

# Neues zur Genese der Blei-Zink-Lagerstätte Bleiberg

Von Erich SCHROLL

## Zusammenfassung:

Neue Arbeitsergebnisse bestätigen, dass die Blei-Zink-Lagerstätte Bleiberg oberflächennah und zeitgleich mit der sedimentären Gesteinsabfolge in der Trias während der karnischen Stufe (220 – 210 Millionen Jahre) gebildet wurde. In der Lagerstätte Bleiberg wurden erstmals fossile sulfatreduzierende Bakterien in Überresten von Bakterienkolonien (Peloiden) entdeckt. Die in Zinksulfid (Sphalerit) umgewandelten Bakterien und die von ihnen ausgeschiedenen Sphaleritkügelchen wurden mit Hilfe einer elektronenoptischen Methode sichtbar gemacht. Massive Zinkvererzungen mit rund einer halben Million Metall im Westen des Antonischachtes in Kreuth verdanken ihre Existenz diesen Bakterienaktivitäten. Peloide und bakteriogene Schwefelisotopensignaturen sind auch in den anderen Erzhorizonten der Lagerstätte in Vererzungen mit frühdiaogenetischen Texturen nachgewiesen. Diese Befunde zusammen mit neuen geochronologischen Daten stehen in Übereinstimmung mit dem zeitgleichen Alter von Gestein und Erz.

Ein sedimentär-hydrothermales System brachte die Erzmehle und andere Elemente, wie Barium und Fluor. Der Stoffinhalt der salinaren Erzlösungen wurde bei einer Temperatur von etwa 100°C aus Silikategesteinen im Liegenden der triassischen Karbonatgesteinsserie gelöst. Während der Versenkung im Mesozoikum bis zum Paläogen stieg die Temperatur der Lagerstätte bis etwa 150°C an. Zu Lösungsumsätzen kam es im Erzhorizont des Wettersteinkalkes, wie an einem Beispiel gezeigt wird. Blauer Anhydrit durchtränkte Blei-Zink-Erze und verursachte eine sekundäre Mineralisation, die auf die Entwässerung sedimentärer Gipse zurückzuführen ist. Dieses Ereignis ist als jurassisch oder früher zu datieren. Der Höhepunkt der Versenkung wurde modellgemäß mit einer Gesteinsüberlagerung von 3000 m im Alttertiär (Oligozän) erreicht. Prismatische Kalzite (Kanonspäte) und Strontianit kennzeichnen späte erzfreie Mineralisationen. Mit der Hebung und Exhumierung konnten atmosphärische Niederschlagswässer eindringen. Im Ostteil der Lagerstätte entstand eine Oxidationszone, die mit Karstschläuchen in große Tiefen reicht.

## Abstract:

At Bleiberg, fossil sulphate-reducing bacteria were detected in lead-zinc ores hosted by Triassic carbonates. This finding shows together with other important new results that ores of the Bleiberg lead-zinc deposit precipitated near to the surface during the Carnian stage.

Electronmicroscopical work detects fossil bacteria and globular sphalerites in the nanometer scale within peloids. The sulphur bacteria triggered the precipitation of massive zinc ores in the area west of the Antoni shaft at Kreuth. In this ore horizon a half million tons of metal were precipitated by bacteria. Bacterial signatures of sulphur isotopes were also recognized in other ore horizons of the deposit. The detection of fossil sulphate-reducing bacteria hosted by early-diagenetic ore

## Schlagworte:

Bleiberg, Trias, Schwefelisotope, Sphalerit, Blei, Bakterien

## Keywords:

Bleiberg, Triassic, sulphur isotopes, sphalerite, lead, bacteria.

textures indicates that the age of the deposit corresponds to the age of the host rock series.

Saline fluids leached the metals and other elements (e.g. barium and fluorine) from silicate rocks in the footwall of the Triassic carbonates. The fluids are poor in iron, manganese, copper and silver. The fluid temperature is supposed to be in the range of 100°C. During Mesozoic to Paleogene burial, the host rocks of the mineralization were heated up to 150°C. The rocks of the Wetterstein Formation favoured the circulation of the diagenetic fluids. During Jurassic or just before, times sedimentary evaporites were mobilized and transformed into blue anhydrite which penetrated locally pre-existing ores. Processes of re-crystallization and re-mineralization were also observed. The post-ore mineralization of carbonates was barren. During the uplift meteoric water infiltrated the ore-bearing sequence. This results in the formation of a deep oxidation zone in the eastern part of the deposit.

### Vorbemerkung

Bergbau im Bleiberg Hochtal findet nicht mehr statt. So könnte man der Auffassung sein, dass weitere wissenschaftliche Arbeiten nicht mehr sinnvoll wären, da bestehendes Wissen ohnehin ausreiche. Der Fortschritt der Geowissenschaften bestimmt auch in Bleiberg den weiteren Erkenntnisprozess. Die Bleiberg Lagerstätte war seit mehr als 200 Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Grundlegende Beiträge zu Mineralogie und Lagerstättenkunde karbonatgebundener Blei-Zink-Erze fanden Eingang in die Erdwissenschaften. Man denke nur an den Wulfenit und seine Genese, die Bedeutung Bleibergs als Typuslagerstätte der Blei-Zink-Vererzungen der alpinen Trias oder an den B(leiberg)-Typ der Modellalter von Bleiisotopen. Bleiberg ist eine große Lagerstätte von Weltklasse, auch wenn der Metallinhalt heute von Riesenlagerstätten weit übertroffen wird. Aus den Erzen von Bleiberg wurden in mehr als 700 Jahren je 1.1 (zusammen 2.2) Millionen Tonnen Blei und Zink gewonnen. Wulfenit war zeitweise für die Produktion von Molybdän von Bedeutung. Etwa 500 Tonnen wurden hauptsächlich für die Veredelung von Stahl gewonnen. Ein Nebenprodukt der Zinkproduktion war das Metall Cadmium, von dem 993 Tonnen anfielen. Weniger bekannt ist, dass über zehn Jahre die Produktion von Germanium im Schnitt 5 Tonnen pro Jahr betrug und Österreich an der sechsten

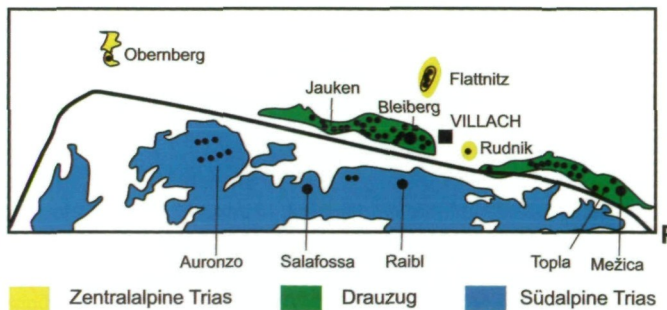


Abb. 1:  
Verteilung der Blei-Zink-Lagerstätten in der Trias nördlich und südlich des Periadriatischen Lineaments (P.L.)

Stelle der Weltproduktion des Germaniums rangierte. 172 Tonnen Germanium wurden insgesamt aus dem Zinkerz gewonnen.

