



Berg Huettenmaenn Monatsh (2023) Vol. 168 (9): 414–424
<https://doi.org/10.1007/s00501-023-01362-3>
 © Der/die Autor(en) 2023

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Spuren der bronzezeitlichen Kupferverhüttung in der Radmer, Steiermark, Österreich

Susanne Klemm¹, Susanne Strobl² und Roland Haubner²

¹Archäologie & Communication, Wien, Österreich

²Technische Universität Wien, Wien, Österreich

Eingegangen 7. März 2023; angenommen 15. Mai 2023; online publiziert 13. Juni 2023

Zusammenfassung: In der Radmer, Steiermark, Österreich wurden mehrere bronzezeitliche Kupferschlackenfundplätze nachgewiesen. Von drei Fundstellen wurden Kupferschlacken und Ofenwandfragmente sowie ein kleiner Kupfergusskuchen unbekannter Zeitstellung werkstoffkundlich untersucht.

Die Plattenschlacken weisen eine homogene Schlackenstruktur auf und enthalten teilweise nicht umgesetzte Erzkornchen in verschiedenen Oxidationsstadien. Teilweise wurden im Vergleich zu anderen Schlacken erhöhte Konzentrationen an Al und K nachgewiesen, was auf die Verwendung von Ton schließen lässt. Bei den Ofenwandfragmenten ist deutlich der Übergang von der aufgeschmolzenen Schlacke zur lehmigen Ofeninnenwand zu sehen.

Der Kupfergusskuchen enthält Sb-O-Verbindungen sowie Delafossit ($\text{Cu}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$) jedoch wenig S und As. Dies legt die Vermutung nahe, dass verwitterte Kupfer- beziehungsweise Fahlerze für die Erzverhüttung verwendet wurden.

Schlüsselwörter: Gusskuchen, Kupfer, Fahlerz, Schlacke

Bronze Age Copper Smelting Residues from the Radmer, Styria, Austria

Abstract: In the Radmer, Styria, Austria, several Bronze Age copper smelting sites were identified. Slag pieces, furnace wall fragments, and a copper casting cake from three sites were material-scientifically examined.

The thin plate slags have a homogeneous structure and partly contain unreacted ore particles in different oxidation states. In some cases, higher concentrations of the elements Al and K were detected in comparison to other slags, which suggests the use of clay. The transition from the melted slag to the clay lining of the inside of the fur-

nace wall can be clearly seen in the furnace wall fragments. The copper cake contains Sb-O compounds and delafossite ($\text{Cu}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$) but little S and As. This suggests that weathered copper ores or fahlores were used for smelting.

Keywords: Casting cake, Copper, Fahlore, Slag

1. Einleitung

In den Eisenerzer Alpen, Steiermark, Österreich, wurde in der Bronze- und Urnenfelderzeit (ca. Mitte 2. bis frühes 1. Jahrtausend v. Chr.) bereits intensiv Kupfererz abgebaut und verhüttet. Besonders gut bekannt sind Fundstellen von Verhüttungsanlagen im Bereich der Eisenerzer Ramsau, in der Radmer sowie in Johnsbach. Ebenso wurden Fundstellen entlang des Palten-/Liesingtales wie im Südteil der Eisenerzer Alpen entdeckt; in Oberschwärzen im Paltental liegt die einzige in die ältere Eisenzeit datierte Fundstelle. In der Radmer wurden bis dato 16 Kupferschlackenfundplätze und drei Fundstellen von bisher nicht datierbaren Bergbauen dokumentiert. Die Kupferschlackenfundplätze können wohl zum größten Teil der Bronze- und Urnenfelderzeit zugeordnet werden [1]. Der Kupfererzabbau in der Radmer wurde in der frühen Neuzeit um 1550 n. Chr. wieder aufgenommen und bis 1855 n. Chr. betrieben [2–4]. Ein in der Radmer gefundener Kupfergusskuchen mit einem Durchmesser von 38 × 34 cm und einer Dicke von ca. 2 cm stammt aus dieser Zeit [1, 5].

