig an, da das inkompatible Br in der Restlösung bleibt und nicht mit Evaporitmineralen ausgefällt wird.

Im Na/Br-Cl/Br-Diagramm (Abb. 9, 10) wird diese Fraktionierung für die verschiedenen untersuchten Sideritmineralisationen der Östlichen Grauwackenzone einschließlich der Lagerstätte am Steirischen Erzberg wiedergegeben. Alle untersuchten Sideritvorkommen der Östlichen Grauwackenzone weisen gegenüber Meerwasser in unterschiedlichem Ausmaß erhöhte Br-Gehalte auf. Abb. 9 zeigt, dass die Position der analysierten Proben auf dem „Evaporationstrend“ liegt. Die unterschiedlichen Positionen der einzelnen Lokalitäten in diesem Trend lassen sich durch unterschiedliche Evaporationsindizes erklären oder aber durch Interaktion des Fluids mit den Nebengesteinen oder mit Kluftwässern des Nebengesteins.

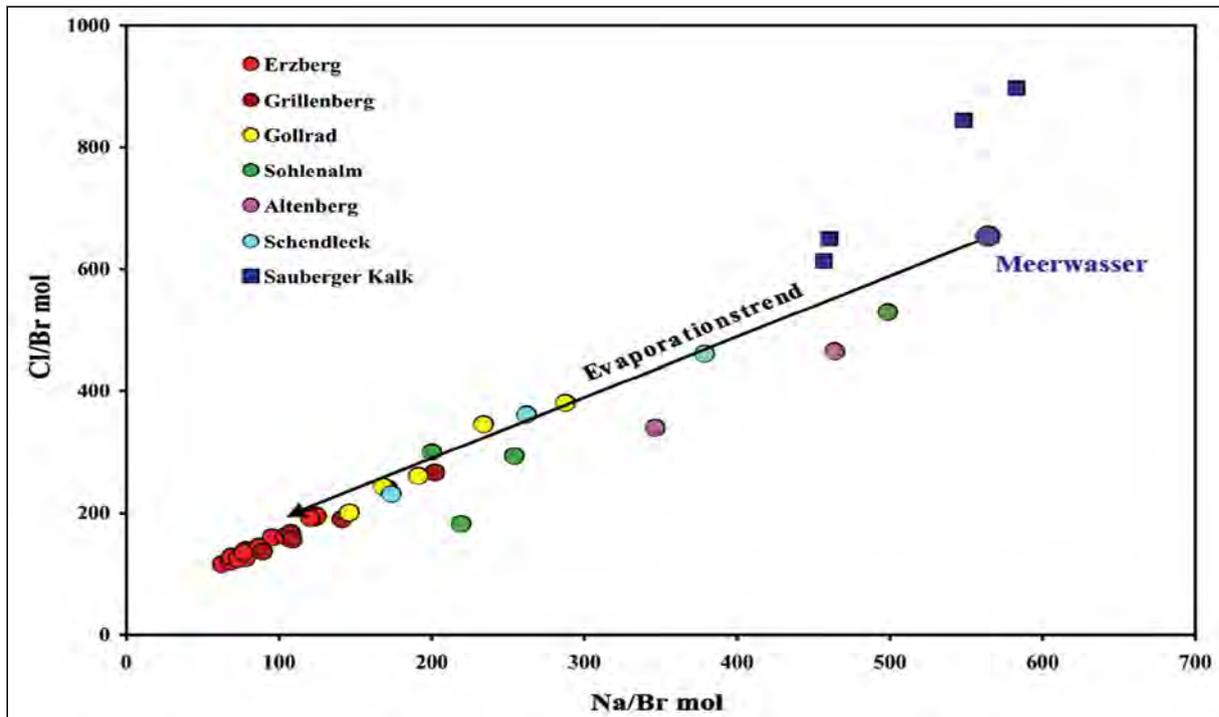


Abb. 9: Na-Cl-Br-Diagramm der untersuchten Sideritmineralisationen der Östlichen Grauwackenzone.