Bleiberg zählt zu den Pb-Zn-Lagerstätten von Weltklasse. Bleiberg hat im Osten in einer Entfernung von ca. 120 km sein Gegenstück in Mežica (in der älteren Literatur Mieß) in Slowenien. Die Produktion in Mežica betrug 1 Million t Blei und 0.5 Millionen t Zink. Die Lagerstätte ist mit Bleiberg zwar genetisch verwandt, stimmt aber von der Sedimentabfolge, Erzmineralisation und geochemischen Daten her mit Bleiberg nur zum Teil überein. Diese beiden Lagerstätten im Drauzug und die südlich des Periadriatischen Lineamentes in der südalpinen Trias gelegenen Lagerstätten Raibl (Cave di Predil) und Salafossa waren die bedeutendsten Blei-Zink-Bergbaue in den Alpen (Abb.1). Alle diese Blei-Zink-Lagerstätten und viele kleinere Vorkommen sind an die Karnische Stufe der Trias gebunden. Vorläufercharakter haben schichtgebundene Mineralisationen im Anis (Alpiner Muschelkalk) mit beschränkter bergwirtschaftlicher Nutzung. Dazu zählen die Lagerstätten Topla (Slowenien) und die Bergbaue von Auronzo (Italien). Die Erze aus dem Anis lieferten nur etwa 600.000 t Blei und Zink, während ca. 6 Millionen t aus Erzvorkommen im Karn produziert wurden. In Mitteleuropa waren Bleiberg und die anderen Lagerstätten dieses alpinen Erzfeldes die zweitwichtigsten Lieferanten von Blei, nur übertroffen von den Lagerstätten im Anis (Muschelkalk) Oberschlesiens und der Region Krakau in Polen, wo heute noch Bergbau betrieben wird. Der tatsächliche Metallinhalt des alpinen Erzfeldes dürfte mit über 10 Millionen Blei und Zink anzusetzen sein. Man darf annehmen, dass Erzinhalt durch Erosion und Oxidation verloren gegangen und Abbau- und Aufbereitungsverluste einzurechnen sind. Bleiberg gilt als Typuslagerstätte der Alpinotypen (APT) Blei-Zink-Lagerstätten (MAUCHER & SCHNEIDER 1967, BRIGO et al. 1977).

Daraus ergibt sich die Verpflichtung, zu erforschen, warum, woher, wann, wie und warum diese Metallkonzentrationen zustande gekommen sind. Noch ist unser Gesamtwissen über die Bildung dieses Erzfeld und verwandter Lagerstätten unbefriedigend. Weitere Erkenntnisse sind für die Erschließung neuer Lagerstätten weltweit von Bedeutung.

Die wissenschaftliche Literatur über die Lagerstätte Bleiberg (oder Bleiberg-Kreuth) zur Geologie, Mineralogie, Geochemie, Lagerstättenkunde und zu anderen geowissenschaftlichen Fragestellungen ist bereits umfangreich und bedürfte der Zusammenfassung. Die Mineralien der Lagerstätte haben seit dem 18. Jahrhundert das Interesse der Gelehrtenwelt erweckt, ebenso wie die Geognosie der an Karbonatgesteine gebundenen Lagerstätte. Die Frage nach der Herkunft des Molybdäns und des Wulfenits, ist heute grundsätzlich geklärt (SCHROLL 2004). Das Molybdän

verdankt seine Herkunft einem Anreicherungsprozess in bitumenhaltigen Sedimentgesteinen, der zur Bildung von Molybdänsulfid führte. Wo Bleierze und Molybdänsulfid bis in die Gegenwart gemeinsam oxidiert werden, kristallisiert Wulfenit aus Verwitterungslösungen, manchmal vielleicht auch unter Mitwirkung von Thermalwässern, die Bleiberg zum Bad Bleiberg gemacht haben.

Die Vorstellungen über das Alter der Blei-Zink-Erze und die Entstehung der Lagerstätte in Bleiberg konnten in den letzten Jahren bemerkenswert vertieft werden. Die neuen Beiträge beruhen im Wesentlichen auf Ergebnissen, die von der Rohstoffkommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in einem Forschungsprojekt von E. Schroll & E. F. Stumpfl (†) unter Mitarbeit von H. Kucha (Craków), V. Köppl (Zürich), G. Rantitsch (Leoben), W. Prochaska (Leoben) und I. Cerny (Bleiberg) erarbeitet und in zahlreichen Publikationen (vorwiegend in englischer Sprache) dokumentiert sind.

### Zur Geologie der Lagerstätte Bleiberg

Die Blei-Zink-Vererzung von Bleiberg erstreckt sich über 10 km in einem etwa 350 m mächtigen Schichtpaket des Bleiberger Erzberges (Abb.2). Das Schichtpaket (karnische Stufe der Trias) enthält zuunterst Wettersteindolomit, dann Wettersteinkalk, dessen Sedimentation im Flachwasser einer Lagune mit mehrfachen Trockenlegungsphasen erfolgte. Durchgängige Mergelbänke, teils auch in Form von Brekzien mit organischen Resten, mit stromatolitischem Dolomit oder auch Muschelbänke sind charakteristische stratigraphische Leithorizonte (BECHSTÄDT 1975, CERNY 1989, ZEEH 1990). Die Wettersteinformation wird von den Raibler Formation (Raibler Schichten) überlagert, deren Karbonatsedimente durch drei Lagen klastischer Sedimente (Tonschiefer bis Sandstein, unter der Bezeichnung „Carditaschiefer“) unterbrochen werden. Die 1000 m mächtige Auflagerung an Hauptdolomit (Norische Stufe) blieb bis auf den Brekzienhorizont an der Basis unvererzt.

Durch die Gebirgsbildung wurde das erzführende Schichtpaket nach Süden zum Dobratsch abtauchend verstellt



Abb. 2:  
Übersichtsskizze  
der Lagerstätte Bleiberg  
(nach SCHROLL et al. 2005)

und in zahlreiche Gesteinsschollen aufgelöst. Der Bergbau folgte der Erzführung bis in die Tiefe von 800 m. Die Zeit des Erzabsatzes war durch tektonische Unruhe gekennzeichnet. Die lagunare Gesteinsserie des Erzberges wurde durch eine steile Großstörung von der erzfreien Rifffazies des Dobratschmassivs im Zuge alpiner Tektonik abgetrennt.

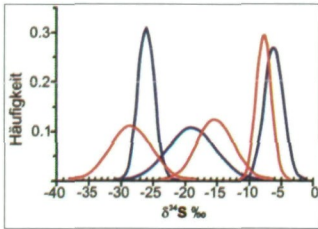
Bergbaulich werden sechs Erzhorizonte unterschieden, die mit Ausnahme des Horizontes der „Schwellenfazies“ stratigraphisch und erzgenetisch einheitlich erscheinen (CERNY 1989). Dieser Erzhorizont enthält tektonische Komponenten von anderen Erzhorizonten und einen einzigartigen Vererzungstyp submariner Entstehung mit massiven Zinkvererzungen und einer schwach vererzten, sedimentären Gesteinsbrekzie (SCHULZ 1973, 1985, CERNY 1989, SCHROLL et al. 2005).

### **Erzmineralisation**

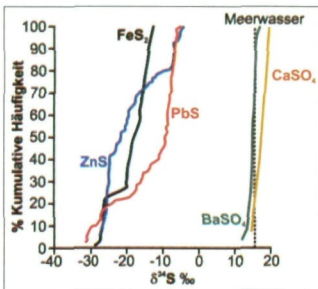
Da die Erzhorizonte ihre Besonderheiten haben und lokale Unterschiede vorhanden sind, ist in Bleiberg eine einheitliche Abfolge der an Mineralarten armen Erzmineralisation nicht festzulegen. Charakteristisch ist das Fehlen großer Sphaleritkristalle. Sie erreichen nur Millimetergröße. Bakteriogen beeinflusste Ausscheidungen können Texturen im Nanometerbereich aufweisen. Die erste Generation des Zinksulfides ist stets feinkörnig, auch in kristalliner Ausbildung. Auch kugelförmige Aggregate (Framboide) sind bekannt (GRINENKO et al. 1974, SIEGL 1985, HAGENGUTH 1985). Die nächste Generation zeichnet sich im Vergleich durch relative Grobkörnigkeit aus. Die letzten Zinksulfide sind wieder feinkörnig, wie in Schalenblenden traubenartiger Ausbildung (SCHROLL 1954, SCHULZ 1968). Vergleichbare Zinkerzabfolgen sind auch aus anderen Blei-Zink-Lagerstätten bekannt (DI COLBERTALDO 1948, KUHLEMANN, 1995). Galenit bevorzugt die Bildung größerer Aggregate und Kristalle in Zentimetergröße. Feinkörniges Bleisulfid, wie die Framboide mit stäbchenförmigen Kristalliten (HAGENGUTH 1985), sind selten. In schichtförmigen Erzkörpern wird Galenit nach Sphalerit ausgeschieden. Eisensulfidminerale, Pyrit und Markasit, sind sowohl in mergeligen und tonigen Sedimenten als auch in den Erzparagenesen anzutreffen.