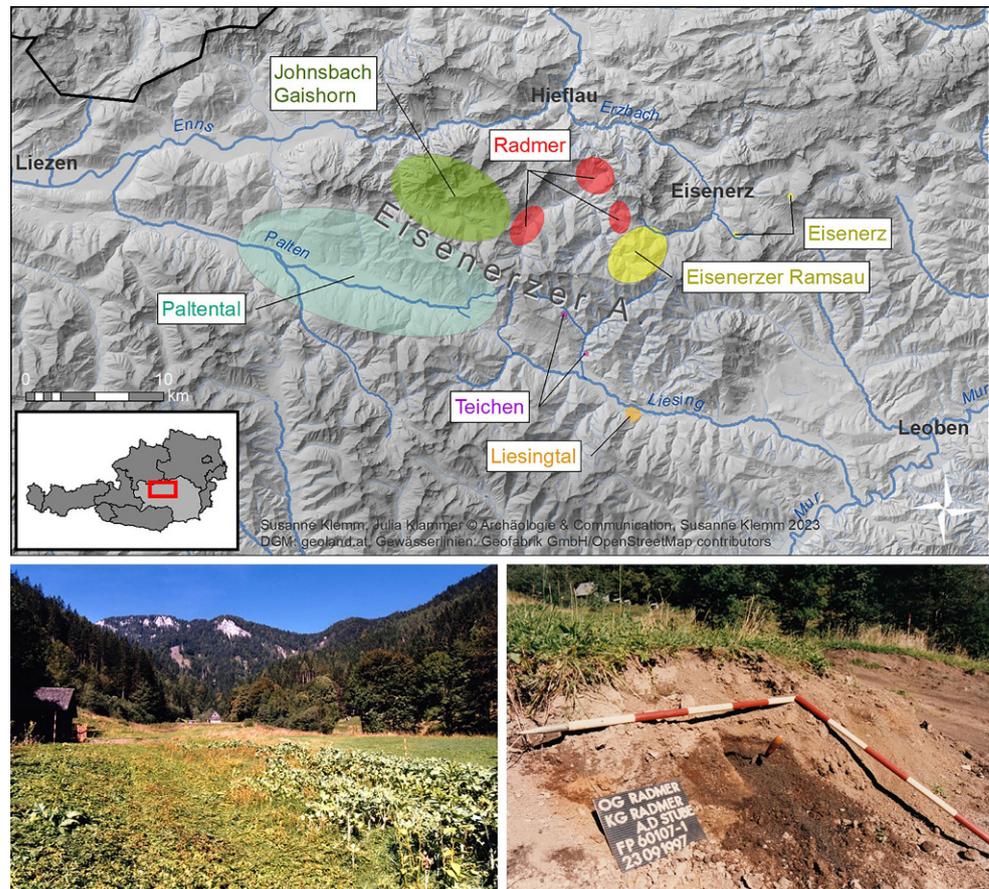
In diesem Beitrag werden Fundstücke von drei Fundstellen aus dem Gebiet der Gemeinde Radmer archäometallurgisch untersucht.

2. Die montanarchäologischen Fundstellen in der Radmer

In Summe wurden bisher 16 prähistorische Kupferschlackenfundplätze bzw. Kupferschmelzplätze sowie drei Fundstellen abgekommener Bergbaue im Gemeindegebiet Rad-

Prof. Dr. R. Haubner (✉)
Technische Universität Wien,
Getreidemarkt 9/164-03,
1060 Wien, Österreich
roland.haubner@tuwien.ac.at

Abb. 1: Übersichtskarte der Steiermark mit den Orten Radmer–Johnsbach–Paltental–S1 in der Eisenerzer Ramsau (a). Kupferschmelzplatz FP 60107.001 Rehfüterung, Radmer (b, c). (Fotos und Karte © S. Klemm)



mer dokumentiert. Diese liegen beiderseits des Radmerbaches in der Vorderradmer sowie im Bereich des Radmerhalses an der Gemeindegrenze zu Eisenerz im Osten sowie in der Hinterradmer beiderseits des Stubbaches bzw. nahe der Gemeindegrenze zu Johnsbach im Westen (Abb. 1; [1]).

Das Gebiet der Radmer gehört als Teil der Eisenerzer Alpen zur östlichen Grauwackenzone. Die Kupfervorkommen in der Radmer werden als faustgroße Nester in den Eisenkarbonaten Ankerit und Siderit beschrieben. In der Hinterradmer nehmen hingegen Gehalt und Häufigkeit von Kupferkies zu, Siderit im Gegensatz zum Ankerit jedoch ab. In diesem Beitrag werden archäometallurgische Untersuchungen von Proben dreier Fundstellen präsentiert.

2.1 Kupferschmelzplatz Rehfüterung/ Spitalgraben

Die Fundstelle (FP 60107.001/005) befindet sich auf der leicht abfallenden Wiese östlich des Spitalbaches, einem Zufluss des Radmerbaches, und südwestlich der Forststraße auf ca. 950 m SH. Erstmals 1994 entdeckt, kam es im August 1997 zu Abschiebearbeiten zur Errichtung einer Rehfüterung. Feinkörniger Schlackensand, Plattenschlacke, grobe Schlackenstücke, angeschlackte Ofensteine, Erzstücke, neuzeitliche Keramik mit Innenglasur und ein auf der Drehscheibe gefertigtes Wandstück eines weiteren Gefäßes kamen

zum Vorschein [1, 6]. Die untersuchten Proben werden in Abb. 2a–c gezeigt.

2.2 Schlackenfundplatz Schreibbach-Dreizipfgraben

Die Kupferschlacken vom Gebiet des Schreibbach-Dreizipfgrabens (FP 60107.006) wurden 1997 gefunden. Die Fundstelle befindet sich südwestlich des gut bekannten Fundgebietes in der Eisenerzer Ramsau auf einer Seehöhe von 900–1500 m SH. Von dieser Fundstelle wurde ein sehr inhomogenes Stück blasiger Schlacke untersucht (Abb. 2d).