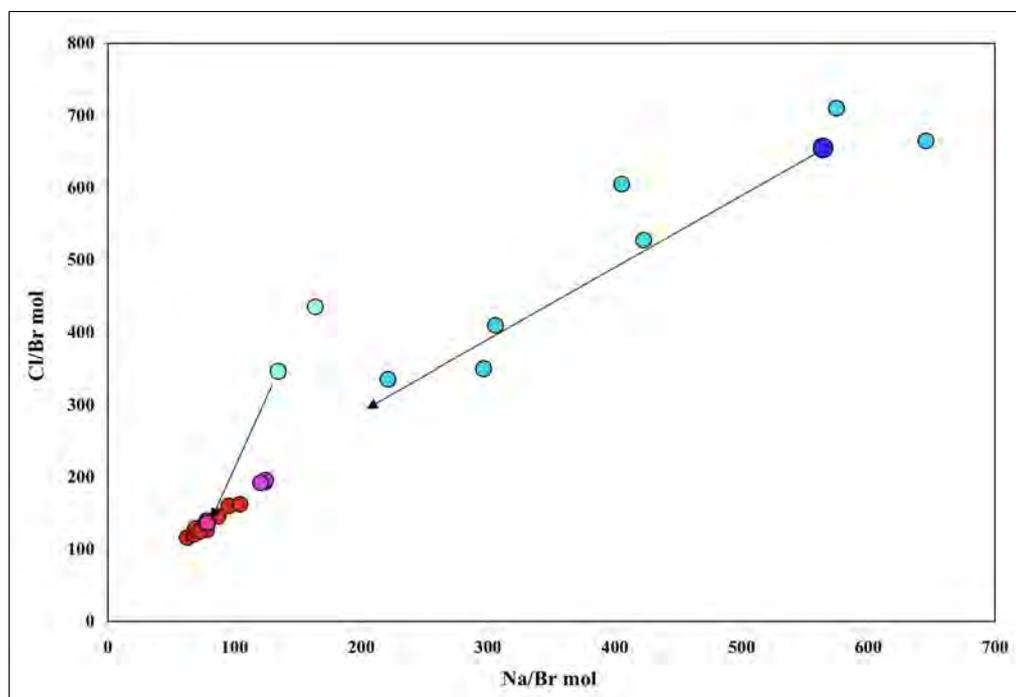


Abb. 10: Na-Cl-Br-Diagramm von Proben aus verschiedenen vererzten und nicht vererzten Lithologien des Steirischen Erzbergs.

In Tab. 1 sind die Na-Cl-Br-Verhältnisse der Proben vom Erzberg wiedergegeben. Die stärksten Fraktionierungen und Br-Anreicherungen von allen untersuchten Sideritmineralisationen zeigen die Proben vom Steirischen Erzberg. Eine Sideritprobe aus vererzter Basisbrekzie unterscheidet sich nicht von den Sideriten aus den Devonischen Karbonaten. Drei untersuchte Ankeritproben liegen so wie

die Siderite am Evaporationstrend, nehmen im Diagramm aber offensichtlich eine Zwischenstellung zu den Kalken ein (Abb. 10).

	Na/Br molar	Cl/Br molar
Kalke aus dem Nebengestein (Sauburger Kalk)	221 – 646	335 – 710
Kalke aus dem Nebengestein (Basisbrekzie)	134 – 164	346 – 435
Ankerit	120 – 124	192 – 196
Siderit	63 – 104	116 – 162
Meerwasser	564	655

Tab. 1: Die molaren Na-Cl-Br-Verhältnisse der untersuchten Proben vom Steirischen Erzberg

Die Proben der unvererzten Kalke des Nebengesteins stammen ebenfalls aus dem Bereich der Lagerstätte aus unterschiedlichen Entfernungen zu den Vererzungen. Ihre Fluidzusammensetzung liegt z.T. im Bereich des Meerwassers, während einige Proben offensichtlich teilweise vom hydrothermalen Ereignis erfasst wurden und einen Trend in die Richtung der Sideritzusammensetzung zeigen. Für die vom generellen Trend abweichende Zusammensetzung von zwei Kalkkomponenten aus der Basisbrekzie gibt es zur Zeit keine Erklärung.

### Die SEE-Verhältnisse der Sideritmineralisationen am Steirischen Erzberg

Im Folgenden werden die Ergebnisse von noch laufenden geochemischen Untersuchungen an Kalken, Sideriten und Ankeriten aus dem Bereich des Steirischen Erzbergs vorgestellt. Da die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind, können hier nur vorläufige Ergebnisse vorgestellt werden.

Die Kalke aus dem Umfeld des Erzbergs zeigen chondritnormierte SEE-Muster mit deutlicher Anreicherung der leichten SEE gegenüber den schweren SEE (Lan/Lun ca. 5–10) und leicht negativen Ce- und Eu-Anomalien (Fig. 11a), wie sie typisch sind für marin unter oxischen Bedingungen gebildete Karbonate (z.B. NOTHDURFT et al., 2004; MADHAVARAJU & RAMASAMY, 1999). Die zwei Kalkklasten aus der Permoskyth-Brekzie weisen gegenüber den anderen Kalkproben (Sauburger Kalk, Flaserkalk, Kalk aus dem Erzkörper) zwar deutlich niedrigere SEE-Gehalte auf, zeigen aber ebenfalls die für marine Kalke typischen SEE-Muster. Variationen in den Absolutgehalten der SEE bei ansonsten vergleichbaren SEE-Mustern werden auch bei Kalken z.B. aus der Veitscher Decke beobachtet. Sie sind ebenfalls von marinen Kalken bekannt (z.B. NOTHDURFT et al., 2004). Siderit ( $\pm$  Ankerit) zeigt dagegen von den schweren (Lu, Yb) zu den mittleren (Gd, Sm) SEE flach verlaufende SEE-Muster und dann zu den leichten SEE (La, Ce) abnehmende Werte in der chondritnormierten Darstellung (Fig. 11b). Allen Siderit- und Ankeritproben gemein ist die leicht positive Eu-Anomalie (Fig. 11b, c). Nach BAU und MÖLLER (1992) und MÖLLER (pers. Mitt.) kann die positive Eu-Anomalie nur durch eine hochtemperierte hydrothermale SEE-Mobilisierung und -fraktionierung mit anschließender Ausscheidung der Fe-Karbonate unter relativ niedrigen Temperaturen erklärt werden.