Fluorit zeigt eine ähnliche Korngrößenentwicklung wie Sphalerit. Fluoritkristalle findet man nur in späten Abscheidungen (HEIN & SCHNEIDER 1983). Feinkörniger Schwespat ist auch in frühdiagenetischen Ausscheidungen gut kristallisiert. Wie Mikrosondenuntersuchungen ergaben, ist die Wachstumsgeschichte der Baryte ebenso komplex wie bei den anderen Mineralen (SCHROLL 1989).

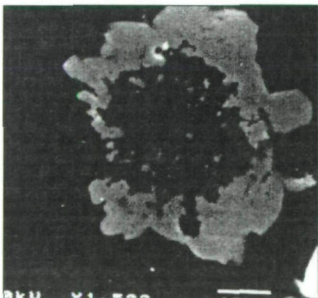
Bei der Suche nach Relikten sulfatreduzierender Bakterien wurden in Bleiberg bisher unbekannte Mikrominerale gefunden, wie eisenhaltiger Smithonit und zinkhaltiger Siderit sowie Oxisulfide (KUCHA et al. 2001).



**Abb. 3:**  
Gruppenstatistik der Schwefelisotopenverteilung in Bleiberg in Sphalerit (blau) und Galenit (Rot).



**Abb. 4:**  
Kumulatives Häufigkeitsdiagramm der Schwefelisotopen einzelner Mineralphasen Galenit (Rot), Sphalerit (Blau), Eisensulfide (Schwarz), Baryt (Grün) und Anhydrit/Gips (Gelb) (nach SCHROLL & RANTITSCH 2005).

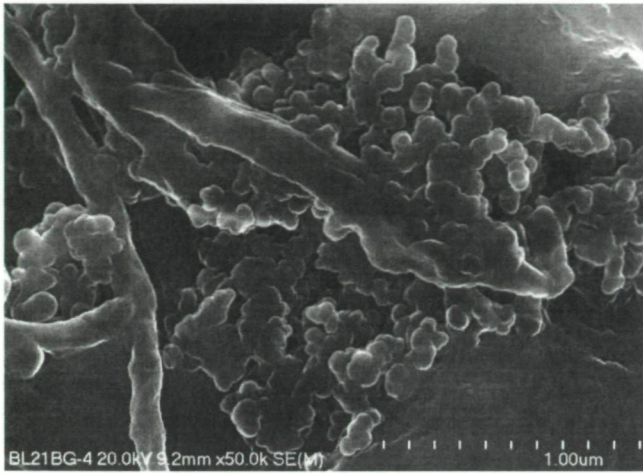


**Abb. 5:**  
Zinksulfid-Peloid. Ringförmige Anordnung von Sphalerit und punktförmige Sphalerite (Grau) in Karbonat (Dunkel). Mikrometerskala (10<sup>-3</sup> cm) (aus KUCHA et al. 2005).

## Schwefelisotope

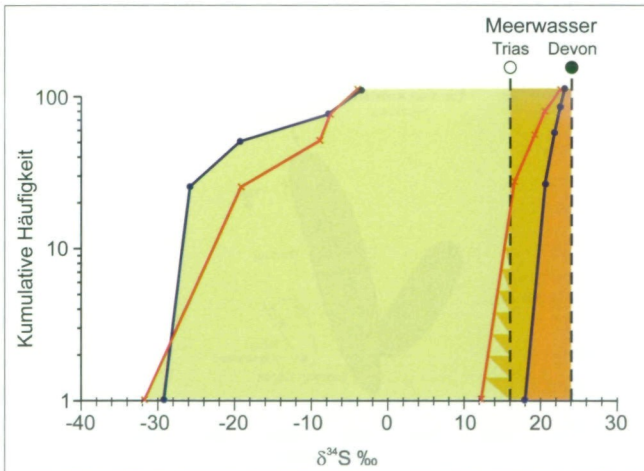
Schwefelisotope sind für die Kenntnis der Lagerstättenbildung von wesentlicher Bedeutung. SCHROLL & RANTITSCH (2005) haben das verfügbare Datenmaterial an Schwefelisotopen (mehr als 400 Einzeldaten) statistisch aufbereitet, dargestellt und interpretiert. Die Schwefelisotopendaten der Sulfidminerale lassen sich in drei statistische Gruppen aufgliedern (Abb.3). Die flache, breite Verteilungskurve zwischen den beiden Maxima ist nicht so eindeutig zu interpretieren, da Mischwerte oder durch andere Prozesse der Isotopenfraktionierung in Frage kommen. Die Gruppe mit relativ schwerem Sulfidschwefel wird als Zufuhr von hydrothermale Schwefelwasserstoff interpretiert. Die Gruppe mit sehr leichtem Sulfidschwefel ist eindeutig mit bakteriogener Schwefelreduktion (BSR) im offenen System erklärbar, d.h. bei unbegrenzter Zufuhr von Meerwassersulfat. Denn die Differenz zum Schwefelisotopenwert des Meerwassersulfates ist sehr groß, wie die kumulativen Häufigkeitskurven der wichtigsten Mineralphasen mit ihrer Beziehung zum Meerwassersulfat in Abb.4 zeigen. Mehr als 50 % der Sphaleritdaten fallen in den Bereich der bakteriogenen Sulfatreduktion. Dies weist auf ein mäßig temperiertes, offenes System in Oberflächennähe. Die Häufigkeitsverteilungskurven für die Eisensulfide sedimentärer und hydrothormaler Herkunft sind einander ähnlich. Die statistische Isotopenverteilung deckt sich aber nicht mit der Abfolge der Erzmineralisation. So findet man sehr leichte Schwefelisotope sowohl in sedimentär geprägten Erzmineralen als auch in den spät gebildeten Schalenblenden mit traubenartiger und stalaktitischer Ausbildung. Andererseits haben Erzen mit sedimentärem Gefüge, vor allem in der Wettersteinformation, oft schweren Schwefel. Diese Tatsache bedarf weiterer Untersuchungen, da es mehrere Erklärungsmöglichkeiten gibt.

Leichten Sulfidschwefel haben die Framboide von Sphalerit und Pyrit. Das Vorkommen von Framboiden wurde als Argument für bakteriogene Prozesse verwendet. Rechnerische Modelle abiogener Schwefelisotopenfraktionierung und mikrothermometrische Temperaturdaten nährten lange Zeit den Zweifel an bakteriogenen Prozessen. Deshalb ist der Nachweis fossiler Bakterientätigkeit in Bleiberg (KUCHA et al. 2005) so spektakulär, umso mehr wegen der damit verbundenen Erkenntnis, dass erhebliche Metallanreicherungen ihren Ursprung ausschließlich dem vor Ort bakteriogen gebildeten Schwefelwasserstoff verdanken (FALLICK et al. 2001, SCHROLL & RANTITSCH 2005). Relikte der Schwefelbakterienaktivität, in Form von Peloiden (d.s. mineralisierte Bakterienkolonien), wurden im gesamten Lagerstättenbereich in frühsedimentär geprägten (syndiagenetischen) Erzabsätzen nachgewiesen (Abb. 5, KUCHA et al. 2001, 2005). In einem Handstück massiven



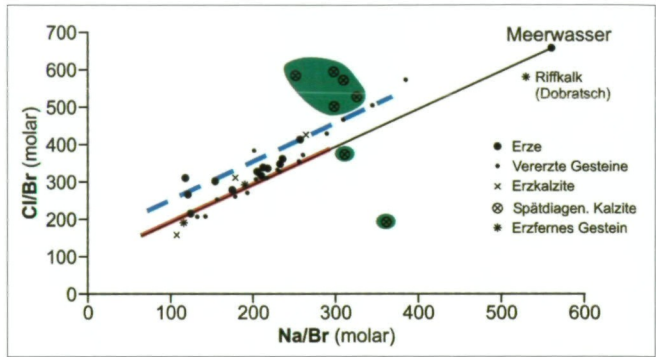
**Abb. 6:**  
Bakterienkörper, umgeben von Sphaleritkugeln im Nanometerskala ( $10^{-5}$  cm) (aus KUCHA et al. 2005)

