

Woher stammen die Kupfererze vom Fennhals (Kurtatsch, Südtirol)? Ein chemischer und mineralogischer Vergleich der Kupferschlacken mit ausgewählten Cu-führenden Erzvorkommen aus Südtirol und dem Trentino

L. Schifferle, M. Krismer, P. Tropper

Institut für Mineralogie und Petrographie, Universität Innsbruck, Innrain 52f, A-6020 Innsbruck

Zusammenfassung

Die metallurgischen Kupferschlacken vom Fennhals bestehen im Wesentlichen aus einer glasigen Matrix, sowie silikatischen Schlackenphasen, welche von der chemischen Zusammensetzung her Olivin und Klinopyroxen entsprechen. Nur selten sind nicht aufgeschmolzene Quarzbruchstücke vorhanden. In den Schlacken treten häufig Kupfersulfidphasen auf, welche chemisch u.a. den Mineralen Covellin, Chalkosin, Bornit, Digenit und Chalkopyrit entsprechen. Als Nebengemengteile treten Phasen mit einer Pyrrhotin-, Magnetit- und Hämatitzusammensetzung auf. In kleinen kugeligen Entmischungen mit maximal 300 µm Durchmesser finden sich zahlreiche Metalltropfen in den Schlacken. Es handelt sich dabei um intermetallische Verbindungen mit einer sehr heterogenen Zusammensetzung. Neben Kupfer als Hauptbestandteil enthalten diese Phasen die Elemente As, Ag, Zn, Pb, Sn, Fe, Sb, Bi, und Mo. In einzelnen Fällen sind auch die Elemente Bi, Ag, Sn oder Pb die Hauptbestandteile. Auffallend sind die, in allen Metalltropfen auftretenden, erhöhten Sn Konzentrationen, welche zwischen 0.1 und 2.0 Gew.% schwanken. Die durchschnittliche Konzentration beträgt dabei um 1.0 Gew.%. Eine Schlackenprobe zeigt deutlich höhere Sn-Konzentrationen in den Metalltropfen. Einige Analysen ergaben sogar Maximalwerte von bis zu 56.87 Gew.% Sn. Die chemische Charakteristik der Schlacken wurde mit zahlreichen Kupfererzvorkommen aus Südtirol und dem Trentino verglichen. Die erzmikroskopisch und chemisch analysierten Erzproben stammten aus Prettau im Ahrntal, vom Pfunderer Berg bei Klausen, aus Eyrns im Obervinschgau, vom Schneeberg in Ridnaun, vom Bergbau Bedovina bei Predazzo und aus St. Pankraz im Ultental. Zusätzlich wurden am nahen Nonsberg mögliche Erzvorkommen prospektiert. Bei den entdeckten Vorkommen am Nonsberg, die im Bereich zwischen Tuenetto, Priò und Vervò aufgefunden wurden, tritt nur Pyrit als einzige Erzphase auf. Die komplexe und variable chemische Zusammensetzung der Metalleinschlüsse in den Schlacken lässt auf ein polymetallisches Cu-Erzvorkommen mit einer lokal variablen Erzmineralparagenese schließen. Die in nur einer Probe auftretenden, sehr hohen Sn-Gehalte von bis zu 57 Gew.% weisen auf diesen Umstand besonders eindrucksvoll hin. Eine eindeutige Zuordnung zu einem der untersuchten Vorkommen ist, basierend auf der bestehenden Datengrundlage, nicht möglich. Da in der weiteren Umgebung des Gebietes Fennberg auch keine Cu-Erzvorkommen lokalisiert werden konnten, ist noch immer unklar, weshalb der Standort Fennhals für den Verhüttungsplatz gewählt wurde.

1. Einleitung

Beim Schmelzplatz Fennhals handelt es sich um einen der bedeutendsten spätbronzezeitlichen Kupferverhüttungsplätze Südtirols. Die Fundstelle der Schmelzöfen liegt im Gemeindegebiet von Kurtatsch auf rund 1160 m Höhe. Der Platz befindet sich im Wald oberhalb der Lokalität Fennhals. Wissenschaftliche Beiträge zur archäologischen Situation sind in Hauser (1986), Nothdurfter & Hauser (1986) und Nothdurfter (1993) zu finden. Im Gegensatz zu anderen Verhüttungsplätzen in den Ost- und Südalpen befindet sich jener von Fennhals fernab größerer Kupfervorkommen. Insgesamt wurden fünf Öfen gefunden, von denen sich zwei im privaten Museum „Zeitreise Mensch“ in Kurtatsch und drei im „Südtiroler Archäologiemuseum“ in Bozen befinden (letztere sind derzeit nicht einsehbar). Der Grundriss der Öfen ist rechteckig und an drei Seiten sind noch Reste der Ofenmauer aus Stein zu erkennen. An der schmalen Vorderseite fehlen diese Mauerreste. Form und Konstruktion sind vergleichbar mit Funden aus Nordtirol und Salzburg (Goldenberg, 2004; Goldenberg et al., 2012), sowie dem Trentino (Metten, 2003). In der näheren Umgebung der Öfen wurden mehrere Feuerstellen gefunden, die vermutlich zum Rösten der Erze gedient haben. Die Funde beinhalten Schlacken, teilweise verschlackte Keramiken und Fragmente von Blasdüsen.

Genauere Angaben zum Alter finden sich bei Nothdurfter (1993). Dieser trifft eine Alterseinstufung auf Grund der gefundenen Keramiken. Wie berichtet wird, finden sich vor allem Keramiken mit flachen Standböden; Henkel, eingeritzte Verzierungen und Fingereindrücke fehlen. Unter den Rändern sind lediglich kleine Leisten angebracht und einzelne Knubben sind vorhanden. Vergleichbare Formen wurden bei den Pfahlbaustationen des Trentino gefunden. Wie Nothdurfter (1993) weiter berichtet, sind die leicht ausgezogenen Ränder mit den glatten Leisten mit Keramiken vergleichbar, die noch Anklänge an die Mittelbronzezeit aufweisen, aber bereits in die Spätbronzezeit deuten. Typische Elemente und Merkmale der Spätbronzezeit und der Laugener Endbronzezeit fehlen. Auf Grund dieser Beobachtungen ordnet Nothdurfter (1993) die Keramiken

dem Bronzo Recente des 13. Jahrhunderts v. Chr. zu, eventuell kommt auch das späte 14. Jahrhundert v. Chr. in Frage.

2. Zielsetzung und Arbeitsmethoden

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der mineralogischen und chemischen Charakterisierung der Kupferschlacken vom Fennhals und der wichtigsten Kupfererzvorkommen in Südtirol und dem nördlichen Trentino (Abbildung 1). Parallel dazu wurde im Zuge dieser Arbeit die nähere Umgebung des Verhüttungsplatzes auf mögliche lokale Erzvorkommen hin geologisch prospektiert. Ziel war es, die Herkunft der Erze einzugrenzen und mögliche rohstoffgeologische Gründe für die untypische Lage des Verhüttungsplatzes aufzuzeigen.

Aus den vorliegenden Schlacken- und Erzproben wurden Polituren bzw. Sondenschliffe erstellt, die im Auflicht- bzw. Durchlichtmikroskop erzmikroskopisch und mit der Elektronenstrahlmikrosonde auf die Chemie hin untersucht wurden. Die Messungen mit der Elektronenstrahlmikrosonde vom Typ JEOL JXA 8100 erfolgten bei 15 kV Anregungsspannung und einem Probenstrom von 10 nA. Da Zn als Haupt- und Nebenelement häufig in den Oxid- und Silikatphasen vertreten ist und das Element starke Überlagerungen mit Si zeigt, sind quantitative Elementgehalte schwierig zu ermitteln. Die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der Oxid- und Silikatphasen erfolgte demnach semiquantitativ mittels eines energiedispersiven Systems der Firma „Thermo-NORAN“, welches direkt an die Mikrosonde gekoppelt ist. Die Spektren wurden mit der Software NORAN System SIX Vers. 1.8 (2005) ausgewertet.

Die Metalle und Sulfide in den Proben wurden mit dem wellenlängendispersiven Verfahren analysiert. Die Zählzeit betrug 20 Sekunden am Peak und jeweils 10 Sekunden am Background. Sofern eine beidseitige Messung des Backgrounds nicht möglich war, erfolgte die Messung des Backgrounds einseitig für 20 Sekunden. Insgesamt wurden 21 Elemente gemessen: As, S, Ag, Cu, Zn, Ge, Pb, Sn, Fe, Ni, Se, Cd, In, Hg, Mn, Au, Sb, Bi, Co, Te, Mo. Bis auf Pb wurden alle Metalle auf Reinmetall-Standards kalibriert, der Pb-Standard