Detailuntersuchungen zeigen, dass der buckelförmige Verlauf der Muster im Bereich der mittleren SEE (chondritnormiert) einschließlich der positiven Eu-Anomalie bei Ankerit ausgeprägter ist als bei Siderit (Fig. 11c). Das Ausmaß der Abreicherung der leichten SEE und die Anreicherung im Eu bei den Sideriten und Ankeriten wird noch deutlicher, wenn ihre SEE-Konzentrationen relativ zu den mittleren SEE-Konzentrationen der Kalke vom Erzberg gerechnet werden (Fig. 11d). Einzig der Siderit aus dem Erzgang im alterierten Porphyroid zeigt ein andersartiges chondritnormiertes SEE-Muster (Abb. 11e) mit einer ausgeprägten Anreicherung der leichten SEE. Ein Vergleich der im Gestein leicht löslichen Anteile der SEE von nicht alteriertem Porphyroid und alteriertem Porphyroid, beide aus dem direkten Umfeld des Steirischen Erzbergs, belegt weiterhin die signifikante Abreicherung dieser Ele-

mente während der Alteration. Interessanterweise entspricht das Verhältnis der SEE von nicht alteriertem Porphyroid zu alteriertem Porphyroid, d.h. der Grad der SEE-Abreicherung, weitgehend dem chondritnormierten SEE-Spektrum (einschließlich der leicht positiven Eu-Anomalie) eines Sideritgangs im alterierten Porphyroid (Abb. 11e). Da es sich hierbei um eine Einzelprobe handelt, kann über die Signifikanz dieser unterschiedlichen SEE-Muster nur spekuliert werden. Die tonig-organische Matrix der Siderite vom Erzberg zeigt eine deutliche Anreicherung der leichten SEE relativ zu den mittleren und schweren SEE (Lan/Lun ca. 10, Fig. 11f).

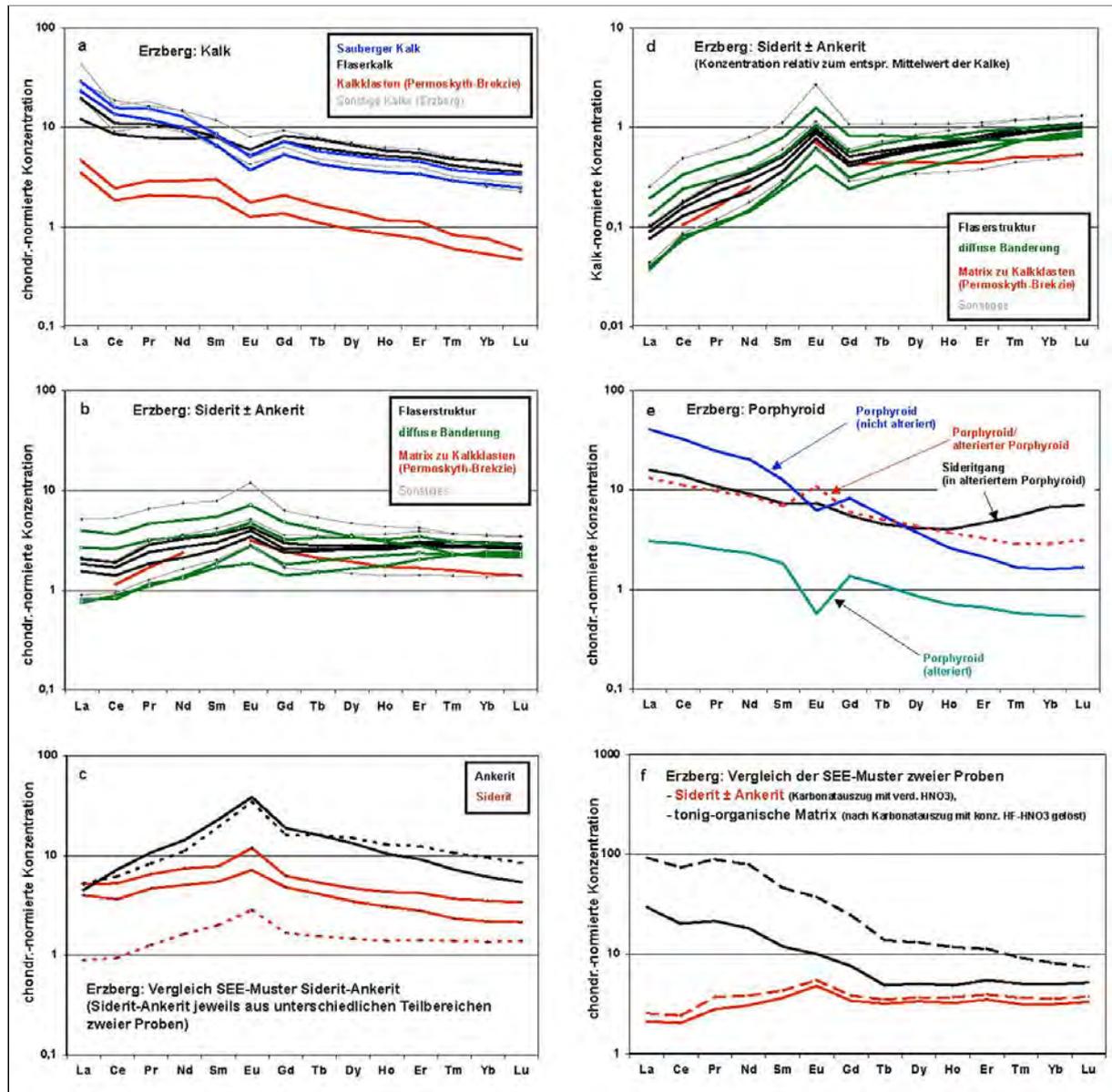


Abb. 11: Chondritnormierte bzw. karbonatnormierte Konzentrationen der Seltenerdelemente (SEE) aus dem Bereich des Steirischen Erzbergs. Die SEE wurden durch Laugen der Gesteinspulver mit verdünnter Essigsäure gewonnen.