Zinkerzes aus der Josefisholle (Schwellenfazies) konnten erstmalig sulfatreduzierende Bakterien, als Sphalerit mineralisiert, durch morphologischen Vergleich mit rezenten Vorkommen identifiziert werden (Abb. 6, KUCHA et al. 2005). Das Vorkommen von Sphaleritkugeln mit Durchmessern von Nanometern in Verbindung mit sehr leichten Sulfidschwefelisotopen ist charakteristisch für die bakteriogen beeinflusste Ausscheidung von Sphalerit. Die Bedeutung mikrobiologischer Prozesse bei oberflächennaher Ausfällung von Sphalerit ist heute unbestritten. Da bakterielle Aktivitäten nur unter  $120^{\circ}\text{C}$  stattfinden (SOUTHAM & SAUNDERS, 2005) ergibt sich mit diesem Nachweis ein Temperaturlimit der Erzgenese. Bleibt nur noch darauf hinzuweisen, dass in den Mississippi Valley Type-(MVT) Lagerstätten in Nordamerika die Schwefelisotope der Sulfide fast durchwegs von schwerem Sulfidschwefel gekennzeichnet sind. Dieser entsteht bei der thermischen Reduktion von



**Abb. 7:**  
Vergleich der kumulativen Häufigkeit der Schwefelisotopen in Bleiberg (links) und der MVT (Mississippi-Valley-Typ)-Lagerstätte Pine Point (NW-Territory, Canada) (rechts) Galenit (Rot) und Sphalerit (Blau). In Bleiberg weisen 50 % der Sphalerite einen Abstand von  $36\text{‰}$   $\delta^{34}\text{S}$  vom Meerwasser auf, in Pine Point ist dieser Abstand  $< 6\text{‰}$  (nach SCHROLL & RANTITSCH 2005).

**Abb. 8:**  
Cl/Br- Na/Br- Diagramm. Erz, Gangart und vererztes Gestein (Rot) häufen sich entlang der „evaporitischen Linie“, die zum Meerwasser führt. Die schraffierte Linie (Blau) erfasst Abweichungen, die durch diagenetisch veränderte Fluide zustande kommen. Spätdiagenetische Kalzite (Grün). Im Cl/Br-Verhältnis kommt der unvererzte Riffkalk dem Meerwasser nahe (SCHROLL & PROHASKA 2003).

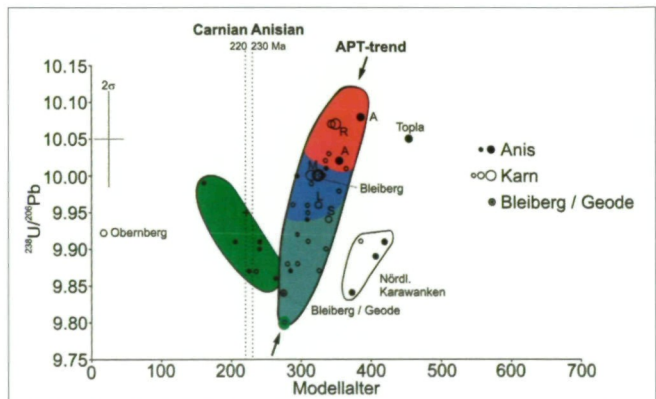


Sulfat (TSR) mit Kohlenwasserstoffen. Die Differenz der Schwefelisotopenwerte zwischen Sulfat und Sulfid ist dann gering. Die Verteilungskurven der Schwefelisotope in MVT-Lagerstätten sind auch grundverschieden von denen Bleibergs (Abb.7). Vergleichbar sind die Schwefelisotopenverteilungen Bleibergs mit Daten aus den paläozoischen Blei-Zink-Lagerstätten Irlands (Schroll et. al. 2005).

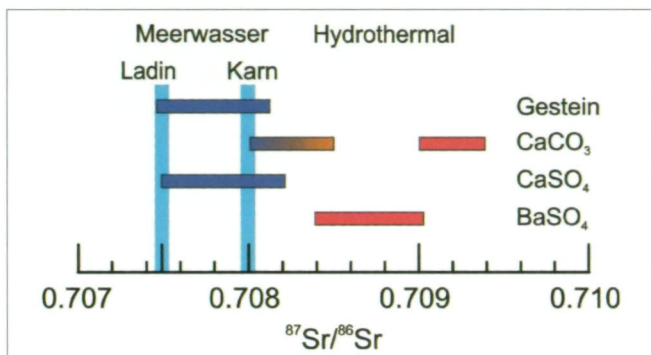
#### Art und Herkunft der Erz bringenden Lösungen (Fluide).

Die mit der „Crush and Leach“-Methode gewonnenen Extrakte aus Mineralen und Gesteinen belegen den salinaren Charakter der Erzlösungen (Abb. 8, SCHROLL & PROHASKA 2004). Diese salinaren Fluide durchströmten vermutlich klastische Sedimente (Sandsteine) permo-skythischen Alters aus dem Liegenden der Lagerstätte. Dass die Fluidströme das unmittelbar unterliegende Karbon mit kristallinem Untergrund (Gailtalkristallin) erfasst haben, ist sehr wahrscheinlich. Zur Diskussion steht heute das hydrologische System. Zurzeit wird die Vorstellung vertreten, dass mit dem Aufreißen der Kruste (Extension) Meerwasser oder marin-salinarer Wasser ins zerklüftete Grundgebirge eindrang (MUCHEZ et al. 2005). Dagegen bevorzugen Leach et al. (2003) einen Strom salinärer Lösungen, den die Schwerkraft beim Aufstieg

**Abb. 9:**  
Pb-Pb Diagramm. Für die APT Lagerstätten besteht ein deutlicher Trend der Bleisotopen vom Gesteinsblei, ident mit Blei eines lateralsekretorischen Galenites aus einer Pyritkonkretion (Geode), zum Blei aus Lagerstätten, die das Blei über ein Fluidsystem aus der Tiefe bezogen haben (Abkürzungen: A Auronzo, L Lafatsch, M Mežica, R Raibl, S Salafossa).







**Abb. 10:** Strontiumisotope in sedimentären Sulfaten und Karbonaten aus dem Meerwasser im Vergleich zur Erzmineralisation, der radiogenes Strontium gemeinsam mit Blei und Barium zugeführt wurde (nach SCHROLL et al. 2005).

kristalliner Gebirgsmassen im Festlandbereich auslöste. Die Bleiisotopendaten (KÖPPEL & SCHROLL 1989) sprechen mit relativ homogenen Bleiisotopen dafür, dass eine mehrfache Durchmischung in magmatischen Schmelzen und bei der Sedimentation der Verwitterungsprodukte stattgefunden hat. Das Blei wird von der Reaktion der Fluide mit Feldspäten abgeleitet, das Zink aus Schichtsilikaten, wie Muskovit, Biotit u.a. Seltene Elemente im Sphalerit wie Germanium und Gallium sind ein weiterer Hinweis auf Fluidreaktionen mit Silikaten und Alumosilikaten. Die Blei-Zink-Lagerstätten, die an das Karn in Raibler Fazies gebunden sind, zeichnen sich durch geringe und dennoch signifikante Unterschiede in den Bleiisotopen aus (Abb. 9, SCHROLL 2005).