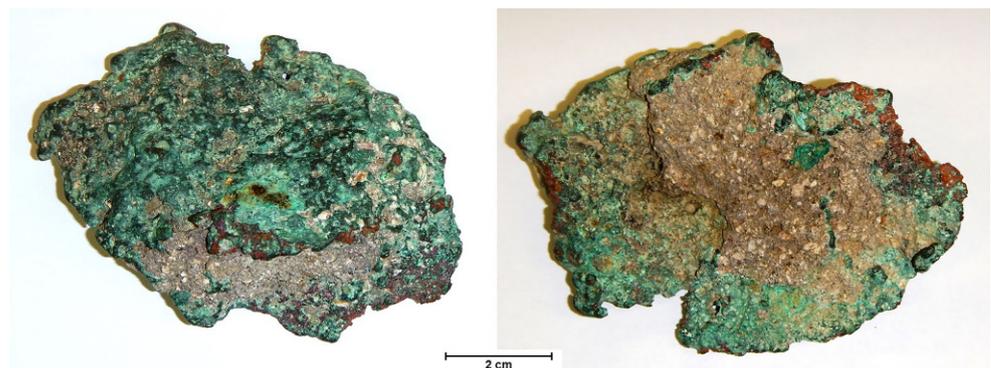
2.3 Kupfergusskuchen aus der Radmer

Gleichfalls im Jahr 1997 wurde das Fragment eines Kupfergusskuchens in der Gemeinde Radmer gefunden, dessen genauer Fundort jedoch unbekannt ist. Das Fragment misst 88 × 62 × 35 mm und hat ein Gewicht von 190 g. Die Farbe der Oberfläche ist hellgrün bis dunkelgrün (Abb. 3; [7]).

Abb. 2: Schlackenproben (a, b) und ein angeschlacktes Ofenlehmfragment (c) vom Kupferschmelzplatz Rehfüterung/Spitalgraben, sowie eine blasige Schlacke (d) vom Schlackenfundplatz Schreiebach-Dreizipfgraben



Abb. 3: Kupfergusskuchen aus der Radmer (a) Oberseite, (b) Unterseite



3. Materialuntersuchungen an den Fundstücken

Die Schlackenproben sowie der Kupfergusskuchen wurden mit einer Labortrennmaschine und einem Diamantsägeblatt geschnitten. Die Proben wurden in Epoxidharz kalteingebettet. Um allfällige Poren und Risse aufzufüllen, wurde eine Vakuumeinbettung durchgeführt. Die metallographische Präparation erfolgte stufenweise mittels Schleifen und Polieren. Die präparierten Schlackenproben konnten sofort mikroskopisch untersucht werden, die Kupferproben wurden zusätzlich mit einer Klemm 2-Lösung geätzt.

Die metallographisch präparierten Proben wurden mittels Lichtmikroskopie (LOM) und Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) untersucht.

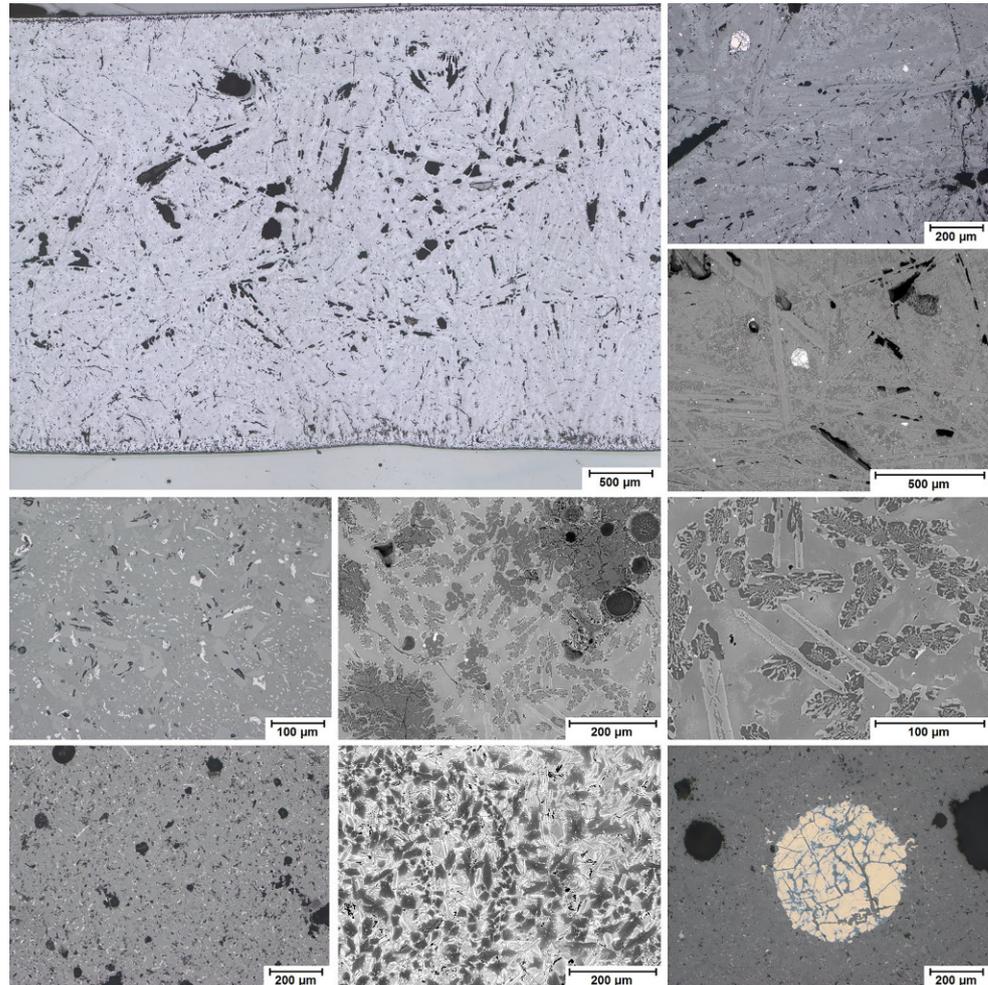
Um mehr über die globalen Zusammensetzungen der Proben zu erfahren, wurden zusätzlich Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) an den metallographischen Schläfen durchgeführt.