Die einheitlich positive Eu-Anomalie und die subparallelen SEE-Muster der Siderite und Ankerite (mit Ausnahme des Sideritgangs im alterierten Porphyroid) sind Indiz für eine einphasige hydrothermale Bildung unter niedrigtemperierten Bedingungen und ohne durchgreifende spätere Überprägung bzw. Rekristallisation. Fe-Karbonat und tonig-organische Matrix weisen signifikant unterschiedliche Verläufe der Muster im Bereich der leichten bis mittleren SEE und damit signifikant unterschiedliche Sm/Nd-Verhältnisse auf. Signifikante, wenn auch geringere Unterschiede im Sm/Nd finden sich ebenfalls bei den Sideriten und Ankeriten. Damit bieten sich gute Voraussetzungen für die Datierung der hydrothermalen Bildung der Siderite/Ankerite mittels der Sm-Nd-Isochronenmethode.

### **Die zeitliche Einstufung der Vererzungen**

Zur Erstellung eines genetischen Modells der Sideritvererzungen der Östlichen Grauwackenzone ist auch die Bestimmung des Alters der Mineralisation erforderlich. Nur mit der Kenntnis einer exakten Alterseinstufung kann das mineralisierende Ereignis in einen geodynamischen Rahmen gestellt werden. Die Tatsache, dass die mineralisierten Strukturen gangförmig in Permischen Gesteinen auftreten, schließt eine syngenetische, Altpaläozoische Erzgenese aus. Eine Obergrenze für die Sideritgenese ist dadurch gegeben, dass z.B. Jurassische oder Kretazische Gesteine von dieser Vererzung nicht betroffen sind. Eine umfangreiche Alpidische Mobilisation von Erzlösungen etwa durch die Eoalpine Metamorphose nach/während der Alpenen Deckenstapelung würde diese jüngeren Abfolgen ebenfalls vererzen.

Um eine absolute Alterseinstufung des hydrothermalen Ereignisses zu ermöglichen, werden zur Zeit umfangreiche Altersbestimmungen nach der Sm-Nd-Isochronenmethode an den Sideritmineralisationen der Östlichen Grauwackenzone am Isotopenlabor der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR) durchgeführt. Frühere geochemische und isotopenchemische Untersuchungen in der BGR an karbonatischer Gangart der hydrothermalen Co-As-(Au)-Vererzung des Bou Azzer Inliners, AntiAtlas (Marokko), haben gezeigt, dass die Karbonate mit der Sm-Nd-Isochronenmethode datiert werden können, wenn eine signifikante Variation im Sm/Nd-Verhältnis vorliegt (OBERTHÜR et al., 2007). Insbesondere durch den direkten Vergleich dieses Sm-Nd-Isochronenalters mit dem Ergebnis der U-Pb-Datierung an einem kogenetischen U-reichen Mineral (Brannerit; mittels LA-ICP-MS-Methode) kann die geologische Signifikanz der Sm-Nd-Datierung der karbonatischen Gangart belegt werden: beide Methoden haben innerhalb der Fehler identische Alter erbracht, die eine sichere Alterseinstufung der Mineralisation erlauben (OBERTHÜR et al., 2007). Im Abschluss befindliche geochemische und isotopenchemische Untersuchungen der Spatmagnesite und ihrer tonig-organischen Beimengungen der Lagerstätte Breitenau ergaben ebenfalls eine sehr gut definierte Sm-Nd-Isochrone (HENJES-KUNST et al., 2008).

Wie beim Kapitel über die SEE ausgeführt, bieten die Unterschiede im Sm/Nd-Verhältnis der Siderite, Ankerite und der tonig-organischen Matrix gute Voraussetzungen für die Datierung nach der Sm-Nd-Isochronenmethode. Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen lässt sich für die Sideritmineralisationen des Steirischen Erzbergs eine Isochrone mit einem Obertriadischen Alter von  $208 \pm 22$  Ma ableiten (Abb. 12), was gut in das oben erwähnte Zeitfenster passt. Die Isotopenverhältnisse einer bisher untersuchten Probe aus den Devonischen Karbonaten des nicht vererzten Nebengesteins liegen abseits der Ausgleichsgeraden.

Ar-Ar-Datierungen an Seriziten aus der Alterationszone der Lagerstätte Schendleck (PROCHASKA, 1991) ergaben ein Plateau-Alter von  $161,4 \pm 0,6$  Ma. Ob dieses Alter für die Lagerstättenbildung relevant ist und mit einem jüngeren Mineralisationsereignis in Zusammenhang steht, werden Sm-Nd-Untersuchungen an Siderit-Ganglagerstätten aus Permischen Nebengesteinen zeigen, die zur Zeit im Gange sind.