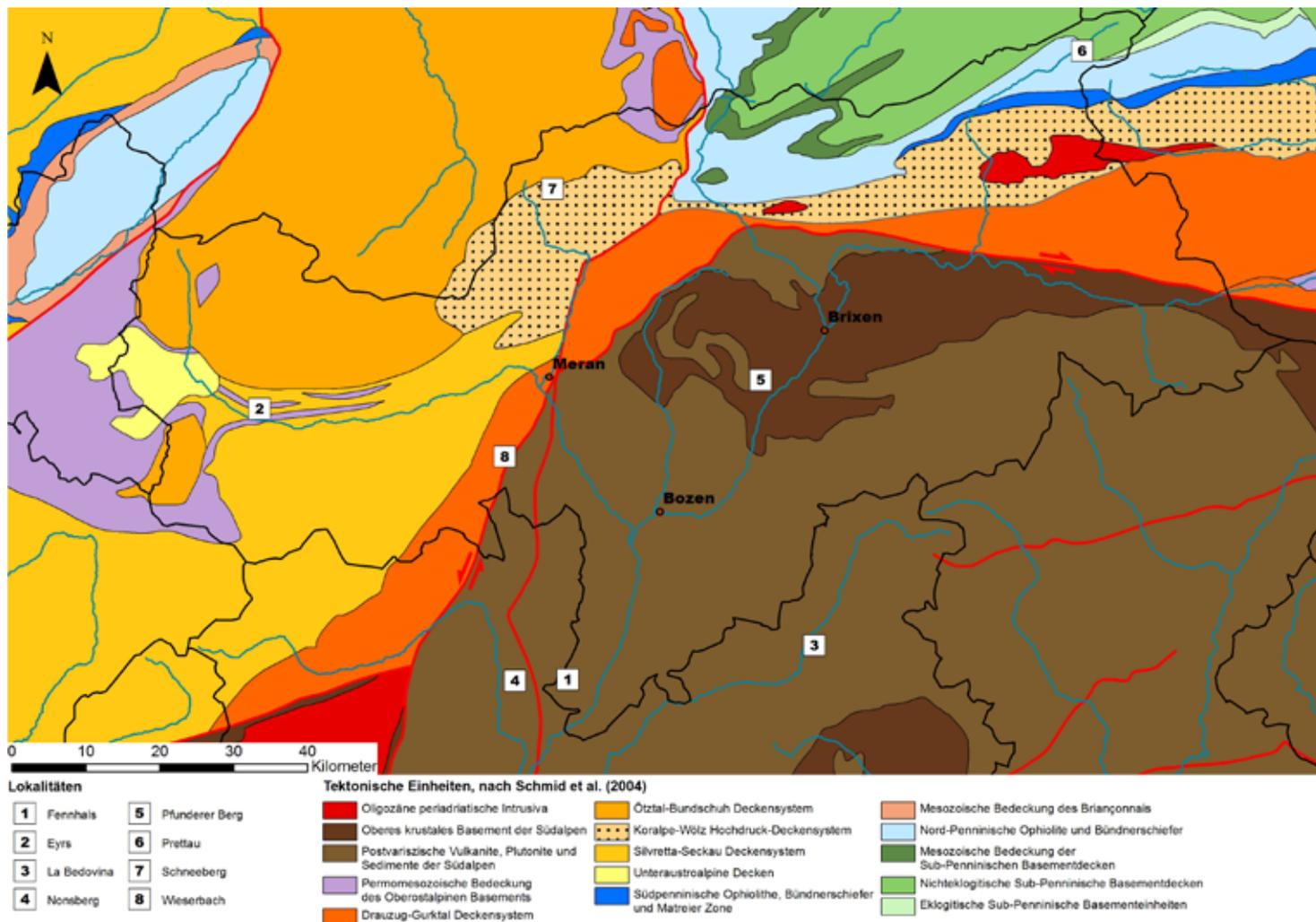


Abbildung 1: Geologische Übersichtskarte von Südtirol; die Nummerierung markiert die ungefähre Position der bearbeiteten Lagerstätten und des Verhüttungsplatzes Fennhals (verändert nach Schmid et al., 2004).

Figure 1. Geological overview of S-Tyrol. Numbers indicate the positions of the ore deposits considered in this study and the prehistoric smelting site of Fennhals (modified from Schmid et al., 2004).

war Galenit. Für S wurde Pyrrhotin als Standard verwendet. Die Nachweisgrenzen der einzelnen Elemente lagen bei den Messungen zwischen 200 und 600 ppm.

3. Kupfererzvorkommen

Die bearbeiteten Kupfererzvorkommen sind eine Auswahl möglicher vorchristlich genutzter Kupfererzvorkommen (für die meisten gibt es noch keinen prähistorischen Abbaubefund). Zusätzlich

zu den in dieser Arbeit präsentierten Lokalitäten gäbe es noch weitere, Cu-führende Vererzungen vom Ultental westwärts (Martell, Stils), für die aber im Untersuchungszeitraum keine entsprechenden Erzproben vorlagen. Weitere kleinere Cu-Vorkommen gibt es auch im Raum Brixen. Die Erzvorkommen stammen aus allen geologischen Großeinheiten in Südtirol/Trentino. Das Alter und die metallogenetischen Prozesse sind zum Teil sehr unterschiedlich, dementsprechend sind auch deutliche chemische, mineralogische und texturale Unterschiede zu erwarten.

3.1. Südalpine Kupfererzvorkommen

Die Erze aus dem Südalpin treten sowohl im Basement (Brixner Quarzphyllit) beziehungsweise zusammen mit den darin eingeschalteten magmatischen Körpern (Pfundener Berg/Klausen), als auch in den darüberliegenden sedimentären Abfolgen aus dem (Permo-) Mesozoikum auf (Nonsberg, Monzoni/Predazzo). Der Etschtaler Vulkanitkomplex (Bozner Quarzporphyr) zwischen dem liegenden Basement und den hangenden permomesozoischen Sedimenten weist zwar auch zahlreiche Vererzungen auf, welche aber hauptsächlich Pb-Zn führend sind.

Pfundener Berg/Klausen

Der Pfunderer Berg ist eine polymetallische Ganglagerstätte, welche neben Pb-Zn-Erzen auch Cu-, Fe- und Ag-reiche Erze führt (Tabelle 1). Geologisch sind die Erze an permische Dioritin intrusionen im Brixner Quarzphyllit gebunden. Neben den historisch abgebauten Gängen treten auch disseminierte Erz zonen, Erz imprägnationen und breckziöse Erze auf, welche auf eine magmatisch-hydrothermale Bildung im Zuge der Platznahme und Kristallisation des Diorits nahelegen. Des Weiteren ist am Pfunderer Berg eine ausgeprägte Metallzonierung zu beobachten. Während die Gänge polymetallische Erze mit Pb-Zn-Dominanz beinhalten, sind einzelne Vorkommen aus den tieferen Bereichen der Lagerstätte Cu-dominiert (Chalkopyrit ± Pyrit, Sphalerit) und enthalten beträchtliche Mengen an komplexen Sulfiden im System Pb-Bi-Ag-(±Cu).

Bad Lad/Ultental

Ein weiteres Erzvorkommen, welches höchstwahrscheinlich in Zusammenhang mit dem permischen Magmatismus in den Südalpen steht, ist ein Erzgang im Bereich des Wieserbachs bei Bad Lad im Ultental. Der steil stehende Erzgang befindet sich im Brixner Quarzphyllit in unmittelbarer Nähe zum Kreuzberggranodiorit. Das Basement ist im direkten Kontaktbereich mit der Intrusion kontaktmetamorph überprägt und wird von sauren, rhyodazitischen Gängen durchschwärmt, welche ebenfalls einen genetischen Zusammenhang mit dem Kreuzberggranodiorit nahelegen. Spätalpidisch treten parallel zur Judikarienlinie angelegte ultrabasische Gänge auf (Avanzini et al., 2007). Die polymetallischen Vererzungen sind Pb-Zn-Cu-Fe-führend (Tabelle 1). Haupterzphasen sind Galenit, Sphalerit, Chalkopyrit und Pyrit. Als Nebengemengteile sind Pb- und Cu-haltige Sulfosalze (Tennantit, Bournonit) zu finden.

Monzoni/Predazzo

Die Erzproben von Monzoni/Predazzo stammen aus dem Bergbauggebiet Bedovina und sind ebenfalls an magmatische Intrusionen gebunden. In diesem Falle handelt es sich jedoch um einen mesozoischen Plutonismus/Vulkanismus aus der Mittleren Trias. Die magmatischen Gesteine intrudierten hierbei in die karbonatdominierten Abfolgen der Dolomiten. Die Typuslokalität Monzoni ist namensgebend für das Gestein Monzonit, welches ein intermediäres, alkalireiches plutonisches Gestein ist. Neben intermediären Plutoniten mit

Tabelle 1: (Erzparagenese, Metallinhalt) ◆ = Hauptelement, ◇ = Nebenelement, ◇ = spurenhaltig vorhanden

Lokalität	As	Ag	Cu	Zn	Ge	Pb	Sn	Fe	Ni	Se	Cd	In	Hg	Mn	Au	Sb	Bi	Co	Te	Mo
Fennhals	◇	◇	◆	◇		◇	◇	◆	◇	◇		◇			◇	◇	◇			◇
Eyrs	◇	◇	◆	◇	◇	◇		◆	◇	◇	◇		◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	
Bedovina	◇	◇	◆	◇		◇	◇	◆								◇	◇	◇		◇
Nonsberg								◆												
Pfund. Berg		◇		◇		◆		◆		◇					◇	◇	◇			◇
Prettau	◇		◆	◇		◇		◆	◇	◇	◇				◇	◇	◇	◇		◇
Schneeberg	◇	◇	◆	◆		◆	◇	◇	◇		◇	◇			◇	◇	◇		◇	◇
Ultental	◇	◇	◇	◇		◇		◆		◇	◇					◇	◇			◇

monzonitischer und syenitischer Zusammensetzung treten auch saure und basische Plutonite und Vulkanite auf. Für die Vererzungen sind sowohl S- als auch I-Typ Granite von Bedeutung (Frizzo et al., 2010). Auch hier wurden die Erze wahrscheinlich hydrothermal während der Platznahme der granitischen Intrusionen gebildet. Die polymetallischen Cu-Fe-Pb-Zn-Co-Ag-Bi-Mineralisationen (Tabelle 1) entstanden wahrscheinlich im Zuge der Intrusion des I-Typ Granits, die W-dominierte Vererzung mit Scheelit als Hauptphase und untergeordneten Anteilen von Apatit, Rutil, Kassiterit, Ce-Synchisit und Molybdänit ist an den S-Typ Granit gebunden (Frizzo et al., 2010).