Isotopenstudien geben einen Einblick in die komplexe Geschichte der Elementherkunft. So kann man ermessen, in welchem Ausmaß der Stoffinhalt der Nebengesteine an der Mineralisation beteiligt ist. Das geochemisch relativ häufige Strontium zeigt eindeutig seine Herkunft aus dem Meerwasser. In Baryten ist jedoch die mit Barium gemeinsam erfolgte epigenetische Zufuhr von radiogenem Strontium aus silikatischen Gesteinen unverkennbar, wobei sich das radiogene Strontium mit dem Meerwasserstrontium mischt (Abb. 10)

Die Bildungsgeschichte des Baryts, wie aus Mikrosondenmessungen der Strontiumverteilung hervorgeht, erscheint ebenso komplex wie die anderer Minerale der Erzmineralisation (SCHROLL et al. 2006). Beim Galenit (Bleiglanz) in Bleiberg gibt es als Seltenheit Ausnahmen. Bei einem winzigen Galenitkristall aus einer Pyritkonkretion (Geode), die im ersten Tonschiefer (Carditaschiefer) der Raibler Schichten gefunden wurde, ergab die Bleiisotopenzusammensetzung die des Gesteinsbleis (KÖPPEL & SCHROLL 1988). Gegenüber einer Million Tonnen Erzblei erscheint dieser aus dem Tonsediment stammende Blei aber unbedeutend. Es ist aber bemerkenswert, dass dieses Gesteinsblei im Baryt als säureunlöslicher Bleianteil präsent ist (SCHROLL et al. 2006).

Die Erzlösungen hatten eher tiefe Temperaturen. Denn die Metallvergesellschaftung von Blei und Zink ist extrem

arm an Eisen, Mangan und Kupfer. Die Markasitführung der Vererzung ist vom Nebengestein und von sedimentogenen Eisensulfidmineralisationen in den Raibler Schichten abhängig. Die Laugungstemperatur der Fluide lässt sich mittels Ga/Ge-Thermometrie mit etwa 100°C abschätzen (MÖLLER 1987). Zuverlässige Temperaturdaten von Flüssigkeitseinschlüssen stehen nicht zur Verfügung, da die für Messungen gut geeigneten Minerale, wie Sphalerit und Fluorit, in der ersten Generation feinkörnig sind. Mehrphasige Flüssigkeitseinschlüsse sind selten und ihre Minerale zeitlich nicht exakt einzuordnen. Zeeh & Bechstädt (1994) und Leach et al. (2003) geben Temperaturen für Sphalerit von 120 bis 159°C und für Fluorit 200 bis 225°C an. Diese hohen Temperaturwerte verleiteten zur kuriosen Hypothese, dass die bakteriogene Sulfatreduktion bereits vor dem Erzabsatz stattgefunden hätte unter der Annahme, dass der Schwefelwasserstoff in Porenhohlräumen gespeichert worden wäre. (LEACH et al., 2003).

### **Alter der Lagerstätte Bleiberg**

Das Kernproblem ist die Frage nach dem Alter der Lagerstätte. Hohlraummineralisationen im Wettersteinkalk, die im Bereich des Antonischachtes bis etwa 300 m untertage und im Osten wesentlich tiefer angetroffen wurden, bleireiche Erzgänge und nach Süden einfallende erzführenden Schichten, hatten anfangs dazu verleitet, das Alter von Bleiberg jungalpidisch (Neogen oder sogar Quartär) einzustufen. Erst die gefügekundliche Betrachtungsweise hat dazu geführt, schichtgebundene Erzablagerungen mit den sedimentären Gesteinsschichten zeitgleich (syndementär) zu interpretieren. Schulz (2006) hat über Erztexturen und Erzstrukturen Bleibergs in einer zusammenfassenden Veröffentlichung berichtet. Diese gefügekundlichen Beobachtungen sind unentbehrliche Voraussetzung und wesentliche Grundlage für die Diskussion der Lagerstättengenese. Geologische und gefügekundliche Studien lieferten die Begründung für ein syngenetisches Modell der Lagerstätte, d.h. der Erzabsatz erfolgte zeitgleich mit den umgebenden Gesteinsschichten (BRIGO et al. 1997). Daten der Schwefelisotopen, deren Interpretation die Mitwirkung von Bakterien bei der Reduktion des Meerwassersulfates erlaubt, wurden zur Stützung dieses Modells herangezogen (SCHROLL et al. 1983). Unzureichend beantwortet blieb nur die Frage nach Unterscheidungskriterien für externe und interne Erzsedimenten, d.h. ob Erz am Meeresboden selbst oder in Gesteinshohlräumen abgesetzt wurde (SCHULZ & SCHROLL 1977). Die syndementäre Lagerstättengenese wurde mit einem Modell in Frage gestellt, das für die Pb-Zn-Lagerstätten des Mississippi-Valley-Typs (MVT) der kontinentalen Plattform Nordamerikas entwickelt wurde. Die Vererzung wäre demnach nicht von tektonischen Ereignissen in der Trias, sondern von Ereignissen während der Versenkung des im Jura (anfangs sogar Kreide) abzuleiten

(ZEEH & BECHSTÄDT 1994, ZEEH et al. 1994, 1998, LEACH et al. 2003). Eine weitere Variante setzt das Alter später als Nor an, d.h. nach der Ablagerung der 1000 m mächtigen triassischen Hauptdolomitschichten, aber noch vor dem Erreichen des Höhepunkts der Versenkung und der damit verbundenen Spätdiagenese (KUHLEMANN 1995). Diese Vorstellungen stützen sich auf die Zemente in Karbonatgesteinen, deren Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopendaten, auf Temperaturmessungen an Flüssigkeitseinschlüssen, sowie auf Kathodolumineszenzbilder und den Versuch, die „Sphaleritstratigraphie“ der klassischen MVT-Lagerstätten zu übertragen (KUHLEMANN & ZEEH 1995). Eingehende Studien unter Einbezug der Erzmineralisation liegen nur von der Lagerstätte Mežica (Slowenien) vor (KUHLEMANN 1995). Unter Bezugnahme auf das Vorbild der MVT-Lagerstätten wurden die Erze von Bleiberg und anderen genetisch verwandten Lagerstätten als Ausfällungen in größerer Tiefe (1500m) interpretiert (LEACH et al. 2003). Dieses Modell ist jedoch mit dem Nachweis bakterieller Aktivitäten nicht gut zu vereinbaren.

Fortschritte in der Altersfrage konnten inzwischen mit isotopengeologischen Methoden erzielt werden. Aus der Bleiisotopenzusammensetzung von Gesteins- und Erzblei wurde das Alter der Bleivererzung mit  $180 \pm 40$  Millionen Jahre datiert (SCHROLL et al. 2006). Dies schließt Bleierzmineralisationen jünger als 140 Millionen Jahre aus, besagt aber nicht, dass die Lagerstätte ein jurassisches Alter hätte, da Umbildungen im Mineralbestand weit über die Trias möglich erscheinen. Rubidium- und Strontiumisotopendaten von Proben der Vererzung der „Schwellenfazies“ ergeben ein Alter von  $210 \pm 30$  Millionen Jahre (SCHROLL et al. 2006). Diese Erze sind submarinen Ursprungs und an tektonische Ereignisse des Karns gebunden (SCHULZ (1985), CERNY (1989)). Die Ausfällung dieser vorwiegend zinkhaltigen Erze ist ausschließlich auf bakteriogene Aktivitäten zurückzuführen (SCHROLL et al. 2006).

Diese Ergebnisse bestätigen das Altersmodell, das von Schulz (1985) und CERNY (1998) und SCHROLL (1996) vertreten wurde: Bleiberg ist epigenetischen Ursprungs, d.h. die lagerstättenbildenden Metalle und andere Elemente wurden zur Zeit der Gesteinsbildung durch Lösungen in die ca. 350 m mächtige triassische Gesteinsserie eingebracht. Die Sulfatreduktion des Meerwassers im offenen System legt lokal die Annahme eines submarinen Erzabsatzes nahe. Ein Austritt von Fluiden nach der Art des Schwarzen Raucher ist bei Erzlösungen mit niedriger Temperatur nicht zu erwarten. Der Vererzungsprozess ist langfristig, möglicherweise über 10 Millionen Jahre hinaus, anzunehmen.

Der Vorschlag eines spätriassisch-jurassischen Alters für die Lagerstättenbildung in den Alpen (LEACH et al. 2003, MUCHEZ et al., 2005) stützt sich auch auf den Analogiebezug zu anderen Blei-Zink-Lagerstätten der Europäischen Plattform.