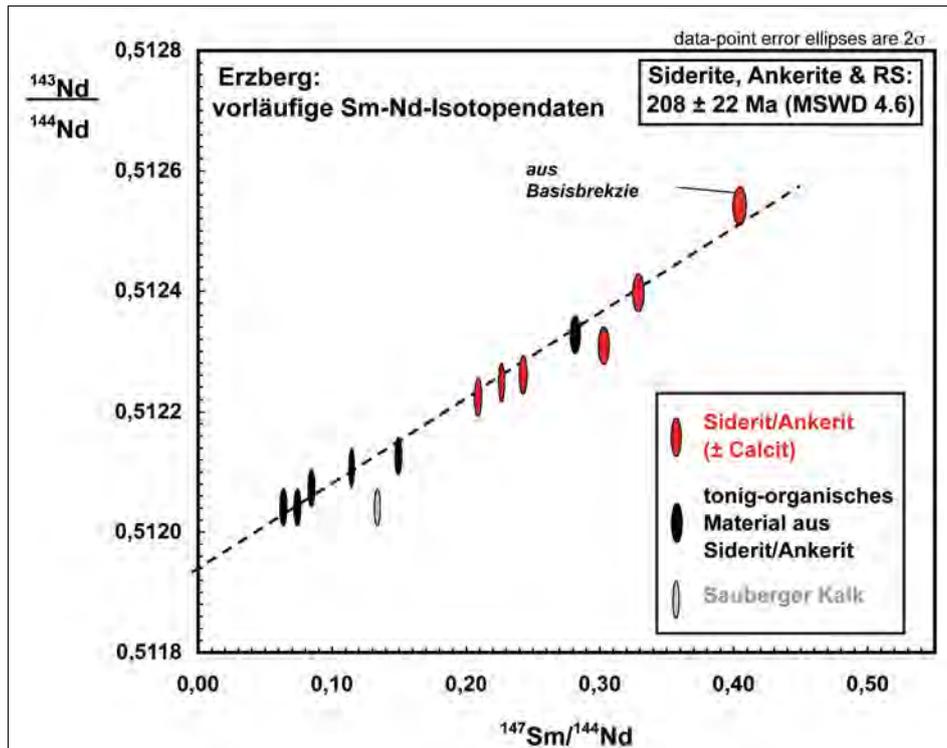


Abb. 12: Sm-Nd-Isochrone der Siderite, Ankerite und der entsprechenden unlöslichen tonigen Rückstände von Proben vom Steirischen Erzberg ergeben ein Alter von 208 ± 22 Ma.

### Das genetische Modell

Das hier präsentierte genetische Modell der untersuchten Vererzungen stützt sich auf folgende Beobachtungen bzw. analytische Daten:

- Die Natur der Vererzungen ist hydrothermal-metasomatisch. Es können keine Anzeichen einer primär sedimentären Eisenanreicherung beobachtet werden.
- Entsprechend ihrer ähnlichen Fluidzusammensetzung scheinen die Sideritmineralisationen der Östlichen Grauwackenzone zu einem minerogenetischen Ereignis zu gehören.
- Die mineralisierenden Fluide waren ursprünglich aufgrund ihrer stark halitfraktionierten Zusammensetzung evaporitische, residuale Meerwässer mit hoher Salinität.
- Die zeitliche Einstufung des mineralisierenden Ereignisses wurde mittels Sm-Nd-Datierung auf Obertrias (208 ± 22 Ma) festgelegt.

Führt man diese Beobachtungen zu einem Modell zusammen, ergibt sich folgendes Bild (Abb. 13), das gegenüber früheren Modellen (PROCHASKA, 1991, 1997; PROCHASKA et al., 1996) durch die nun vorliegende zeitliche Fixierung des erzbildenden Ereignisses leicht modifiziert ist:

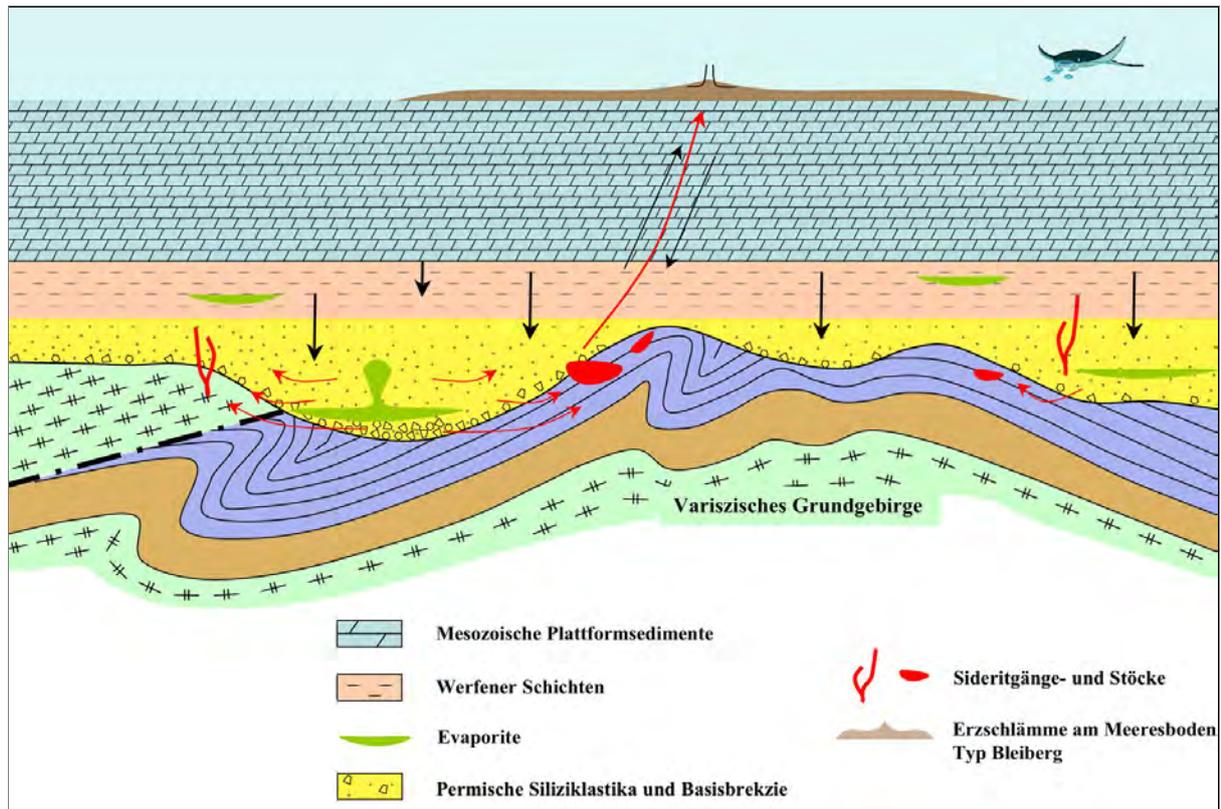


Abb. 13: Modell der Bildung der Sideritmineralisationen in der Östlichen Grauwackenzone durch ursprünglich Permotriadische evaporitische Wässer, die in der Obertrias diagenetisch mobilisiert wurden (nicht maßstäblich).