Nonsberg

Die Prospektion am Nonsberg geht auf die Aufzeichnungen von L. Hauser zurück, der in der Nähe der Orte Priò, Vervò und Tuenetto Erze vermutet. Die Gegend wird aus karbonatreichen mesozoischen Sedimenten des Südalpins aufgebaut. In den Aufschlüssen bei Priò, Vervò und Tuenetto treten dünnbankige Kalke mit Hornsteinkauern der Scaglia Variegata Alpina und Scaglia Rossa (Oberkreide) auf. Die Kalkbänke beinhalten zahlreiche, dunkelbraun bis schwarz gefärbte Konkretionen mit einem Durchmesser von wenigen Zentimetern bis maximal einem Dezimeter. Bei den anschließenden mikroskopischen Untersuchungen konnte jedoch als einziges Erzmineral Pyrit charakterisiert werden. In keinem der Präparate wurden Hinweise auf mögliche Kupfererze gefunden.

3.2. Ostalpine Vorkommen

Ein kleines Erzvorkommen nördlich von Eys im Vinschgau sowie das historische Bergbauggebiet Schneeberg sind zwei weitere Lokalitäten, deren Erzproben in die Studie miteinbezogen worden sind.

Schneeberg/Ridnaun

Das Bergbauggebiet am Schneeberg befindet sich am Übergang von Ridnaun in das Passeiertal und war lange Zeit eines der höchsten operierenden Bergwerke in den Alpen. Das große Stollensystem liegt meist deutlich über 2000m Seehöhe. Der Gesteinsverband zählt zum Ötztal-Stubai-Kristallinkomplex und besteht vorwiegend aus

Paragneisen mit eingeschalteten Orthogneis- und Amphibolitzügen. Auflagernd auf das Basement findet man in Form der Moarer- und Schneeberger Weissen das Brennermesozoikum. Die Vererzungen treten an der Südgrenze des Ötztal-Stubai-Kristallinkomplexes auf, nahe der Grenze zum sogenannten Schneeberger Zug, welcher durch mächtige Glimmerschiefer, Marmor- und Amphibolitzüge charakterisiert wird. Die Erze sind jedoch ausschließlich in den Gesteinen des Ötztal-Stubai-Kristallinkomplexes vorhanden. Genetisch werden die Erze als synsedimentäre, stratiforme hydrothermale Anreicherungen, welche an bestimmte Gesteinshorizonte (Erzfazies) gebunden sind, interpretiert. Die Erzfazies besteht aus Gneisglimmerschiefer mit disseminierten Sulfiden. In unmittelbarer Nähe zu den vererzten Horizonten findet man auch Orthogneiseinschaltungen und graphitführende Schiefer. Diese beiden Gesteine weisen möglicherweise auf aktive magmatische Prozesse und reduzierende Bedingungen am Ozeanboden, während der primären Erzanreicherung, hin. Neben diesen primären schicht- bzw. schieferungsparallelen Vererzungen sind mehrphasige Erzremobilisationen bis hinauf in das hangende Brennermesozoikum vorhanden. Haupterzphasen sind Bleiglanz und Cd-haltiger Sphalerit. Cu-reiche Erze treten nur lokal im Bereich des sogenannten Himmereichs auf. Bereits im Gelände sind dort sekundäre, grüne Kupferverwitterungsprodukte zu erkennen. Die Cu-reichen Erze bestehen hauptsächlich aus Chalkopyrit + Galenit + Sphalerit + Pyrrhotin (Tabelle 1). Untergeordnet treten auch Pb-Ag Sulfosalze, sowie in einer Probe ein kleiner (1 µm) Stannit-Einschluss in Pyrrhotin auf.

Eys

Nördlich der Ortschaft Eys im Oberen Vinschgau befindet sich im Bereich des Tanaser Baches eine Pb-Zn-Cu-Vererzung. Die Paragenese besteht vorwiegend aus Chalkopyrit, Sphalerit, Galenit, Pyrit und Pyrrhotin (Tabelle 1). Untergeordnet treten Cobaltit, Arsenopyrit, Bismuthinit, gediegen Bismut, Elektrum und gediegen Gold auf. Die Vererzung befindet sich in den sogenannten Phylliten von Eys. Bei diesem Gestein handelt es sich um tektonisch stark beanspruchte Orthogneise (Phyllonite). Die Erze treten sowohl schieferungsparallel in den Phylloniten, als auch

in einem diskordanten, steil einfallenden quarzreichen Gang auf (Exel, 1998).

3.3. Penninische Erzvorkommen

Prettau/Ahrntal

Die Lagerstätte Prettau befindet sich geologisch als einziges beprobtes Vorkommen in den penninischen Einheiten des Tauernfensters. Mineralogisch und chemisch unterscheiden sich diese Erze ebenfalls von den zumeist polymetallischen Pb- und Zn-reichen Erzen aus dem Ost- und Südalpin. Die dominante Erzphase ist in Prettau Chalkopyrit; Sphalerit und Galenit findet man nur untergeordnet. Deshalb kann dieses Vorkommen auch als einziges größeres Kupfererzvorkommen Südtirols bezeichnet werden, da am Pfunderer Berg und am Schneeberg nur sehr begrenzte Bereiche der Vererzungen größere Mengen an Kupfersulfiden enthalten. Die Erze treten als konkordante Körper in den Grünschiefern der Ophiolithabfolgen des Penninikums auf. Es handelt sich vermutlich um eine präalpidische Erzanreicherung während der Ozeanbodenmetamorphose und Metasomatose der ehemaligen Basalte. Ein Hinweis für diese Annahme sind sowohl die stark hydrothermal veränderten Grünschiefer im Liegenden der Erzkörper, als auch ihr konkordantes, schichtgebundenes Auftreten (Baumgarten et al., 1998). Neben Chalkopyrit und Pyrit sind noch zahlreiche Fe-, Ni- und Mo-Sulfide beschrieben (Tabelle 1). Im Zuge dieser Arbeit konnten noch zahlreiche komplexe Pb-Bi-Ag-Sulfidphasen mit hohem Selengehalten charakterisiert werden (Bismuthinit Bi_2S_3 , Krupkait $\text{PbCuBi}_3\text{S}_6$, Cupropavonit $\text{AgCu}_2\text{PbBi}_5\text{S}_{10}$, Makovickyite $\text{Ag}_{1.5}\text{Bi}_{5.5}\text{S}_5$, Lillianit $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$).

4. Texturen und Mineralchemie der Schlacken vom Fennhals

Texturen, Gefüge, Schlackenphasenbestand

Das makroskopische Erscheinungsbild der Schlacken ist durch einen unregelmäßigen Bruch und zahlreiche Blasen Hohlräume gekennzeichnet. Teilweise sind mit freiem Auge nicht aufgeschmolzene Quarzfragmente erkennbar, welche

in der dunkelgrauen Matrix eingebettet sind. Die Oberfläche der Schlacken ist glatt, zum Teil dunkelgrau, glasig glänzend und weist Kissen- und Strickmuster auf.

Die im mikroskopischen Befund charakterisierten Schlackenphasen sind in Folge von anthropogenem Zutun entstanden und sind somit keine natürlichen Bildungen. Davon ausgenommen sind die nicht aufgeschmolzenen Quarzbruchstücke. Es handelt sich folglich nicht um Minerale, sondern um künstliche kristalline und nicht-kristalline Verbindungen/Phasen, die chemisch äquivalent zu natürlichen Mineralen/Kristallen sein können. Der Einfachheit halber werden in folgenden Abschnitten die Schlackenphasen nach ihren natürlichen Äquivalenten benannt.

Die Hauptphasen der Schlacken sind Olivin, Klinopyroxen und eine Silikatglasmatrix (Abb. 2a + 2b). Selten finden sich noch Überreste der verwendeten Holzkohle (Abb. 2b) in den Randbereichen der Schlacke. In der Matrix sind zahlreiche rundliche bis lobate Einschlüsse bestehend aus Chalkopyrit (CuFeS_2), Bornit (Cu_5FeS_4), Digenit (Cu_9S_5), Chalkosin (Cu_2S), Covellin (CuS), metallisches Kupfer, Cu-Sn-reiche intermetallische Verbindungen, metallisches Blei, sowie Sn-Ag-Bi-Cu-reiche intermetallische Verbindungen eingeschlossen (Abb. 2a + 2b). Zudem konnten zusätzlich die Phasen Pyrrhotin (Fe_{1-x}S), Magnetit (Fe_3O_4) und Hämatit (Fe_2O_3) (Abb. 2a) charakterisiert werden. Untergeordnet tritt auch Anglesit (PbSO_4) auf. Olivin zeigt zumeist idiomorphe, stängelige Aggregate, welche regellos in der Glasmatrix eingebettet sind (Abb. 2a). Olivinkristalle treten in drei verschiedenen Habitus auf. Die erste Erscheinungsform sind stängelige, nach außen hin idiomorphe Kristallite, welche entlang der Längsachse regelmäßig angeordnete Glaseinschlüsse aufweisen (Abb. 2a). Neben den stängeligen Formen treten im selben Schliff aber auch kleinere, isometrische Formen auf, deren Querschnitt einem verlängerten Hexagon entspricht (Abb. 2b). Teilweise treten an den Außenflächen zahlreiche kleine fransige Verästelungen auf. Oft enthalten diese Formen rundliche bis ovale Einschlüsse der glasigen Matrix. Die dritte Form ist sehr unvollständig kristallisiert. Die stängeligen Aggregate bestehen aus, entlang der Längsachse aneinander gereihten, feinen H-förmigen Kristalliten. Die Hohlräume sind mit der Glasmatrix ausgefüllt.