3.1 Schlacken der Fundstelle Rehfüterung/Spitalgraben (FP 60107.001/005)

Bei diesen Stücken handelt es sich um Plattenschlacken (Abb. 2a). Es wurden drei der sechs Plattenschlackenstücke metallographisch präpariert; ausgewählte Gefüge sind in Abb. 4 zusammengestellt. Abb. 4a zeigt eine Plattenschlacke mit einer Dicke von etwa 5 mm. Der Querschnitt ist homogen und es sind zahlreiche Lunker zu erkennen, die während der Erstarrung der Schlacke zwischen langen Fayalitbalken entstanden sind. Neben den bis zu 2 mm langen Fayalitbalken liegen neben Glasphase auch vereinzelte runde kupferhaltige Einschlüsse vor (Abb. 4b,c).

Das Gefüge des zweiten untersuchten Plattenschlackenstücks ähnelt in großen Bereichen demjenigen des ersten Stücks (Abb. 4d). An einigen Stellen liegen höhere Konzentrationen an Al und K vor, welche im REM-BSE dunkel erscheinen (Abb. 4e,f). Dies könnte dadurch erklärt werden, dass Feldspäte, vielleicht von der Ofeninnenwand, in die Schlacke gelangt sind. Ob diese Bereiche glasartig erstarrt sind oder ob es sich um kristalline Phasen handelt, kann nicht beurteilt werden.

Abb. 4: Gefüge von drei der sechs vorhandenen Plattenschlacken vom Kupferschmelzplatz Refütterung/Spitalgraben (Abb. 2a). Schlackenstück 1: (a) Querschnitt, (b, c) Schlackengefüge; Schlackenstück 2: (d) Übersichtsbild, (e, f) Detailaufnahmen; Schlackenstück 3: (g) Übersicht, (h) Detailansicht, (i) kupferhaltiger Einschluss ((a, b, d, g, i) LOM, (c, e, f, h) REM-BSE)



Auch im dritten Plattenschlackenstück (Abb. 4g–i) sind dunklere Bereiche im REM-BSE zu sehen, welche jedoch auf erhöhte Konzentrationen von Mg zurückzuführen sind (Abb. 4h). Diese Schlacke enthält auch einen runden kupferhaltigen Einschluss (Abb. 4i), von dem auch eine EDX-Elementverteilung gemessen wurde (Abb. 5). Der Grundkörper des Kupfereinschlusses besteht aus Cu-Fe-S, was dem Ausgangserz Chalkopyrit entspräche. Die sichtbaren Risse sind vermutlich mit Eisensilikat gefüllt, denn es wurden Fe, Si und O nachgewiesen. Der Kupfereinschluss ist von Schlacke umgeben, die aus Fe(Mg)-Silikat (vermutlich Fayalit) sowie Glasphase (Oxide von Ca, Al und Si) besteht.

Von dieser Fundstelle wurde auch ein dickes Laufschlackenstück untersucht (Abb. 2b). Eine Übersichtsaufnahme im Randbereich des Schlackenstücks zeigt, dass neben der aufgeschmolzenen Schlacke auch etwas erhitzter Ofenlehm an der Schlacke anhaften (Abb. 6a). Das Gefüge der Schlacke besteht aus blockigem Olivin (Fayalit) umgeben von Glasphase (Abb. 6b,c). Eine REM-EDX Elementverteilung zeigt, wo die verschiedenen Elemente lokalisiert sind (Abb. 7). Einerseits sieht man kleine Cu-Einschlüsse, welche Cu_2S sein dürften, da auch S an diesen Stellen nachgewiesen wurde. Mg ist mit Fe vergesellschaftet, was gemeinsam mit Si und O dem Olivin entspricht. In der

Glasphase sind Ca, Al, Si und O enthalten. Ob die Glasphase auch teilweise kristalline Phasen enthält, kann aus den vorliegenden Messungen nicht beurteilt werden.

Es wurden auch kupferhaltige Einschlüsse gefunden (Abb. 6d–f), welche jedoch nicht einzeln untersucht wurden. Entsprechend dem Aussehen handelt es sich bei dem Einschluss in Abb. 6d um ein teilweise oxidiertes Erzpartikel. Das Partikel in Abb. 6e dürfte vollständig oxidiert sein und aufgrund der grünen Farbe aus Malachit bestehen. Metallisches Cu ist in Abb. 6f zu sehen.

Die an den metallographischen Schlifften durchgeführten RFA-Messungen (Tab. 1) zeigen ein einigermaßen einheitliches Ergebnis mit den zu erwartenden Schwankungen.