Über Altpaläozoischem, Variszisch metamorphem Grundgebirge lagern sich während des Perms kontinentale, siliziklastische Sedimente unter ariden Bedingungen ab. Durch evaporitische Ablagerungen wird das residuale Meerwasser zu hochsalinaren und Br-reichen Lösungen fraktioniert. Während der Ablagerung der Werfener Schichten ist das ursprünglich akzentuierte Relief allmählich ausgeglichen, wobei die evaporitischen Bedingungen fort dauern. Durch die Auffüllung der Becken und die andauernde Sedimentation werden die hochsalinaren, evaporitischen Wässer als Formationswässer in diesen Sedimenten fixiert. Fortschreitende Sedimentation der karbonatischen Plattformsedimente und die damit verbundene anwachsende Auflast führen schließlich in der Obertrias zur diagenetischen Mobilisation der begrabenen Formationswässer. Diese reduzierenden, sauren, hochsalinaren Fluide (23 % NaCl<sub>Äquiv</sub> nach BELOCKY, 1992) haben ein großes Potential, während ihrer Migration Metalle (z.B. Fe, Mg, Ba etc.) aus den Nebengesteinen aufzunehmen. Für die Ausfällung der Erze kommen verschiedene Mechanismen in Frage, wie pH-Änderung beim Eintritt der Lösungen in Karbonatkörper oder Abkühlung beim Aufstieg der hydrothermalen Lösungen. Geothermometrische Untersuchungen von BELOCKY (1992) zeigen, dass die Homogenisierungstemperaturen der Siderite im Bereich von 100–140° C liegen, was bei einem Druck von etwa 1 kbar einer Temperatur von etwa 200° C entsprechen würde. Berücksichtigt man die Überlegungen von BAU & MÖLLER (1992) zur Erklärung von positiven Eu-Anomalien in den SEE-Spektren von Sideriten, so muss für das vererzende Fluid ein Entwicklungsstadium bei erhöhten Temperaturen und möglicherweise größeren Versenkungstiefen gefordert werden (vgl. auch HEIN, 1993 für die Siegerländer Sideritprovinz).

Die erzbildenden Prozesse der untersuchten Sideritlagerstätten weisen große prinzipielle Ähnlichkeiten mit Mississippi-Valley-Type-Lagerstätten auf (Abb. 14). Das hier skizzierte Modell unterscheidet sich auch nur geringfügig von den Modellen zur Bildung der Ostalpinen Spatmagnesite (PROCHASKA, 2000, 2001), für die auf Grund neuerer Untersuchungen ebenfalls ein Obertriadisches Alter angenommen werden kann (Breitenau  $221 \pm 16$  Ma: HENJES-KUNST et al., 2008; Wald  $225 \pm 42$  Ma: PROCHASKA & HENJES-KUNST, 2008). Im Gegensatz zu den Fluiden, die die Sideritbildung verursachten, scheinen die Mg-reichen und Fe-freien „Magnesitfluide“ keinen umfangreichen Austausch mit dem Nebengestein gehabt zu haben, da diese Lösungen in diesem Fall durch die Aufnahme auch nur geringer Mengen von Fe ihr Potential verloren hätten, eisenarme Magnesite zu bilden.