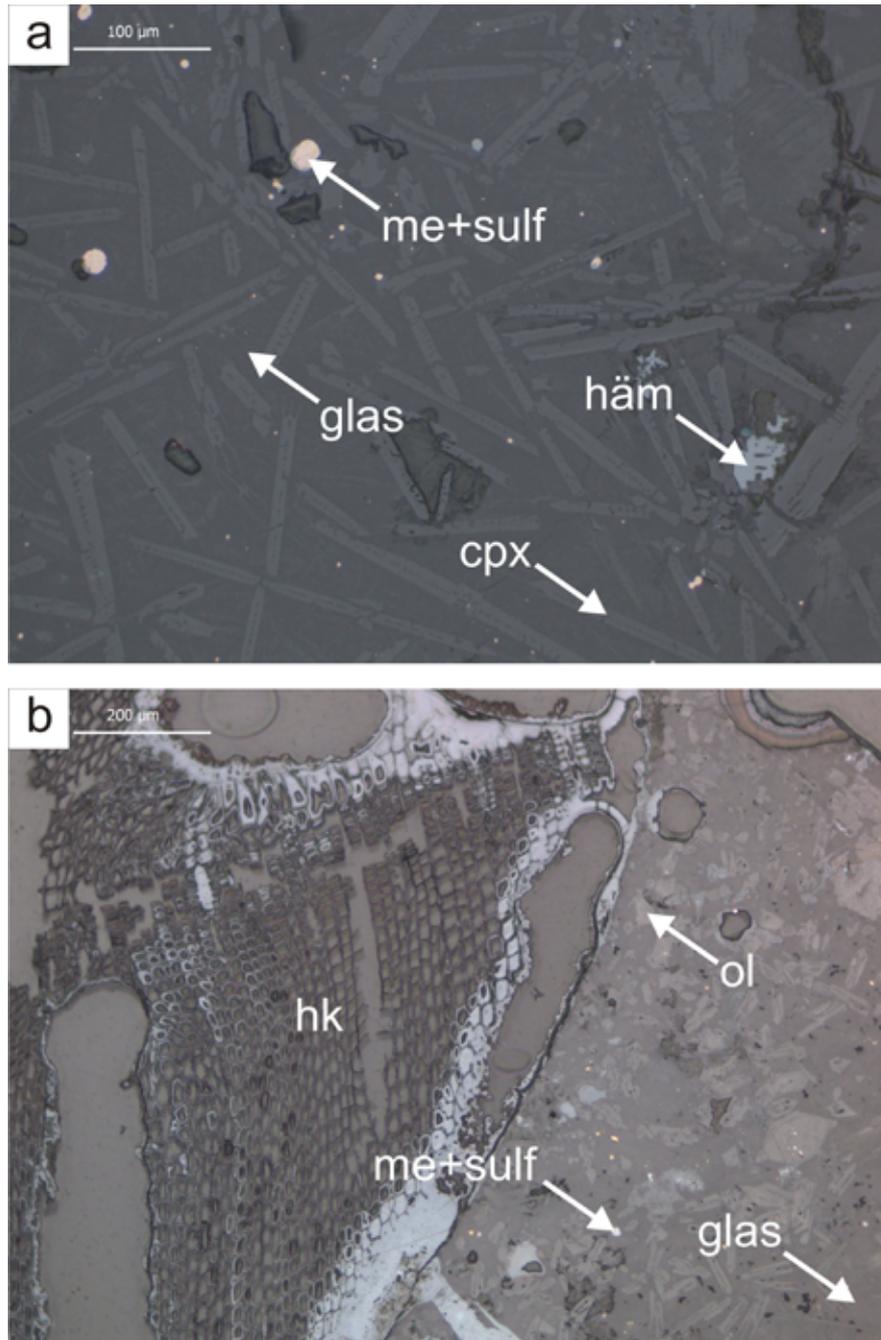


Abbildung 2: a) Auflichtmikroskopische Aufnahme einer typischen Schlacke von Fennhals mit Olivin (ol) und Silikatglas (glas) als Hauptbestandteile und mit Einschlüssen von Metall- (me) und Sulfidtröpfchen (sulf). Der stängelige Habitus und die regelmäßigen Silikatglaseinschlüsse sind typisch für Olivinkristalle in metallurgischen Schlacken.

b) Auflichtmikroskopische Aufnahme einer Schlacke von Fennhals mit einem großen Holzkohleeinschluss (hk). Die innere Struktur der Holzkohle ist noch sehr gut erhalten. Umschlossen wird die Holzkohle von einer typischen Schlackenmatrix bestehend aus Olivin (isometrisch) + Glas und Metall-/Sulfideinschlüssen.

Figure 2: a) Reflected light microphotograph of a typical metallurgical slag from Fennhals showing olivine (ol) and silicate glass (glas) with metal (me) and sulfide (sulf) inclusions as the main components. The columnar habitus and the presence of silicate glass inclusions are typical for olivines from metallurgical slags.

b) reflected light microphotograph of a charcoal (hk) inclusion in a slag from Fennhals. The internal structure of the charcoal is still visible. The surrounding matrix consists of olivine + glass + metal/sulfide inclusions.

Die Sulfidtröpfchen in den Schlacken sind meist mehrphasig aufgebaut (Abb. 3). Im Zentralbereich befindet sich oft Chalkopyrit und Pyrrhotin in unregelmäßigen Körnern. Nach außen hin tritt in abgegrenzten Körnern Bornit mit lamellaren Chalkopyrit-Entmischungen auf. Randlich kommt es zu Verdrängungserscheinungen hin zu Chalkosin und Digenit (Abb. 3). In einem Schlackestück zeigte sich bereits makroskopisch eine metallisch glänzende Lage. Bei der Untersuchung im Auflichtmikroskop konnte diese als Chalkosin-Bornit-Verwachsung identifiziert werden. Entlang von Rissen werden die beiden Phasen durch Digenit und Covellin verdrängt. In zahlreichen Zwischenräumen in der Chalkosin-Bornit-Lage tritt eine grüne, glasige Matrix mit tafeligen Hämatitkristallen auf. Zusätzlich finden sich in unmittelbarer Umgebung unregelmäßige Einschlüsse von

Magnetit. Die Sulfidtropfen sind häufig von Einschlüssen der glasigen Matrix durchzogen. Entmischte metallische Phasen findet man selten. Die Metalltropfen weisen zumeist runde Form auf und finden sich über die Schliche verteilt, in unterschiedlichen Größen. Die größten Tropfen erreichen Durchmesser bis zu 200 µm. Randlich weisen viele der Tropfen einen Saum aus Chalkosin auf. Einige der größeren Schmelztropfen enthalten zudem noch Einschlüsse von tafeligen Hämatitkristallen und Glasmatrix.

Mineralchemie: Silikate und Oxide

Die Schlackenproben bestehen zum größten Teil aus einer Matrix, bestehend aus nicht kristallinem Silikatglas. Diese Phase stellt den aufgeschmolzenen Teil der Charge dar, aus der während der Abkühlung Silikatphasen kristallisierten. Des

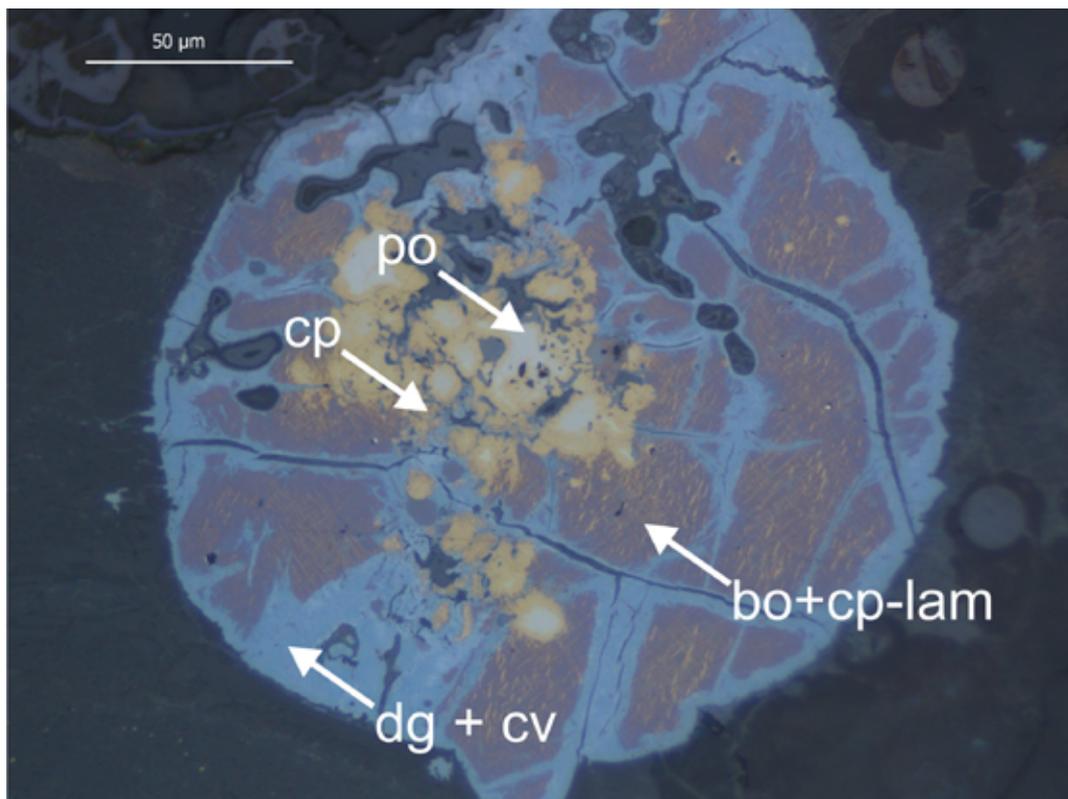


Abbildung 3: Auflichtmikroskopische Aufnahme eines Sulfidschmelztröpfchens in einer Schlacke. Im Kern des Tröpfchens finden sich hauptsächlich die Phasen Chalkopyrit (cp) und Pyrrhotin (po). Umschlossen wird diese Paragenese durch Bornit (bo) mit lamellaren Chalkopyrit Entmischungen (cp-lam). Randlich und entlang von Rissen wird die Paragenese durch Digenit (dg) und Covellin (cv) verdrängt.