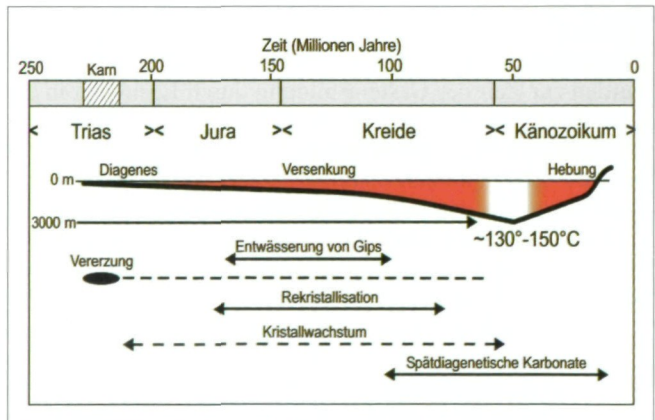
Dabei wurden wichtige Fakten, wie die Schichtgebundenheit der Blei- und Zink-Vererzungen im Anis und Karn, die synsedimentäre Anlage von Erzkörpern und die Extension schon bei der Öffnung des Melataozeans (MANDL 2000) nicht in die Diskussion einbezogen.

### Wärmegeschichte und Fluide

In Bleiberg wird die Wärmeüberprägung der Karnischen Gesteinsserie mit ca. 130°C angegeben (RANTITSCH 2001). Die Wärmebelastung nimmt im Drauzug vom Osten nach Westen zu (NIEDERMAYER et al. 1984, RANTITSCH et al 1999, RANTITSCH 2001). Mikrothermometrische Messungen an kohlenwasserstoffhaltigen Flüssigkeitseinschlüssen in authigenen Quarzkristallen aus dem Hauptdolomit der Lienzer Dolomiten ergaben eine Bildungstemperatur des Quarzes von 120-130°C (RANTITSCH et al. 1999), wobei zu beachten ist, dass der Hauptdolomit auf dem Kam auflagert. Im Blei-Zink-Vorkommen von Radnig (Karn) wurde für Fluorit eine Bildungstemperatur von 124-156°C angegeben (ZEEH 1995). Die Bildung von Karbonatzementen in der Trias des Drauzuges bei Temperaturen bis 310°C (ZEEH et al. 1995) ist zu bezweifeln (RANTITSCH 2003 a, b). Argumente für höhere Versenkungstemperaturen im westlichen Drauzug präsentiert (RANTITSCH 2001, 2003 a, b). Hier fällt auch auf, dass grobkörnige Sphalerite nach Art der Honigblende in den Fundorten Palascha, Förolach, Radnig, Jauken und Pirkachgraben vorkommen. Mit Ausnahme der Jauken handelt es sich um Sphalerite mit leichtem Sulfidschwefel (SCHROLL & PAK 1983).

Mit Anstieg von Druck und Temperatur werden die Sedimente entwässert. Auch in Bleiberg wurden mit der Versenkung wurden Fluide in Abhängigkeit von Porosität und Permeabilität im Gestein aktiviert. In einzelnen Bereichen konnten jedoch die sedimentären Nanotexturen ungestört erhalten bleiben. Die Abfolge der diagenetischen Mineralbildungen ist noch nicht zeitlich fixiert. Einen ersten

**Abb. 11:**  
Versenkungsmodell nach RANTITSCH (2001) mit Vorstellungen über den Einfluss der Diagenese auf die Erzmineralisation und späte erzfreie Mineralisation. Aktionsbereich für bakterielle Aktivitäten (Rot).



Hinweis auf Mineralneubildungen ergab sich mit dem Fund von blauem Anhydrit, der Fragmente präexistenter Erze und neugebildeten Sphalerit enthält (SCHROLL & RANTITSCH 2005). Der blaue Anhydrit verdankt seine Herkunft sedimentärem Gips, der in der Sabkha der lagunaren Wettersteinformation abgelagert wurde und sein Kristallwasser ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , d.s. 20% Wasser) bei 50 bis 60°C abgegeben hat. Dieser Temperaturbereich dürfte noch in der Trias oder im Jura erreicht worden sein. Lokal wurden vorhandene Erze vom jüngeren, blauen Anhydrit durchflutet (Abb. 12). Dies führte teilweise zur Rekristallisation des Altbestandes an Erz und an der Grenze zum Wettersteinkalk zur Mineralisation mit Sphalerit, Pyrit, Melnikovit, Fluorit, Quarz und Kalzit. Die Schwefelisotopendifferenz von Sulfat und Sphalerit deutet auf ein Isotopengleichgewicht bei 150° C. Das Kristallwachstum von Sphalerit und Fluorit könnte zeitlich gesehen relativ spät erfolgt sein. Dann wäre es möglich, die mikrothermometrischen Daten von Fluoriten aus Bleiberg (ZEEH et al. 2005) dem Ereignis der maximalen Versenkung definitiv zuzuordnen (RANTITSCH 2003). Noch fehlt es an der Verknüpfung der geochronologischen Mineralalter mit den Bildungstemperaturen der Mineralphasen. Abb. 11 stellt die Versenkung (nach RANTITSCH 2001) und die damit verbundenen Mineralisationsprozesse dar.

Der mehrmalige Wechsel im Lösungsregime kommt schon in den Kristalltrachten der Kalzite im Wettersteinkalk, die Hödl (1942) beschrieben hat, zum Ausdruck. Nach dem skalenodrischen Kalzit als Gangart der Vererzung wurden der prismatische Kalzit (Kanonenspat) während der Diagenese und der rhomboedrische Kalzit bei der Hebung in der Oxidationszone mit der Infiltration von Niederschlagswässern gebildet. Isotopendaten von Sauerstoff und Kohlenstoff (Abb. 13) bestätigen, dass Niederschlagswasser erst bei der Ausbildung der Oxidationszone an Mineralisation beteiligt waren. Die Karbonate der Spätdiagenese, wie prismatischer Kalzit (Kanonenspat) und Strontianit, haben leichte

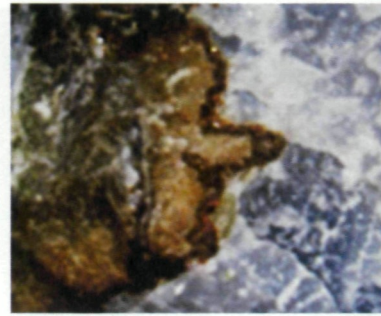


Abb. 12: Blauer Anhydrit mit einem Saum von Sphalerit an der Grenze zum Wettersteinkalk

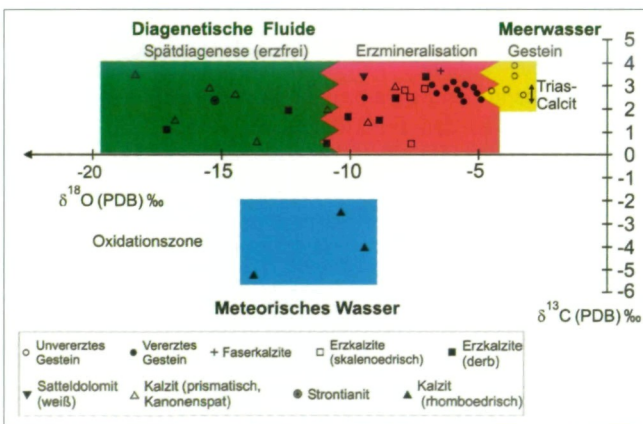


Abb. 13: Charakterisierung von Karbonaten (Gestein und Gangart) mittels Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopen. Die Isotopenzusammensetzung ändert sich vom unvererzten Sediment bis wieder hin zu erzfreien Lösungsumsätzen. Die Kalzite der Oxidationszone unterscheiden sich signifikant durch leichten Kohlenstoff.



**Abb. 14:**  
Aufwachsungen von Satteldolomit (weiße Kristalle) und Kanonenspat (prismatische, transparente Kalzitkristalle) als Manifestation der Spätdiagenese. Bleiberg, Grube Stefanie, 13. Lauf (Sammlung: H. PRASENIK).

Sauerstoffisotope (PDB). Eine für Bleiberg erstmalige Hohlraumkristallisation mit weißem Satteldolomit, der auf Sphalerit aufgewachsen ist, und auf dem jüngeren Kanonenspat aufsitzt, zeigt Abb. 14. Im Kohlenstoff-Sauerstoff-Isotopendiagramm (Abb. 13) fallen der weiße Satteldolomit in das Feld der Erzmineralisation und der jüngere transparente Kanonenspat in den Bereich der Spätdiagenese.