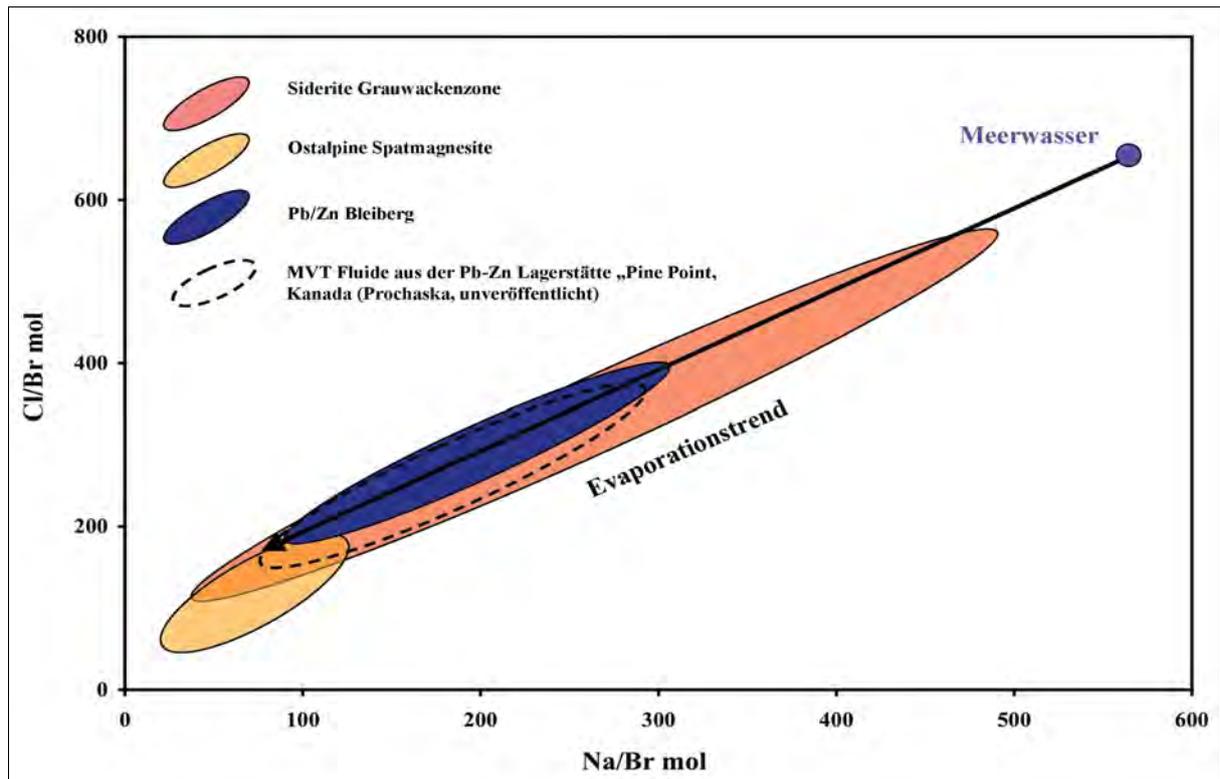


Abb. 14: Vergleich der Na-Cl-Br-Verhältnisse der Siderit- und Magnesitlagerstätten und der Bleiberger Vererzungen mit MVT-Fluiden.

Es ist in diesem Zusammenhang wert zu erwähnen, dass die Pb-Zn-Vererzungen von Bleiberg ebenfalls ein obertriadisches Alter aufweisen (SCHNEIDER et al., 2009:  $200.0 \pm 1.7$  Ma; Rb-Sr-Isochronen-datierung an Zinkblenden) bzw. in Obertriadischen Gesteinen auftreten und ähnliche, stark fraktionierte Fluidverhältnisse aufweisen (Abb. 14). Es besteht damit die Möglichkeit, dass die permotriadischen, ursprünglich evaporitischen Formationswässer, die während der Obertriadischen Diagenese der Permischen Becken die Sideritbildung verursachten, an Klüften und Wegigkeiten in der zerbrechenden Plattform in sehr hohe Niveaus (möglicherweise bis als Thermalquellen am Meeresboden) aufstiegen und dort die Bleiberger Vererzungen verursachten.

## Literatur

- BAU, M. & MÖLLER, P. (1992): Rare-earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite. – *Mineralogy Petrology*, 45, S. 231-246.
- BAUMGARTNER, W. (1976): Zur Genese der Erzlagerstätten der östlichen Grauwackenzone und der Kalkalpenbasis etc. – *BHM*, 121, S. 51-54.
- BELOCKY, R. (1992): Regional vergleichende Untersuchung lagerstättenbildender Fluide in den Ostalpen als Hinweis auf eine mögliche metamorphe Ableitung. – Unpubl. Thesis, Univ. Braunschweig, 103 S.
- BERAN, A. (1975): Mikrosondenuntersuchungen von Ankeriten und Sideriten des Steirischen Erzberges. – *TMPM*, 22, S. 250-265.
- BERAN, A. (1977): Die Kluftankerite des Steirischen Erzberges und ihre mögliche Verwendung als Geothermometer. – *Mineral. Deposita*, 12, S. 90-95.
- BERAN, A. (1979): Die Stellung der Ankeritgesteine im Rahmen der Genese von Sideritlagerstätten der östlichen Grauwackenzone – *TMPM*, 26, S. 217-233.
- BERAN, A. & THALMAN, F. (1978): Der Bergbau Radmer-Buchegg – ein Beitrag zur Genese Alpiner Sideritlagerstätten. – *TMPM*, 25, S. 287-303.
- BOTTRELL, S.H., YARDLEY, B.W.D. & BUCKLEY, F. (1988): A modified crush-leach method for the analysis of fluid inclusion electrolytes. – *Bull. Mineral.*, 111, S. 279-290.
- HEIN, U.F. (1993): Synmetamorphic Variscan siderite mineralization of the Rhenish massif, Central Europe. – *Mineralogical Magazine*, 57, S. 451-467.
- HENJES-KUNST, F., PROCHASKA W. & SCHRAMM, M. (2008): Application of the Sm-Nd isochron method to dating of evaporitic and hydrothermal carbonates. – *From Sea to Sky – Goldschmidt 2008, Goldschmidt Conference Abstracts*, S. A 368.
- KESLER, S.E., MARTINI, A.M., APPOLD, M.S., WALTER, L.M., HUSTON, T.J. & FURMAN, F.C. (1996): Na-Cl-Br systematics of fluid inclusions from Mississippi valley-type deposits, Appalachian basin: Constraints on solute origin and migration paths. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(2), S. 225-233.
- MADHAVARAJU, J. & RAMASAMY, S. (1999): Rare earth elements in limestones of Kallankurichchi Formation of Ariyalur Group, Tiruchirapalli, Cretaceous, Tamil Nadu. – *Journal Geological Society India*, 54, S. 291-301.
- MCCAFFREY, M.A., LAZAR, B. & HOLLAND, H.D. (1987): The evaporation path of seawater and coprecipitation of Br<sup>-</sup> and K<sup>+</sup> with halite. – *J. Sediment. Petrol.*, 57, S. 928-937.
- NEUBAUER, F., HANDLER, R., HERMANN, S. & PAULUS, G. (1994): Revised Lithostratigraphy and Structure of the Eastern Graywacke Zone (Eastern Alps). – *Mitt. Österr. Geol. Ges.*, 86, S. 61-74.
- NOTHDURFT, L.D., WEBB, G.E. & KAMBER, B.S. (2004): Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: Confirmation of a seawater REE Proxy in ancient limestones. – *Geochimica Cosmochimica Acta*, 68, S. 263-283.
- OBERHAUSER, R. (1980): *Der geologische Aufbau Österreichs*. – Springer, Wien.
- OBERTHÜR, T., MELCHER, F., HENJES-KUNST, F., STEIN, H., ZIMMERMAN, A., GERDES, A. & EL GHORFI, M. (2007): Evidence of a Hercynian age of cobalt-arsenide-(gold) mineralisation, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco, from new U-Pb, Sm-Nd and Re-Os age determinations. – In: ANDREW, C.J. et al. (Eds.): *Digging Deeper, Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting*, Dublin, S. 357-369.
- PALINKAS, L., STRMIC, S., SPANGENBERG, J. & PROCHASKA, W. (2003): Vares and Veovaca, Triassic, Fe-Pb-Zn-Ba SEDEX deposits, related to the advanced Tethyan rifting, Central Bosnia. – In: ELIOPOULOS, D.G. (Ed.) et al.: *Mineral Exploration and Sustainable Development*, Vol. II, S. 1221-1224, Millpress, Rotterdam.
- PETRASCHECK, W. (1932): Die Magnesite und Siderite der Alpen. Vergleichende Lagerstättenstudien. – *Anz. Österr. Akad. Wiss., math.-nat. Kl.*, 141, S. 195-242.
- POHL, W., AMOURI, M., KOLLI, O., SCHEFFER, R. & ZACHMANN, D. (1986): A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. – *Mineral. Deposita*, 21, S. 228-233.
- PROCHASKA, W. (1991): Beispiele für alpidisch-hydrothermale Lagerstättenbildung in den Ostalpen. – *Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark*, 121, S. 129-148.