Figure 3: Reflected light microphotograph of a sulfid melt droplet in a slag. The core of the droplet consists of chalcopyrite (cp) and pyrrhotite (po) and is surrounded by bornite (bo). Along the rims and along fractures this assembly is replaced by digenite (dg) and covellite (cv).

Weiteren sind in dieser Matrix chemisch nicht mischbare Sulfid- und Metalltröpfchen eingeschlossen. Um einen groben Überblick über die Zusammensetzung der Schlacke zu erhalten, wurden zahlreiche EDS-Punktmessungen durchgeführt, die jedoch nicht repräsentativ für die absolute Chargenzusammensetzung sind. Die Analysen ermöglichen eine gute Abschätzung des Gehalts von inkompatiblen Elementen in der Charge (inkompatible Elemente in den Silikatphasen, kompatibel in der Sulfid- und Metallschmelze). Das Silikatglas besteht hauptsächlich aus den Elementen Si, Fe, und Ca. Untergeordnet tritt noch K und Al auf. Stark variierende Konzentrationen zeigen die Elemente Pb und Zn. Zum Teil konnten beträchtliche Gehalte registriert werden, bei anderen Messungen sind sie nur als Neben- bzw. Spurenelemente vertreten. Olivin enthält neben Si hauptsächlich Fe und Mg, daneben sind geringfügig Gehalte an Ca und Zn festzustellen. Generell ist Olivin sehr Fe-reich und die Zusammensetzung liegt somit nahe dem Fayalit Endglied.

Mineralchemie: Sulfide und Metalle

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, sind in den Einschlüssen intensive Verwachsungen und Entmischungen verschiedener Sulfidphasen festzustellen. Die Kristallitgröße liegt zum Teil im Bereich der minimalen Auflösung der Elektronenstrahlmikrosonde und führte zum Teil zu Mischanalysen mit den benachbarten Phasen. Grundsätzlich handelt es sich bei den Phasen in den Sulfidtröpfchen um Cu-Fe-S-Verbindungen. Nebenelemente stellen Ag und Zn dar, Pb konnte ebenso detektiert werden. Repräsentative Analysen von Sulfideinschlüssen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die in den Schlacken auftretenden Metalltropfen weisen eine sehr unterschiedliche Zusammensetzung auf. In den meisten Fällen bildet Kupfer den Hauptbestandteil (Tabelle 3). In geringerem Ausmaß sind jedoch auch intermetallische Verbindungen vorhanden, deren Hauptbestandteil Bismut, Silber oder auch Blei ist. An Nebenelementen sind in den meisten Tropfen, die Kupfer als Hauptbestandteil beinhalten, As, Ag, Zn, Pb, Sn, Fe, Sb, Bi und Mo enthalten (Tabelle 3). Besonders hervorzuheben sind dabei die Sn-Gehalte, welche meist zwischen 0.1 und 2.0 Gew.% liegen.

Ein einzelner Metalleinschluss in einer Probe ergab 56.87 Gew.% Sn. In derselben Probe wurden in weiteren Metalltropfen mittels WDS-Punktanalysen an der Elektronenstrahlmikrosonde Sn-Konzentrationen zwischen 24.09 und 38.23 Gew.% festgestellt. Diese besonders Sn-reichen Tropfen sind in einer lokal begrenzten Domäne innerhalb der Probe zu finden. Hohe Sn-Gehalte korrelieren mit erhöhten Bi- und Ag-Gehalten (Tabelle 3). Die Sb-Gehalte korrelieren positiv mit den As-Konzentrationen, wobei generell Sb höher konzentriert ist als As.

5. Kupfermetallurgie: Bewertung der Paragenesen der bearbeiteten Erzvorkommen

Um eine Provenienzanalyse durchzuführen, wurden die Erzvorkommen (Nonsberg, Bad Lad (Ulten), Eys, Pfunderer Berg, Prettau) sowohl erzmikroskopisch, als auch chemisch untersucht. In den, im Rahmen der Geländearbeit gewonnenen Proben vom Nonsberg, die aus dem Bereich zwischen Tuenetto, Priò und Vervò stammen, konnte lediglich Pyrit als einzige Erzphase festgestellt werden. Zumindest für den Steinbruch bei Tuenetto und den Aufschluss an der Strada Provinciale N°13, in der Nähe von Priò, kann das Auftreten von Cu-Erzen ausgeschlossen werden. Dies soll aber nicht bedeuten, dass es in der Gegend keine Kupfererze gibt. Gasser (1913) beschreibt aus dem 12. Jahrhundert stammende Abbaue auf der Malga Tassulla (im Südwesten von Cles). Des Weiteren gibt es im Bereich Laurein-Proveis zahlreiche kleinere Erzvorkommen. Jenes im Bereich der sogenannten „Buschi“ (auf der Tabacco-Karte als „Busi“ eingetragen) wurde auch aufgesucht. Im Gelände konnte auf Grund des intensiven Bewuchses, jedoch nur nach Lesesteinen in den Pingen gesucht werden. In diesen trat nur Bleiglanz auf, der nicht näher untersucht wurde. Mostler (1966) beschäftigte sich im Wesentlichen mit der Pb-Zn-Vererzung bei Tregiovo und geht nur beiläufig auf die Cu-Phasen ein. Bei Laurein erwähnt Gasser (1913) ein Cu-Erzvorkommen. Nach der Karte von Pferschy (1929) ist Kupfer eines der Hauptelemente der Vererzung. Die

Tabelle 2: Ausgewählte Sulfidanalysen aus den Schlacken von Fennhals

Analyse	Cu-Sulfid 1	Cu-Sulfid 2	Cu-Sulfid 3	Cu-Sulfid 4	Cu-Sulfid 5	Cu-Sulfid 6	Cu-Sulfid 7
	<i>Yarrowit</i> Cu_9S_8	<i>Spionkopit</i> $Cu_{39}S_{28}$	<i>Geerit</i> Cu_8S_5	<i>Anilith</i> Cu_7S_4	<i>Bornit</i> Cu_5FeS_4	<i>Anilith</i> Cu_7S_4	<i>Spionkopit</i> $Cu_{39}S_{28}$
As	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
S	28.87	26.30	23.64	23.43	26.49	22.66	26.94
Ag	0.38	0.44	0.10	0.10	0.05	0.08	0.08
Cu	66.50	71.89	72.71	74.70	61.71	75.59	71.06
Zn	0.22	0.07	0.18	0.16	0.12	0.13	0.11
Ge	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Pb	< D. L.	< D. L.	0.06	0.08	< D. L.	0.05	0.10
Sn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Fe	4.17	1.78	2.82	1.72	11.63	1.39	2.00
Ni	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Se	< D. L.	0.06	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Cd	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.09	< D. L.	< D. L.	< D. L.
In	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Hg	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Mn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Au	< D. L.	< D. L.	0.12	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.06
Sb	0.07	0.06	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Bi	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Co	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.05	0.14	< D. L.
Te	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Mo	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.15
Summe	100.25	100.71	99.73	100.31	100.19	100.17	100.55
As	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
S	44.409	41.244	38.090	37.673	41.147	36.705	42.070
Ag	0.173	0.203	0.050	0.046	0.023	0.036	0.038
Cu	51.521	56.783	59.007	60.495	48.279	61.670	55.891
Zn	0.166	0.056	0.139	0.124	0.089	0.099	0.082
Ge	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Pb	< D. L.	< D. L.	0.015	0.019	< D. L.	0.013	0.024
Sn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Fe	3.676	1.600	2.604	1.585	10.353	1.290	1.790
Ni	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Se	< D. L.	0.038	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Cd	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.041	< D. L.	< D. L.	< D. L.
In	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Hg	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Mn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Au	< D. L.	< D. L.	0.031	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.016
Sb	0.028	0.023	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Bi	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Co	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.045	0.127	< D. L.
Te	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Mo	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.080