Der Einfluss der Wärmegeschichte auf die Lagerstätte, im Besonderen auf die Wettersteinvererzung, ist noch unzureichend bekannt. Die Wärmegeschichte unterbricht die Aktivität von Mikroorganismen (Abb. 11). Erst mit der Hebung konnten Mikroorganismen wieder in Erscheinung treten und da vor allem bei der Oxidation der Sulfidminerale. Noch ungeklärt ist, ob in diesem Zwischenstadium auch Sulfide neu gebildet wurden.

### Schlussbemerkung

Die Natur hatte bei der Bildung von Lagerstätten einen großen Spielraum. Selbst genetisch verwandte Erzmineralisationen in der Alpenen Trias, die visuell gleich aussehen, lassen bei entsprechender Datenbasis markante Unterschiede erkennen. Selbst Bleiberg ist, auch als Typuslagerstätte, in der alpinen Trias einmalig. Dementsprechend ist die Lagerstätte Mežica auch kein „eineiiger Zwilling“.

Die Ausführungen zeigen, dass die endgültige Klärung der Bildungsgeschichte komplexer geologischer Körper, wie der der Blei-Zink-Lagerstätte Bleiberg, die Vorgangsweise der „Geokriminalistik“ erfordert. Um der Wirklichkeit des natürlichen Geschehens nahe zu kommen, müssen die Beobachtungen und Messdaten laufend unter Beachtung des jeweiligen Wissensstandes kritisch geprüft und miteinander verknüpft werden. Neue Methoden und Erkenntnisse liefern immer wieder neue Steine für das Mosaik des noch unvollkommen sichtbaren Gesamtbildes. Deswegen ist noch immer grundsätzlich Neues im geologischen Körper der Lagerstätte Bleiberg zu entdecken.

Die Diskussion um Alter und Bildungsgeschichte eröffnet neue Gesichtspunkte, die sowohl den Erzabsatz als auch den Einfluss der Wärmegegeschichte auf die Lagerstätte betreffen. Nachhaltige Ergebnisse sind bei fehlendem Zugang zum Bergbau nur mehr mit der Analyse von Proben aus Aufsammlungen unter Einsatz instrumenteller Methoden zu erwarten, wobei Altersdaten und Temperaturdaten entscheidenden Aussagewert haben.

### Dank

Dank für die Förderung des Projektes gebührt der Kommission für Grundlagen der Mineralrohstoffforschung an der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, meinem zu früh verstorbenen Freund E. F. STUMPF als Projektpartner und allen, die am Projekt beteiligt waren. O. SCHULZ (Innsbruck) bin ich für die freundschaftliche Diskussion zu Dank verbunden. G. RANTITSCH (Leoben) bin ich zu Dank verpflichtet für wertvolle Hinweise bei der Textgestaltung. Den Herren K. GLANTSCHNIG (Bad Bleiberg) und H. PRASNIK (St. Magdalen) habe ich für die Überlassung von interessantem Probenmaterial aus der letzten Jahren des Bergbaues zu danken. Für die Herstellung von Grafiken danke ich W. ZIRBS (Wien). Dem Springer-Verlag (Heidelberg) danke ich für die Genehmigung zum Abdruck der Abb. 5 und 6.

## LITERATUR

- BECHSTÄDT, T. (1975c): Lead-zinc ores dependent on cyclic sedimentation. – *Mineralium Deposita* 10, 234-248, Springer, Berlin-Heidelberg.
- BRIGO, L., KOSTELKA, L., OMENETTO, P., SCHNEIDER, H.-J., SCHROLL, E., SCHULZ, O. & ŠTRUCL, I. (1977): Comparative reflections on four Alpine Pb-Zn deposits. – In: KLEMM D. D. & SCHNEIDER, H.-J. (eds): *Time- and Strata- Bound Ore Deposits*, 273–293, Springer, Berlin-Heidelberg-NewYork.
- CERNY, I. (1989): Die karbonatgebundenen Blei-Zink-Lagerstätten des alpinen und außeralpinen Mesozoikums. Die Bedeutung ihrer Geologie, Stratigraphie und Faziesgebundenheit für Prospektion und Bewertung. – *Archiv f. Lagerstättenforschung, Geol. B.-A.* 11: 5–126.
- DI COLBERTALDO D. (1948): Il giacimento piombo-zincifero di Raibl in Friuli (Italla). – *Sess. Intern. Geol. Congress. London 1948*, 149pp.
- FALLICK, A.E., FASHTON, J.H., BOYCE, A.J., ELLAM, R.M., RUSSELL, M.J. (2001): Bacteria were responsible for the magnitude of the world-class hydrothermal base metal sulfide orebody at Navan, Ireland. – *Economic Geology*, 96: 885-890.
- GRINENKO, V.A., ZAIRI, N.M., SHADLUN, T.N. (1974): Polygenetic nature of sulfide framboids in stratiform deposits (in Russian). – *Geol. Rudnych Mestoroz* 1: 66-77, NAUK, Moskau.
- HAGENGUTH, G. (1985): Geochemische und fazielle Untersuchungen an den Maxerbänken im Pb-Zn-Bergbau von Bleiberg-Kreuth/Kärnten. – *Archiv f. Lagerstättenforschung, Geol. B.-A.* 6: 223-224.
- HEIN, U.F. & SCHNEIDER, H.-J. (1983): Fluorite anomalies accompanying the Alpine Pb-Zn-deposits. Compared to the geochemistry of their fluids. – SCHNEIDER, H.-J. (ed.): *Mineral deposits of the Alps*. SGAE Spec. Publ. 3, 198-212
- HÖDL, A. (1942): Tracht und Paragenese des Kalkspates der Bleiberger Lagerstätte. – *Carinthia II*, 131, 54.
- KAPPEL, E. & SCHROLL, E. (1982): Ablauf und Bildungstemperatur der Blei-Zink-Vererzungen von Bleiberg-Kreuth., Kärnten. – *Carinthia II*, 172 /92: 49-62.
- KÖPPEL, V. & SCHROLL, E. (1988): Pb-isotope evidence for the origin of lead in strata-bound Pb-Zn deposits in Triassic carbonates of the Eastern and Southern Alps. – *Mineralium Deposita* 23: 96–103, Springer, Berlin - Heidelberg - New York.
- KUCHA, H., SCHROLL, E. & E.F.STUMPFL (2001): Direct evidence for bacterial sulphur reduction in Bleiberg-type deposits. – In: PIESTRZYNSKI, A. et al (eds): *Mineral deposits at the Beginning of the 21<sup>st</sup> Century*, 149–152, Swetz & Zeitlinger Publ., Lisse 2001.
- KUCHA, H., SCHROLL, E. & E.F. STUMPFL, E.F. (2005): Fossil sulphate-reducing bacteria in the Bleiberg lead-zinc deposit, Austria. – *Mineralium Deposita* 40:123–126.
- KUHLEMANN, J. (1995): Zur Diagenese des Karawanken-Nordstammes (Österreich/Slowenien): Spättriassisches, epigenetische Blei-Zink-Vererzungen und mitteltertiäre, hydrothermale Karbonatzementationen. – *Archiv f. Lagerstättenforschung, Geol. B.-A.* 18: 57–116.
- KUHLEMANN, J. & ZEEH, S. (1995): Sphalerite stratigraphy and trace element composition in the East Alpine Pb-Zn deposits (Drau Range, Austria/Slovenia). – *Economic Geology* 90:2073–2080.