Es wurde auch noch ein Ofenlehmfragment mit anhaftender Schlackenhaut untersucht (Abb. 2c) und die Gefüge sind in Abb. 8 zu sehen. Im LOM (Abb. 8a–c) erkennt man Zonen mit unterschiedlichen Gefügestrukturen, wobei auch metallisches Cu zu erkennen ist (Abb. 8b). Die hellen Bereiche in Abb. 8c bestehen vermutlich aus Eisenoxiden. Die REM-BSE Bilder zeigen ein ähnliches Gefüge (Abb. 8d–f). Der helle, in Abb. 8f zu sehende Bereich besteht überwiegend aus Fe-Silikat, wobei in den weißen Bereichen auch Cu nachgewiesen wurde. Schwefel hingegen konnte nicht detektiert werden. Eine SEM-EDX Elementverteilung wurde

Abb. 5: REM-EDX Elementverteilung eines kupferhaltigen Einschlusses einer der Plattenschlacken vom Kupferschmelzplatz Rehfüterung/Spitalgraben

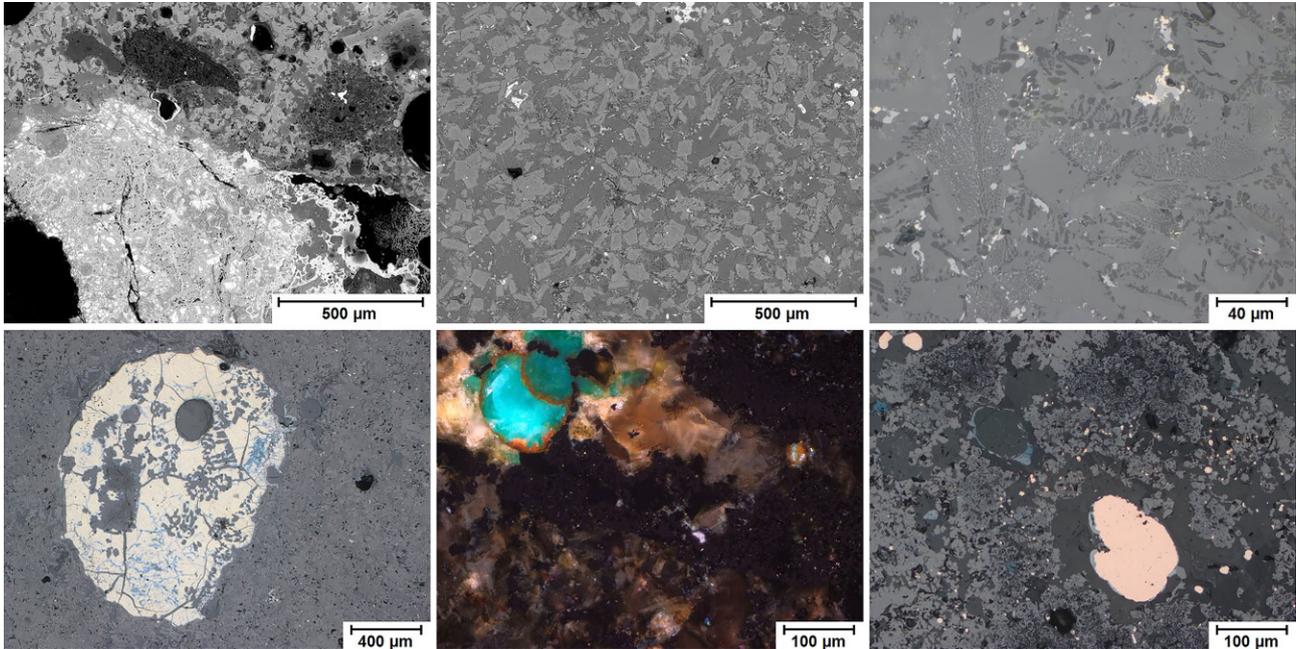
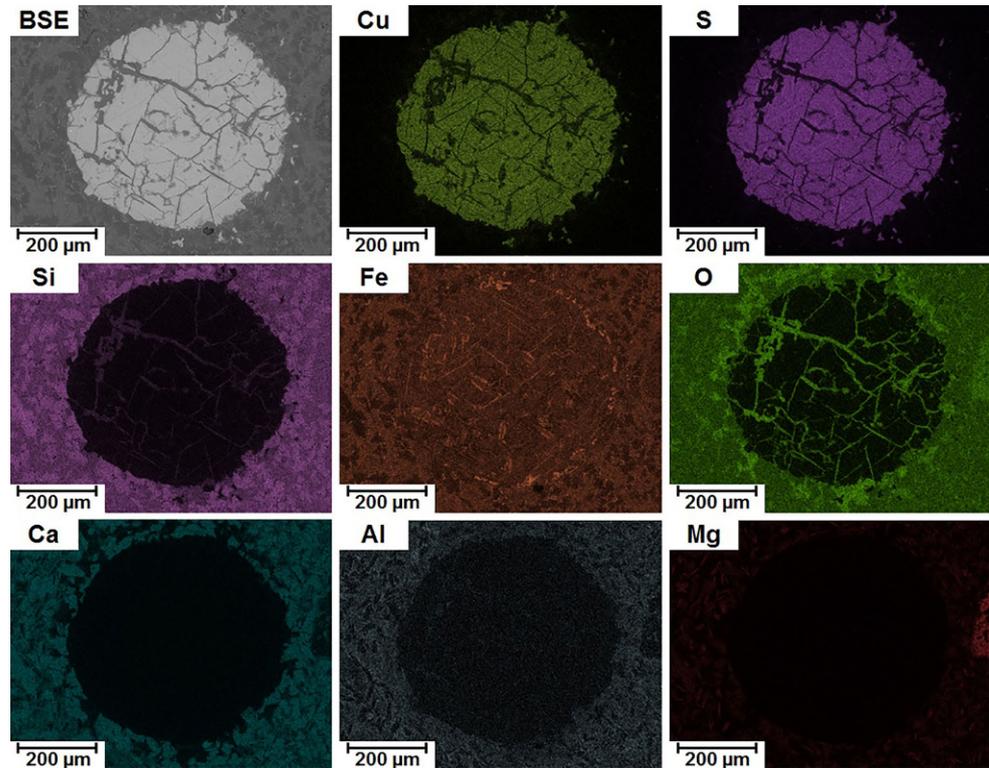