Tabelle 3: Ausgewählte Metallanalysen aus den Schlacken von Fennhals

Analyse	FH1a Cu1	FH1a Cu2	FH1a Cu3	FH1a Cu5	FH1b Cu1	FH1b Cu2	FH1b Cu3	FH2a Cu1
	<i>Metall</i>							
As	< D. L.	0.06	0.96	0.52	0.74	0.18	0.43	< D. L.
S	0.10	< D. L.	0.23	< D. L.	< D. L.	0.06	1.16	1.72
Ag	0.78	1.63	1.67	2.04	0.07	0.08	< D. L.	0.07
Cu	63.66	58.53	35.61	72.29	94.41	94.54	93.58	89.16
Zn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.11	0.17	0.19	0.18	0.05
Ge	< D. L.							
Pb	0.39	0.18	0.92	0.07	< D. L.	0.68	0.59	4.41
Sn	32.99	38.23	56.87	24.04	0.67	0.87	0.54	< D. L.
Fe	0.31	1.14	0.57	< D. L.	0.93	1.43	1.46	5.06
Ni	< D. L.	0.16	0.17	< D. L.				
Se	0.22	0.18	0.19	0.10	< D. L.	0.06	< D. L.	< D. L.
Cd	< D. L.							
In	0.08	0.10	0.13	0.08	< D. L.	< D. L.	0.05	< D. L.
Hg	< D. L.	0.04	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.10	< D. L.
Mn	< D. L.							
Au	< D. L.	< D. L.	0.06	< D. L.				
Sb	0.14	0.35	0.71	0.35	2.51	1.06	1.43	< D. L.
Bi	0.38	0.40	0.69	0.37	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.15
Co	< D. L.	0.06	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.04	< D. L.
Te	< D. L.							
Mo	0.05	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.07	0.06	< D. L.	< D. L.
Summe	99.17	101.13	98.84	100.15	99.65	99.24	99.68	100.63
As	< D. L.	0.060	1.152	0.500	0.641	0.157	0.367	< D. L.
S	0.242	< D. L.	0.644	< D. L.	< D. L.	0.117	2.315	3.421
Ag	0.551	1.168	1.400	1.373	0.042	0.050	< D. L.	0.040
Cu	76.738	71.212	50.663	82.578	96.227	96.449	94.052	89.305
Zn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.119	0.168	0.189	0.174	0.053
Ge	< D. L.							
Pb	0.142	0.068	0.403	0.026	< D. L.	0.213	0.181	1.355
Sn	21.288	24.899	43.312	14.700	0.366	0.472	0.292	< D. L.
Fe	0.428	1.578	0.921	< D. L.	1.082	1.660	1.670	5.767
Ni	< D. L.	0.211	0.260	< D. L.				
Se	0.212	0.177	0.222	0.095	< D. L.	0.048	< D. L.	< D. L.
Cd	< D. L.							
In	0.053	0.067	0.098	0.052	< D. L.	< D. L.	0.028	< D. L.
Hg	< D. L.	0.017	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.032	< D. L.
Mn	< D. L.							
Au	< D. L.	< D. L.	0.028	< D. L.				
Sb	0.089	0.221	0.527	0.211	1.335	0.564	0.750	< D. L.
Bi	0.139	0.147	0.299	0.128	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.045
Co	< D. L.	0.080	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.039	< D. L.
Te	< D. L.							
Mo	0.041	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.050	0.041	< D. L.	< D. L.

Tabelle 3 (Fortsetzung): Ausgewählte Metallanalysen aus den Schlacken von Fennhals

Analyse	FH2a Cu3	FH1 Cu2a	FH3a Cu1	FH3a Cu2	FH3a Cu3	FH3a Cu5	FH3b Cu1	FH3b Cu2
	<i>Metall</i>							
As	0.07	0.51	< D. L.	0.09	0.07	< D. L.	0.45	0.05
S	0.23	< D. L.	0.22	< D. L.	0.06	0.12	0.05	0.21
Ag	0.17	0.05	0.16	0.22	0.19	0.11	0.36	0.33
Cu	98.01	94.40	99.06	97.92	94.61	96.44	86.71	96.70
Zn	0.19	0.07	0.12	0.18	0.18	0.29	0.11	< D. L.
Ge	< D. L.	< D. L.	0.07	< D. L.				
Pb	< D. L.	0.25	< D. L.	0.08	0.38	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Sn	0.22	1.92	< D. L.	0.11	0.40	< D. L.	10.74	< D. L.
Fe	1.16	1.64	0.64	2.23	3.02	2.60	1.21	1.62
Ni	< D. L.	0.13	< D. L.					
Se	< D. L.	0.06	< D. L.					
Cd	< D. L.	0.05	< D. L.					
In	< D. L.							
Hg	0.07	< D. L.	0.09					
Mn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.07	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Au	0.23	0.13	< D. L.	< D. L.	0.05	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Sb	0.67	1.85	0.07	0.11	0.06	0.06	1.24	0.06
Bi	0.16	0.06	< D. L.	0.09	0.07	< D. L.	< D. L.	0.05
Co	< D. L.							
Te	< D. L.							
Mo	0.05	< D. L.	0.07	0.07	0.06	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Summe	101.33	100.95	100.47	101.13	99.28	99.78	101.22	99.23
As	0.059	0.438	< D. L.	0.078	0.062	< D. L.	0.400	0.038
S	0.445	< D. L.	0.436	< D. L.	0.126	0.246	0.106	0.416
Ag	0.099	0.029	0.094	0.125	0.111	0.062	0.223	0.193
Cu	97.196	95.337	98.465	96.863	95.480	96.319	90.725	97.318
Zn	0.187	0.064	0.118	0.169	0.178	0.280	0.116	< D. L.
Ge	< D. L.	< D. L.	0.057	< D. L.				
Pb	< D. L.	0.078	< D. L.	0.023	0.118	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Sn	0.118	1.038	< D. L.	0.056	0.213	< D. L.	6.015	< D. L.
Fe	1.309	1.885	0.718	2.510	3.468	2.955	1.441	1.855
Ni	< D. L.	0.144	< D. L.					
Se	< D. L.	0.050	< D. L.					
Cd	< D. L.	0.028	< D. L.					
In	< D. L.							
Hg	0.022	< D. L.	0.030					
Mn	< D. L.	< D. L.	< D. L.	< D. L.	0.082	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Au	0.074	0.044	< D. L.	< D. L.	0.017	< D. L.	< D. L.	< D. L.
Sb	0.349	0.975	0.034	0.054	0.032	0.031	0.677	0.030
Bi	0.047	0.018	< D. L.	0.027	0.020	< D. L.	< D. L.	0.014
Co	< D. L.							
Te	< D. L.							
Mo	0.033	< D. L.	0.047	0.044	0.042	< D. L.	< D. L.	< D. L.

dort vorkommenden Chalkopyritvorkommen im Quarzporphyr sollten nach Pferschy (1929) auch goldhaltig sein. Intensivere Geländearbeit und Probenentnahme in diesem Gebiet wäre erforderlich, um Vergleiche mit den Schlacken anzustellen.

In den Proben des Vorkommens im Ultental treten folgende Phasen auf: Pyrit, Chalkopyrit, Galenit, Sphalerit und eine Phase mit fahlerzähnlicher Zusammensetzung. In der Literatur (Baumgarten et al., 1998; Fuchs, 1988; Gasser, 1913) werden daneben noch Arsenopyrit, Markasit, Pyrrhotin neben Sekundärmineralen wie Cerussit, Limonit und Malachit genannt. Aus den Erzphasen ergibt sich ein theoretisches Elementspektrum von Cu, Ag, Sb, As, Bi, Pb und Zn, das in möglichen Verhüttungsprodukten (vor allem in Sulfid- und Metallphasen, sowie intermetallischen Verbindungen) auftreten würde. Fe wäre vor allem in den Schlackenphasen zu finden. Weitere Elemente, die gegebenenfalls in Fahlerz auftreten (Hg, Ni, Co, Sn, Ge, Te, Se) lagen bei der Messung der fahlerzähnlichen Phase nur in Einzelfällen über der Nachweisgrenze.

Mit dem Vorkommen von Eyrs liegt eine Pb-Zn-Cu-Vererzung vor. In den Proben wurde das Auftreten folgender Erzphasen festgestellt: Pyrit, Chalkopyrit, Covellin, Lepidokrokit, Arsenopyrit, Sphalerit, Bismuthinit, Cobaltit, Elektrum, gediegen Gold und Bismut. Nach Exel (1980) und Exel (1998) treten noch Galenit, Pyrrhotin und Fahlerz auf. Hinsichtlich des Haupt-, Neben- und Spurenelementgehaltes möglicher gewonnener Cu-Verhüttungsprodukte sind die Elemente Cu, As, Co, Bi, Au und Ag vor allem in Sulfid- und Metallphasen zu erwarten. Erweitert durch die Literaturangaben sind noch Pb, Sb, Ni, Sn, Ge und Te mit einzubeziehen. Fe und Zn würden sich vor allem in den Silikat- bzw. Oxidphasen der Schlacke anreichern.

Beim Vorkommen am Pfunderer Berg treten vor allem Cu-Pb-Zn-Fe-Ag-Vererzungen in Erscheinung. In den Schliffen konnten vor allem Chalkopyrit und Pyrit beobachtet werden. Daneben treten auch Sphalerit und Bi-Phasen auf. Unter Einbeziehung der in der Literatur angegebenen Phasen (Baumgarten et al., 1998; Krismer et al.,

2012b) kann angenommen werden, dass bei einer möglichen Verhüttung der Erze die Elemente Cu, Ag, Sb, Fe, As, Bi, Pb, Mo und Au vorwiegend in Sulfiden und Metallen zu finden sind. Ca, Mg, Al, Fe, Zn, Ti, Mn, Sr, K und Si wären in den Silikat- und Oxidphasen zu erwarten.

In den Schliffen von Prettau konnte das Auftreten folgender Phasen beobachtet werden: Chalkopyrit, Pyrit, Sphalerit, Fahlerz und Bi-Phasen (u.a. Bismuthinit und Krupkait). Gemeinsam mit den Angaben aus Baumgarten et al. (1998) sind die Elemente Cu, Bi, Au, Pb, Mo, Sb, As und Ni in möglichen Verhüttungsprodukten vorwiegend in den Sulfid- und Metallphasen zu finden. In den Silikaten und Oxiden würden die Elemente Fe, Mg, Al, Cd, Zn und B enthalten sein.

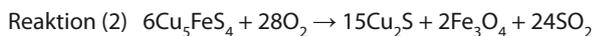
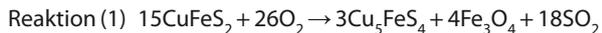
Bei Bedovina handelt es sich um eine Lokalität, bei der zwei Vorkommen unterschieden werden: einerseits ein Wolfram-Vorkommen mit Scheelit, Apatit, Rutil, selten Kassiterit, Hämatit, Synchronit (Ce) und Molybdänit und andererseits ein zweites Vorkommen mit Cu-Sulfiden sowie Pyrit, Sphalerit, Galenit, Cobaltit, Argentit/Akanthit, Fahlerz und Ag- sowie Bi-Phasen (Frizzo et al. 2010). In den bearbeiteten Schliffen traten aber nur vier Erzphasen in Erscheinung: Chalkopyrit, Pyrit, Magnetit und Hämatit. Anhand der bei Frizzo et al. (2010) zusätzlich angeführten Phasen ergibt sich ein theoretisches Elementspektrum von Sn, Pb, Mo, Co, As, Sb, Ag, Bi, Cu für die Sulfide und Metalle sowie W, Ca, P, Ti, Zn, Fe und Ce für Silikate und Oxide in möglichen Verhüttungsprodukten.