- LEACH, D., BECHSTÄDT, T., BONI, M. & ZEEH, S. (2003): Triassic – hosted MVT Zn-Pb ores of Poland, Slovakia and Italy.– In: KELLY, J.G. et al.: Europe's major base metal deposits., 169-213, Irish Assoc. Econ. Geol., Dublin.
- MANDL, G. W. (2000): The Alpine sector of Thetyan shelf – Example of Triassic to Jurassic sedimentation and deformation from the Northern Calcareous Alps. *Mitt. Österr. Geol. Ges.* 92: 61-78.
- MAUCHER, A. & SCHNEIDER, H.-J. (1967): The Alpine lead-zinc ores. In: BROWN, J.S. (ed.): *Genesis of stratiform lead-zinc-barite-fluorite deposits.* – *Economic Geology Monograph* 3: 71-89.
- MÖLLER, P. (1987): Correlation of homogenization temperatures of accessory minerals from sphalerite-bearing deposits and Ga/Ge model temperatures. – *Chemical Geology* 61:153-159.
- MUCHEZ, P., HEIJLEN, W., BANKS, D., BLUNHDELL, D., BONI, M. & GRANDIA, F. (2005): 7.Extensional tectonics and timing and formation of basin hosted deposits in Europe. – *Geology Reviews* 27: 241-267.
- NIEDERMAYER, G., MULLIS, J., NIEDERMAYER, E., SCHRAMM, J.-M., (1984): Zur Anchimetamorphose permo-skythischer Sedimentgesteine im westlichen Drauzug, Kärnten-Osttirol (Österreich) – *Geol. Rundschau* 73:207-221.
- RANTITSCH, G., JOCHUM, J., SACHSENHOFER, R.F., RUSSEGGER B., SCHROLL, E. & HORSFIELD, B. (1999): Hydrocarbon-bearing fluid inclusions in the Drau Range (Eastern Alps): implications for the genesis of Bleiberg-type Pb-Zn deposits. – *Mineralogy and Petrology* 65: 141-159.
- RANTITSCH G (2001): Thermal history of the Drau Range (Eastern Alps) – *Schweizer Mineral. Petrol. Mitt.* 81:181–196.
- RANTITSCH. G. (2003a): A new evaluation of fluid inclusion data based on thermal basin modelling for the Drau Range, Eastern Alps. – *Mitt. Österr. Geol. Ges.* 93: 77–85.
- RANTITSCH, G. (2003b): Smectite to illite transformation in a geothermally complex Mesozoic sequence (Drau Range, Eastern Alps, Austria). – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 229:209–229.
- SCHROLL, E. (1953): Über Minerale und Spurenelemente, Vererzung und Entstehung der Blei-Zink-Lagerstätte Bleiberg-Kreuth/Kärnten in Österreich. – *Mitteilungen Österr. Miner. Ges., Sonderheft* 2, 60pp.
- SCHROLL, E., SCHULZ, O. & PAK, E (1983) Sulphur isotope distribution in the Pb-Zn-deposit Bleiberg (Carinthia, Austria).– *Mineralium Deposita* 18: 17– 25.
- SCHROLL, E. & PAK, E. (1983): Sulfur isotope investigations of ore mineralizations of the Eastern Alps. – In: SCHNEIDER, H.-J. (ed.): *Mineral deposits of the Alps and the Alpine epoch in Europe*, 169-175, Springer, Berlin- Heidelberg.
- SCHROLL, E. (1996): The Triassic carbonate-hosted Pb-Zn mineralization in the Alps (Europe). The metallogenetic position of Bleiberg type. – In: SANGSTER, D.F. (ed.): *Carbonate- hosted lead-zinc deposits.* *Soc Econ Geol, Spec Paper* 4, 182–194, Society of Economic Geologists, Littleton.
- SCHROLL, E. & RANTITSCH, G. (2003): Isotope pattern in the Bleiberg deposit (Eastern Alps) and its implication for genetically affiliated Pb.Zn deposits. – In: ELIOPOULOS et al. (eds): *Mineral exploration and sustainable development.* Vol. 2:1023–1026, Millpress, Amsterdam.

- SCHROLL, E. & PROCHASKA, W. (2004): Contribution to the ore fluid chemistry of the lead – zinc deposit Bleiberg (Austria) and affiliated deposits. – *Geochim. Cosmochim. Acta. Spec. Suppl. Abstracts of the 13<sup>th</sup> Annual V.M. Goldschmidt Conference*, A 306.
- SCHROLL, E. (2004): Die Geschichte vom Wulfenit. – *Rudolfinum, Jahrbuch des Landesmuseums Kärnten* 2003, 395-399.
- SCHROLL, E. (2005): Alpine type Pb-Zn-deposits (APT) hosted by Triassic carbonate rocks – Extended Abstract. In: MAO, I. & BIERLEIN, F.P (Eds.): *Mineral Deposits Research: Meeting the Global Challenge*, 175–178, Springer, Berlin- Heidelberg- New York.
- SCHROLL, E., RANTITSCH G. (2005): Sulfur isotope pattern in the Bleiberg deposit (Eastern Alps) and its implication for genetically affiliated lead-zinc deposits. *Mineralogy and Petrology*, 84, 1-18.
- SCHROLL, E., KÖPPEL, V. & CERNY I. (2005): Isotopic and chemical data from the Pb-Zn deposit Bleiberg (Austria) – constraints on the age of mineralization. – *Mineralogy and Petrology* 86: 129-156.
- SCHULZ, O. (1968): Die synsedimentäre Mineralparagenese im oberen Wettersteinkalk der Pb-Zn-Lagerstätte Bleiberg-Kreuth (Kärnten). – *Tschermaks min. u. petr. Mitt.*, 12, 230-289, Springer, Wien.
- SCHULZ, O. (1973): Wirtschaftlich bedeutende Zinkanreicherung in syndiagenetischer Deformationsbreccie in Kreuth. (Kärnten). – *Tschermaks min. u. petr. Mitt.* 20: 280-295.
- SCHULZ, O. & SCHROLL, E. (1977): Die Pb-Zn-Lagerstätte Bleiberg-Kreuth. Stand der geowissenschaftlichen Forschung 1976 (Projekt 2437, 2776S). – *Verh. Geol. B.-A.*, 375-386, Wien.
- SCHULZ, O. (2006) Die Entstehung der Bleiberger Lagerstätte. – *Res Montanarum*, (im Druck), Leoben.
- SIEGL, W (1985) Bilder zur Syngeneese der Bleiberger Vererzung. – *Archiv f. Lagerstättenforschung, Geol. B.-A.* 6: 179-182.
- SOUTHAM, G. & SAUNDERS, J.A. (2005): The geomicrobiology of ore deposits. – *Economic Geology* 100:1067-1084.
- ZEEH, S. (1990): Fazies und Diagenese des obersten Wettersteinkalkes der Gailtaler Alpen (Drauzug, Österreich) – *Freiburger Geowissenschaftliche Beiträge* Band 1, 209pp.
- ZEEH, S & BECHSTÄDT, T. (1994): Carbonate-hosted Pb-Zn mineralization at Bleiberg-Kreuth (Austria): Compilation of data and new aspects. – In: FONTBOTÉ, L. & BONI, M. (eds): *Sediment-hosted Zn-Pb ores. Geol. Soc. Spec. Publ.* 10, 271–296, Springer, Berlin.
- ZEEH, S., BECHSTÄDT, T. & KUHLEMANN, J. (1994): The classical „synsedimentary“ Pb-Zn deposits of the Eastern Alps revisited: MTV deposits caused by Late Triassic /Early Jurassic rifting. – 9<sup>th</sup> IAGOD Symposium, Beijing, Abstract Vol. 2, 599–600, Beijing.
- ZEEH, S., BECHSTÄDT, T., MCKENZIE, J. & RICHTER, D.K. (1995): Diagenetic evolution of the Carnian Wetterstein platforms of the Eastern Alps. – *Sedimentology* 42:199–222.
- ZEEH, S., BECHSTÄDT, T. & KUHLEMANN, J. (1998): The classical Pb-Zn deposits of the Eastern Alps (Austria/Slovenia) revisited: MTV deposits resulting from gravity driven fluid flow in the Alpine realm. – *Geologija* 41: 257–273, Ljubljana.

**Anschrift des Verfassers:**  
 Univ.-Prof. Dr. Erich Schroll  
 Haidbrunnngasse 14  
 A 2700 Wiener Neustadt  
 E-Mail erich.schroll@univie.ac.at