Abb. 6: Gefüge im großen Schlackenstück vom Kupferschmelzplatz Rehfüterung/Spitalgraben (Abb. 2b): (a, b) REM, (c-f) LOM, (e) LOM, polarisiertes Licht

erstellt (Abb. 9) und es ist zu sehen, dass Fe und Cu gemeinsam vorliegen, jedoch nicht als Sulfid. Eine Erklärung wäre, dass am Ende der Ofenreise die noch heiße Ofenwand an Luft auskühlte, wodurch es zur Oxidation der zuvor reduzierten Verbindungen kam. Das restliche Gefüge besteht aus Silikaten, wobei auffällt, dass hier Fe und Mg nicht so wie in

der bereits beschriebenen Plattenschlacke vergesellschaftet sind. Es liegen vermutlich Fe-Oxide und Ca(Mg)-Al-Si-O-Verbindungen vor. Phasenanalysen wurden nicht durchgeführt. Es sind auch noch kleine, lokale Anreicherungen von P erkennbar, welcher aus dem Holz stammen könnte, das als Heizmaterial verwendet wurde.

Abb. 7: REM-EDX Elementverteilung eines Bereichs des großen Schlackenstücks vom Kupferschmelzplatz Refütterung/Spitalgraben

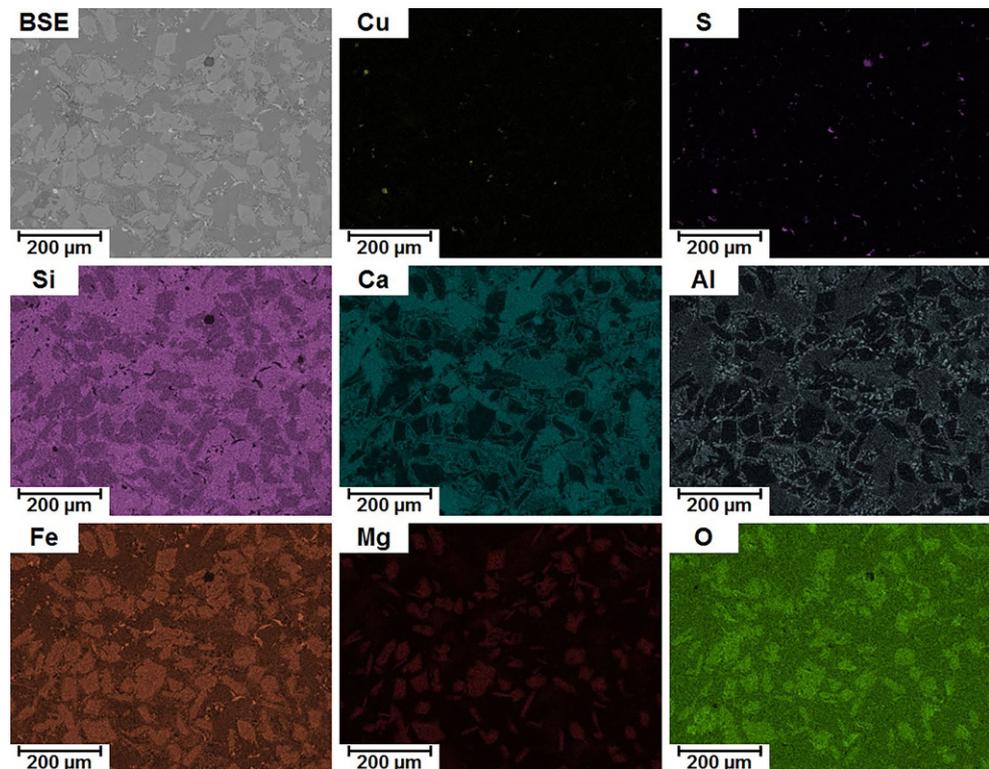


TABELLE 1

RFA-Analysen der Schlackenproben aus der Radmer (Gew.%)

	FP 60107.001/005				FP 60107.006				
	Plattenschlacken			Schlacke groß	Schlacke und Ofenlehm			Blasige Schlacke	
Si	32,50	26,07	28,84	30,69	31,35	47,36	50,20	53,56	46,13
Ca	29,46	20,00	31,19	25,24	24,20	9,19	6,31	17,33	20,39
Fe	24,64	35,07	25,23	29,72	28,46	12,34	10,21	22,06	25,83
Al	3,08	5,78	3,30	3,41	4,36	11,60	13,39	1,46	2,02
Mg	5,41	3,03	5,54	3,01	2,84	4,09	4,78	2,14	2,60
Na	0,10	0,11	0,09	0,07	0,07	0,45	0,54	0,10	0,10
Cu	0,54	1,23	0,15	0,92	1,67	0,80	0,46	0,22	0,21
Mn	0,32	0,40	0,31	0,31	0,28	0,18	0,15	0,25	0,28
Ti	0,16	0,33	0,22	0,19	0,17	0,83	0,81	0,09	0,12
K	2,96	7,40	4,56	5,28	5,98	12,88	13,04	2,40	1,87
S	0,49	0,28	0,39	0,90	0,28	0,10	0,05	0,29	0,35
P	0,05	0,12	0,08	0,16	0,17	0,10	0,08	0,09	0,09
Pb	0,28	0,10	0,11	0,09	0,18	0,06	n.n.	n.n.	n.n.
Ni	n.n.	0,06	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

RFA-Messungen an zwei Teilstücken dieser Probe ergaben, dass im Vergleich zu den Plattenschlacken die Si-, Al- und K-Gehalte deutlich erhöht sind (Tab. 1). Der Fe-Gehalt ist dafür niedriger. Dies deutet auch darauf hin, dass in dieser Probe Anteile des Tons bzw. Lehms der Ofenwandauskleidung enthalten sind.