Beim Vorkommen am Schneeberg handelt es sich im Wesentlichen um eine Pb-Zn±Cu-Vererzung. Die Proben vom Schneeberg stellten die Einzigen dar, in denen Sn-Phasen in Form von kleinen Stannit-Einschlüssen auftraten. Die Hauptphasen der Vererzung bilden Sphalerit, Galenit, Pyrrhotin und Chalkopyrit; die häufigsten Nebengemengteile sind Pyrit, Arsenopyrit und Magnetit. Untergeordnet finden sich Fahlerz, Au-Ag-Hg-Verbindungen, Pentlandit, Bornit, Cubanit, Boulangerit und Meneghinit (Ungerank & Holzmann, 2011). Somit ergibt sich ein theoretisches Elementspektrum für Sulfid- und Metallphasen bestehend aus: Pb, Cu, As, Sb, Ag, Bi, Au, Ag und Ni. Die Elemente Zn und Fe würden vorwiegend in Silikat- und Oxidphasen der Schlacken eingebaut werden.

6. Interpretation

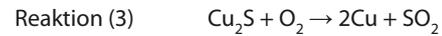
Metallurgie

Hauptbestandteile aller Sulfidphasen sind Cu, S und Fe. Viele der Cu-Sulfid-Körner zeigen einen ansatzweise zonierten Aufbau mit Fe-reichen Phasen in der Mitte des Einschlusses hin zu immer geringeren Fe-Gehalten im Randbereich. Die Abfolge ist dabei von innen nach außen: Pyrrhotin → Chalkopyrit → Bornit mit Chalkopyrit-Entmischungen → Bornit → Digenit → Chalkosin & Covellin. Diese Abfolge ist als direkte Folge der kontinuierlichen Entschwefelung der Sulfid-schmelze während des Verhüttungsvorganges zu interpretieren. Die Kernbereiche sind demnach Fe-reich und den Cu-Phasen im Ausgangserz ähnlich. Wichtigster Kupferträger ist in allen hier angeführten Vererzungen Chalkopyrit. Zum Rand hin sind die Sulfideinschlüsse durch die Reaktion mit Sauerstoff bei hohen Temperaturen nach folgenden Reaktionen abgereichert:

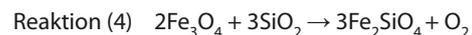


Reaktion (1) und (2) laufen kontinuierlich ab, dabei reagiert Chalkopyrit (CuFeS_2) mit Sauerstoff zu Bornit (Cu_5FeS_4) und Magnetit (Fe_3O_4) unter Abgabe von SO_2 , welches gasförmig aus dem Ofenschlot entweicht. Der verbleibende Sulfidteil (Bornit) in der Charge ist durch die höhere Sauerstoffaffinität von Eisen (im Vergleich zu Kupfer) deutlich an Cu angereichert (Faktor 5). Das verbleibende, an Schwefel gebundene, Eisen im Bornit wird nach Reaktion (2) in Magnetit umgewandelt und Kupfer bildet mit dem restlichen Schwefel Chalkosin/Digenit. Um in letzter Konsequenz metallisches Kupfer zu erzeugen, ist es erforderlich, in der Charge gegebenenfalls bereits enthaltene Cu-Oxid Phasen unter Kohlebedeckung im Ofen zu reduzieren. Die mineralogischen Untersuchungen zeigen jedoch klar, dass Kupfer zu einem signifikanten Teil an Schwefel gebunden ist (Sulfideinschlüsse). Das in Reaktion (2) gebildete Cu_2S kann durch weitere Entschwefelung weiter an Kupfer angereichert werden. Ist zu viel Sauerstoff im Ofen anwesend, bilden sich analog zu Magnetit Cu-Oxid Phasen. Die Charge würde kein metallisches Kupfer abgeben. Ist unter

Kohlebedeckung wenig Sauerstoff vorhanden, bildet sich nach folgender Reaktion kontinuierlich metallisches Kupfer:



Der unvollständige Ablauf von Reaktion (3) ist in zahlreichen Metalleinschlüssen mit Sulfidsaum abgebildet. Generell kann aber durch die Anwesenheit von größeren Mengen an metallischen, kupferreichen Einschlüssen, sowie Magnetit und Olivin abgelesen werden, dass die Sauerstoffugazität im Großteil des Ofens während des Schmelzvorganges im, für die Kupferherstellung, typischen Bereich gelegen haben muss. Wichtig ist hierbei vor allem die Trennung von Fe (also Oxid/Silikat) und Kupfer (als Metall/Sulfid). Magnetit wird in Reaktion (1) und (2) gebildet. Die Phase ist in Kupferschlacken sehr häufig, zum Teil tritt sie auch als Einschluss in den Sulfidtropfen auf. Zum Teil ist neben Magnetit auch das Auftreten von Hämatit und vermutlich Wüstit zu beobachten. Das lokale Auftreten von hämatithaltigen Domänen in den Schlacken weist auf lokal erhöhte Sauerstoffugazität hin, die auch zu einer Oxidation von metallischem Kupfer führt. Radialstrahlige Entmischungen, die unter dem Auflichtmikroskop kaum von Magnetit zu unterscheiden sind, wurden von Metten (2003) als Wüstit identifiziert. Bei Anwesenheit von SiO_2 (z.B. Quarz) kann Magnetit zu Olivin reagieren. Olivin ist die häufigste Silikatphase in den Schlacken:



Ähnlich wie bei Metten (2003) treten in den Schlacken skelettartige Olivine auf. Neben dieser Art treten noch weitere stängelige Formen auf, die einen leiterartigen oder h-förmigen Aufbau aufweisen. Teilweise kommen auf engem Raum beide Formen nebeneinander vor. Nach Donaldson (1976) repräsentieren die langen, stängeligen Olivine, welche dieser als Ketten-Olivine bezeichnet, wesentlich schnellere Abkühlungsraten als die isometrischen Olivine. Bei Metten (2003) und Krismer et al. (2012a) werden die unterschiedlichen Habitus als Unterscheidungsmerkmal zwischen Plattenschlacken und Schlackenkuchen, bzw. Übergangsformen zwischen diesen herangezogen. Das Auftreten von stängeligen und

isometrischen Formen innerhalb einer einzelnen Probe zeigt, dass die Abkühlungsraten während der Kristallisation vergleichbar mit Schlackenkuochen sind (Krismer et al., 2012a). Plattenschlacken, die bei Fennhals nicht auftreten (Anguilano et al., 2009), zeigen vorwiegend stängelige Formen, welche auf eine höhere Abkühlungsrate hinweisen (Krismer et al. 2012a). Da die einzelnen Olivin-Formen in unterschiedlichen Anteilen in den einzelnen Proben auftreten und zudem die Proben aus einer ungeordneten Sammlung von Schlacken stammen, kann keine generelle Aussage über die Abkühlungsrate getroffen werden. Bezüglich der Zusammensetzung liegen alle Olivine nahe der Zusammensetzung von Fayalit.

Provenienz

Die Kupfertropfen der Schlacken von Fennhals enthalten durchschnittlich 1 Gew.% Zinn. Diese konsistent auftretenden Sn-Gehalte sind für Schlackenfunde aus den Ost- und Südalpen außergewöhnlich. Eine der untersuchten Proben zeichnet sich jedoch durch besonders hohe Zinnkonzentrationen aus. Die Sn-reichen Tropfen treten in einer diskreten Domäne in der Probe auf. Die Auswertungen der Analysen zeigen, dass hohe Sn-Gehalte stets in Verbindung mit erhöhten Bi- und Ag-Gehalten auftreten. Diese Beobachtungen weisen sowohl auf eine chemisch inhomogene Charge hin, als auch auf ein Erzkonzentrat, welches meist als Nebengemengteil Sn-Phasen (z.B. Stannit oder Kassiterit) enthält, die aber in isolierten Bereichen innerhalb der gesuchten Vorkommen aber durchaus auch Haupterzphasen gewesen sein können. Die Möglichkeiten, dass Zinn absichtlich zur Herstellung von Bronze zugegeben wurde, beziehungsweise Bronzeobjekte recycelt worden sind, werden ausgeschlossen, da Sekundärmetallurgie keine größeren Schlackenmengen mit inhomogenen Charakter und hohen Sulfidkonzentrationen erzeugt. Zinn muss demnach im Roherz enthalten und in der Lagerstätte inhomogen verteilt gewesen sein. Zu diesem Schluss gelangen auch Aguilano et al. (2009).

Von den untersuchten Erzproben wies nur eine Probe nachweisbare Sn-Phasen auf. Dabei handelte es sich um eine Probe vom Schneeberg die Stannit ($\text{Cu}_2(\text{Fe,Zn})\text{SnS}_4$) enthielt. Stannit tritt dort

aber heute in so geringem Ausmaß auf, so dass dies die hohen Sn-Gehalte nicht erklären kann. Ein weiteres mögliches Vorkommen, für das in der Literatur Sn-Phasen angegeben werden, ist Bedovina bei Predazzo. Frizzo et al. (2010) erwähnen das untergeordnete Auftreten von Kassiterit (SnO_2). In den Proben konnten außer Pyrit, Chalkopyrit, Hämatit und Magnetit jedoch keine weiteren Erzphasen festgestellt werden. Im Fall von Bedovina wäre es erforderlich abzuklären, in welchen Bereichen Sn-Phasen auftreten und auch, in welchem Ausmaß diese vorhanden sind.