- PROCHASKA, W. (1997): Formation of different siderite provinces during the Alpine tectono-metamorphic event in the Eastern Alps of Austria. – In: Mineral Deposits Research and Exploration Where do they meet? S. 845-848, Proceedings of the 4th Biennial SGA Meeting Turku 1997, Balkema, Rotterdam, 1997.
- PROCHASKA, W. (2000): Magnesite and talc deposits in Austria. – *Mineralia Slovaca*, 32, S. 543-548.
- PROCHASKA, W. (2001): Magnesite Mineralizations of the Eastern Alps and the Carpathians. – In: PIESTRZYNSKI (Ed.) et al.: *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*, S. 1017-1019, Swets & Zeitlinger Publishers Lisse.
- PROCHASKA, W., FRANK, W. & BECHTEL, A. (1996): Tertiary Siderite Mineralization in the Greywacke Zone of the Eastern Alps. – *Mineralia Slovaca-Monography*, Bratislava, S. 165-174.
- PROCHASKA, W. & HENJES-KUNST, F. (2008): Inclusion fluid chemistry of sparry magnesite mineralizations in the Eastern Alps. – *From Sea to Sky – Goldschmidt 2008*, Goldschmidt Conference Abstracts, S. A 763.
- PROCHASKA, W., KAISER, C. & KRUPENIN, M. (2003): How inclusion fluid chemistry can help in understanding mineral deposits – Examples from magnesite and siderite deposits in the Southern Urals. – *Int. Conf. of Mineralization in Precambrian Terranes & UNESCO/IUGS IGCP 443 Annual Meeting and Field Correlation*, Abstr. Vol., S. 1-5, Nanjing.
- PROCHASKA, W., SAMI, L., HADDOUCHE, O., KOLLI, O., BOUTALEB, A. & LAOUAR, R. (2007): Investigations on the Chemistry of Mineralizing Fluids of Vein Type Mineralizations Related to the Diapiric Zone in Northern Algeria. – In: ANDREW, C.J. (Ed.) et al.: *Proceedings of the 9th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, Dublin, Ireland, 20th–23rd Aug. 2007 Vol. II, S. 1323-1326, IAEG 2007.
- REDLICH, K.A. (1907): Die Genesis der Pinolitmagnesite, Siderite und Ankerite der Ostalpen. – *TMPM*, 26, S. 499-505.
- SCHEIDER, J., V. QUADT, A., GUTZMER, J., HENJES-KUNST, F., MELCHER, F. & SINDERN, S. (2009): The unique Rb-Sr chronometer in sphalerite and the genesis of sediment-hosted base metal deposits. – *SGA 2009*, 10th Biennial Meeting, Townsville, Australia.
- SCHÖNLAUB, H.P. (1982): Die Grauwackenzone in den Eisenerzer Alpen (Österreich). – *Jahrb. Geol.B.-A.*, 124, S. 361-423.
- SCHULZ, O., VAVTAR, F. & DIEBER, K. (1997): Die Siderit-Erzlagerstätte Steirischer Erzberg: Eine geowissenschaftliche Studie, mit wirtschaftlicher und geschichtlicher Betrachtung. – *Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.*, 20, S. 65-178.
- WEBER, L. (1997): Metallogenetische Karte von Österreich (1:500.000) und Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. – *Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.*, 19, Wien 1997.