3.2 Kupferschlacken der Fundstelle Schreibbach-Dreizipfgraben (FP 60107.006)

Die in Abb. 2d blasige Schlacke ist sehr inhomogen und enthält auch Lehm der vermutlich erhitzt wurde. In den lehmhaltigen Bereichen sind viele Poren vorhanden (Abb. 10a), aber es sind auch einige Millimeter große SiO₂ Teilchen enthalten (Abb. 10b,d). Das Gefüge der ursprünglich aufgeschmolzenen Schlacke ist relativ einheitlich (Abb. 10c,e,f).

Eine SEM-EDX Elementverteilung (Abb. 11) im Übergangsbereich Ofenwand/Schlacke zeigt, dass im Bereich

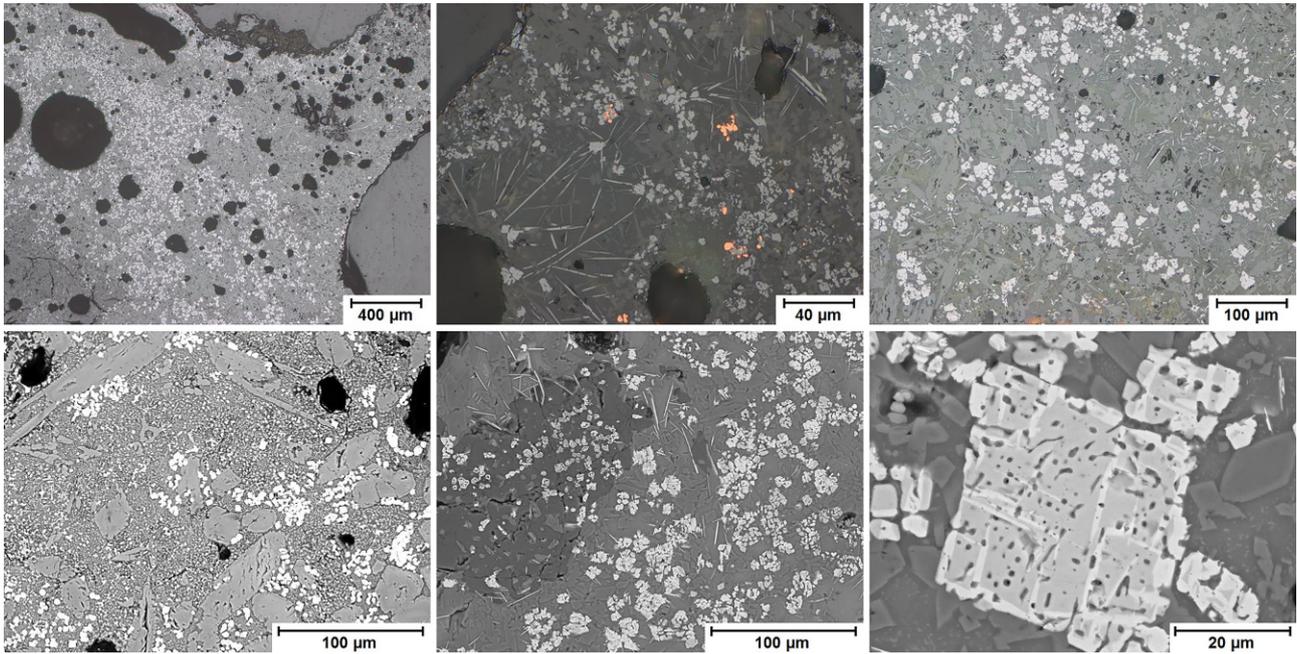
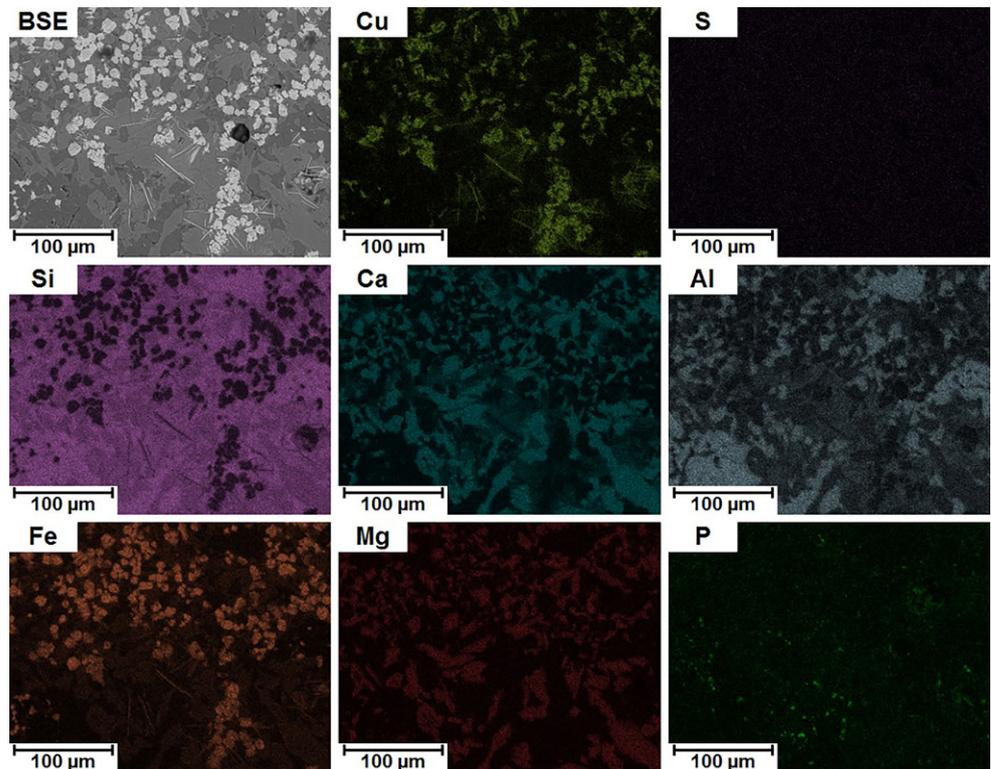