Die Metalltropfen in den Schlacken weisen eine sehr heterogene Zusammensetzung mit schwankenden Elementgehalten auf. Generell ist eine positive Korrelation der Elemente Sn, Ag, Bi sowie Sb und As zu erkennen. Das Sb/As Verhältnis ist dabei $\gg 1$. Zusammen mit den relativ hohen Bleikonzentrationen kann man auf ein Chalkopyrit dominiertes Erz schließen, welches zum Teil größere Mengen an Pb-Bi-Ag-Sulfiden in Paragenese mit Sn-Phasen, sowie Sb-dominierte Sulfosalze (z.B. Tetraedrit) enthält. Die Zn-Gehalte in den Silikat- und Oxidphasen weisen zusätzlich auf das Vorhandensein von Zn-Phasen hin (z.B. Sphalerit). Vorstellbar wäre, dass Erze eines Cu-Pb-Ag- $\text{Fe}\pm\text{Zn}\pm\text{As}\pm\text{Sb}\pm\text{Sn}\pm\text{Bi}$ -Vorkommens verwendet wurden. Anhand dieser Elementgehalte kämen folgende Vorkommen in Frage: Pfunderer Berg, Schneeberg, Prettau, Bedovina und Ultental. Eine eindeutige Zuordnung zu einem der bekannten und im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Vorkommen ist somit nicht möglich. Eyr's kann auf Grund des Vorkommens von Co- und Au-Phasen ausgeschlossen werden, da sich diese in der Zusammensetzung der Schlacken widerspiegeln hätten. Fokussiert man das Ausschlussverfahren auf Sn-Phasen, bleiben nur noch der Schneeberg und Bedovina übrig. In Proben des ersteren Vorkommens konnten im Rahmen dieser Arbeit Sn-Phasen beschrieben werden. Für Bedovina werden in der Literatur Sn-Phasen angeführt. Als alleiniger Ausschlussgrund reicht dies jedoch nicht, da es immer noch denkbar ist, dass die Erze aus einem, wenn auch nur sehr lokalen, Sn-führenden Bereich stammen könnten, der keinen Einzug in die Literatur gefunden hat. Auch wäre ein Vergleich mit weiteren Erzvorkommen (z.B. Martell, Malga Tassulla, Laurein, Lavis, Villnöss,

Stilfs, etc.) nötig, um weitere Vorkommen in die Überlegungen mit einzubeziehen. Des Weiteren sollte neben diesem mineralogischen Ansatz eine isotopengeochemische Untersuchung der Schlacken und Vorkommen eine zusätzliche Eingrenzung ermöglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein überblicksmäßiger Survey anhand von Proben ausgewählter Vorkommen durchgeführt. Da die Vorkommen oft sehr inhomogen aufgebaut sind, wäre intensivere Geländearbeit und Probennahme erforderlich. Hierbei gilt es die einzelnen Vorkommen möglichst flächendeckend - und aus verschiedenen Teufen - zu beproben und sowohl geochemische als auch mineralogische Untersuchungen durchzuführen. Damit wäre ein Informationsgewinn zu erreichen, der auch die Bandbreite der Schwankungen eines Vorkommens abdecken sollte.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass keine eindeutige Zuordnung zu einem der untersuchten Vorkommen möglich war und somit die Frage nach der Herkunft der Erze nach wie vor ungeklärt ist. Ungeklärt bleibt auch die Standortfrage, da in der näheren Umgebung keine Cu-Erze auftreten. Anguilano et al. (2009) vermuten, dass der Standort auf Grund der Verfügbarkeit von Wasser, Brennholz und seiner isolierten Position ausgewählt wurde. Metten (2003) stellt ähnliche

Überlegungen hinsichtlich der Schlackenplätze auf den Hochflächen von Lavarone und Vézzena an, in deren Nähe ebenso kein Kupfervorkommen bekannt ist. Sie verweist dabei vor allem auf den Bedarf an Brennholz. Da der Verhüttungsplatz von Fennhals jedoch wesentlich kleiner ist, und somit auch deutlich geringere Mengen an Brennstoff benötigte, scheint eine Ansiedlung nur auf Grund des Vorkommens von Holz unwahrscheinlich. Da bei einem Transport des Erzes beträchtliche Strecken und Höhenunterschiede bewältigt werden mussten, bleibt die Frage sicherlich offen, ob es nicht doch geeignetere Orte gegeben hat, die ebenso Isolation geboten hätten, sich aber näher an einem Erzvorkommen befänden. Warum also gerade der Standort Fennhals ausgewählt wurde, bleibt unklar.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Heinrich Hauser für die Zurverfügungstellung der Schlacken, sowie für dessen Teilnahme an der Geländebegehung am Nonsberg bedanken. Auch Hannah Pomella und Hanns Oberrauch danken wir für ihre Teilnahme an der Geländebegehung. Wir bedanken uns außerdem bei Benno Baumgarten für das sorgfältige Korrekturlesen.

Literaturnachweis

- Aguilano, L., Oberrauch, H., Hauser, H., Rehren, T. & Artioli, G. (2009): Copper smelting at Fennhals-Kurtatsch (South Tyrol). In: Moreau, J. F., Auger, R., Chabot, J. & Herzog, A. (Hrsg.) (2009): Proceedings of the 36th International Symposium on Archaeometry, Quebec City, Canada 2-6 May 2006. Cahiers d'archéologie du CELAT, n. 25, Série Archéométrie, n. 7. CELAT, Université Laval, Quebec, S. 375-382.
- Avanzini, M., Bargossi, G. M., Borsato, A., Castiglioni, G. B., Cucato, M., Morelli, C., Prosser, G. & Sapelza, A. (2007): Erläuterungen zur geologischen Karte von Italien im Maßstab 1:50.000, Blatt 026 „Eppan“. Servizio Geologico d'Italia – APAT, 184 S.
- Baumgarten, B., Folie, K. & Stedingk, K. (1998): Auf den Spuren der Knappen. Bergbau und Mineralien in Südtirol, Tappeiner, Lana.
- Donaldson, C. H. (1976): An experimental investigation of olivine morphology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 57, S. 187-213.
- Exel, R. (1980): Die Mineralien Tirols. Band 1, Südtirol und Trentino, Athesia, Bozen.
- Exel, R. (1998): Lagerstättenkundliche und montanhistorische Erhebungen über den Erzbergbau in Südtirol (Provinz Bozen, Italien). *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 42, Wien.
- Frizzo, P., Peruzzo, L. & Dellantonio, E. (2010): The copper-wolfram deposit of Bedovina (Trento, Italy). *Geo.Alp*, Vol. 7, S. 55-70.
- Fuchs, H. W. (1988): Die transversalen Erzgänge im Gefolge der herzynischen Granitintrusionen in Südtirol. *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, Bd. 9, S. 19-32.
- Gasser, G. (1913): Die Mineralien Tirols einschließlich Vorarlbergs und der Hohen Tauern. Innsbruck.
- Hauser, L. (1986): Die bronzezeitlichen Kupferschmelzöfen in „Fennhals“ über Kurtatsch. *Der Schlern*, 60, S. 75-87.
- Hauser, L. & Nothdurfter, H. (1986): Bronzezeitliche Kupferschmelzöfen aus Fennhals. *Denkmalpflege in Südtirol*, S. 177-201, Landesdenkmalamt (Hrsg.), Athesia, Bozen.
- Krismer, M., Chiamonte, J., Koch Waldner, T., Goldenberg, G. & Tropper, P. (2012a): Mineralogische und chemische Untersuchungen an metallurgischen Verhüttungsprodukten von der Wagstättalm bei Jochberg (Kitzbühler Alpen, Tirol). *Geo.Alp*, Vol 9, S. 100-109.
- Krismer, M., Vavtar, F. & Tropper, P. (2012b): Die Polymetallische Lagerstätte Pfunderer Berg bei Klausen (Südtirol), S. 210-216. In: Oeggel, K., Schaffer, V. (Hrsg.) (2012): Die Geschichte des Bergbaus in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten. Proceedings zum 6. Milestone-Meeting des SFB HiMAT vom 3.-5.11.2011 in Klausen/Südtirol, Innsbruck University Press, Innsbruck.
- Metten, B. (2003): Beitrag zur spätbronzezeitlichen Kupfermetallurgie im Trentino (Südalpen) im Vergleich mit anderen prähistorischen Kupferschlacken aus dem Alpenraum. *Metalla*, 10, S. 1-122.
- Mostler, H. (1966): Sedimentäre Blei-Zink-Vererzungen in den mittelpermischen „Schichten von Tregiovo“. *Mineralium Deposita*, Vol. 1, Iss. 2, S. 89-103.
- Nothdurfter, H. (1993): Zur bronzezeitlichen Kupfergewinnung im Trentino und in Südtirol. In: Steuer, H., Zimmermann, U. (Hrsg.) (1993): *Montanarchäologie in Europa. Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg im Breisgau vom 4. bis 7. Oktober 1990*, Jan Thorbecke Verlag, Sigmaringen.
- Pferschy, A. (1929): Karte der nutzbaren Minerallagerstätten der Provinzen Bolzano (Bozen) und Trento. *Berg- und Hüttenmännisches Jahrbuch*, Bd. 77, S. 97-104.
- Schmid, S.M., Fügenschuh, B., Kissling, E. & Schuster, R. (2004): Tectonic map of the Alps and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 97, p. 93-117.
- Ungerank, D. & Holzmann, J. (2011): Die Petrologie des Bergbaureviers Pflersch-Schneeberg (Ötztal-Stubai-Kristallin, Südtirol). Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