Abb. 8: Gefüge in der angeschlackten Ofeninnenwand vom Kupferschmelzplatz Rehfüterung/Spitalgraben (Abb. 2c): (a–c) LOM, (d–f) REM

Abb. 9: REM-EDX Elementverteilung an einer Probe vom Kupferschmelzplatz Rehfüterung/Spitalgraben



des Lehmanteils (im Bild links) die Elemente K und Al erhöht sind. Im Schlackenbereich liegen wiederum Fe-Silikat und Ca-Al-Si-hältige Glasphase vor.

RFA-Messungen an zwei Teilstücken der Probe ergaben, dass im Vergleich zu den Plattenschlacken nur die Si-Gehalte erhöht (Tab. 1) und die Ca-Gehalte etwas erniedrigt sind.

3.3 Kupfergusskuchen aus der Gemeinde Radmer

Von dem Kupfergusskuchen (Abb. 3) wurde ein Teilstück abgetrennt und metallographisch untersucht. Im polierten Zustand sind im Gefüge zahlreiche Inhomogenitäten zu sehen (Abb. 12a). Neben Lunkern, die bei der Erstarrung entstanden

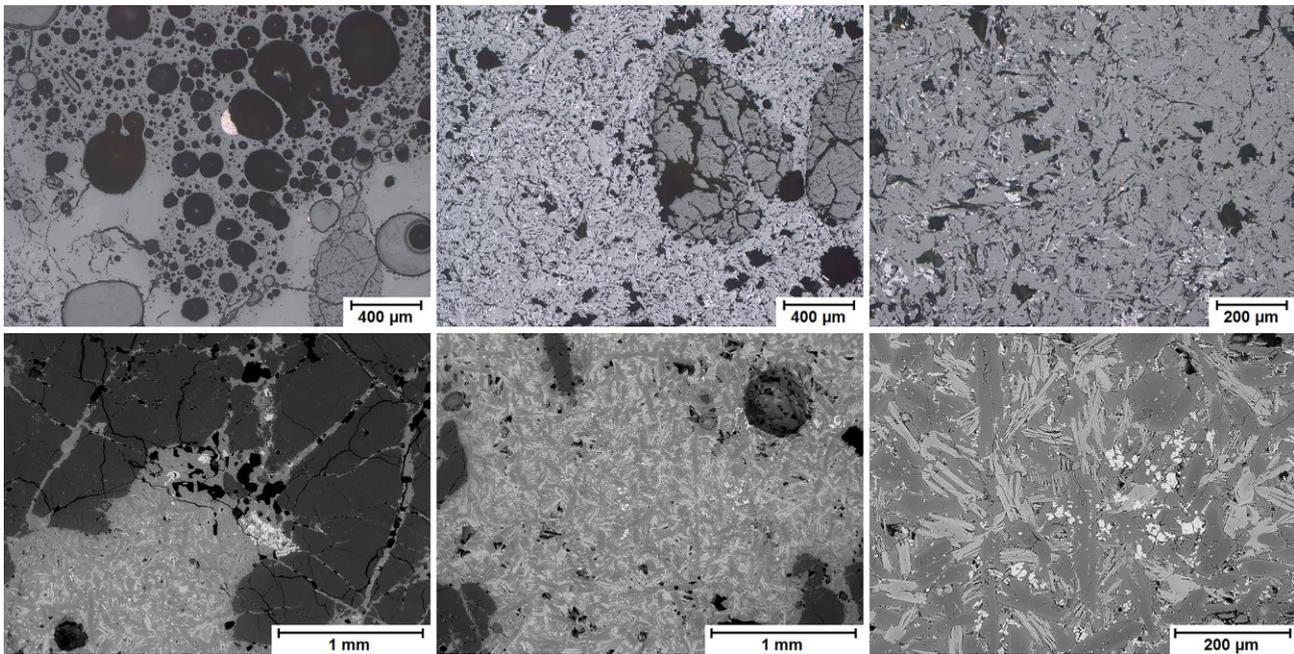
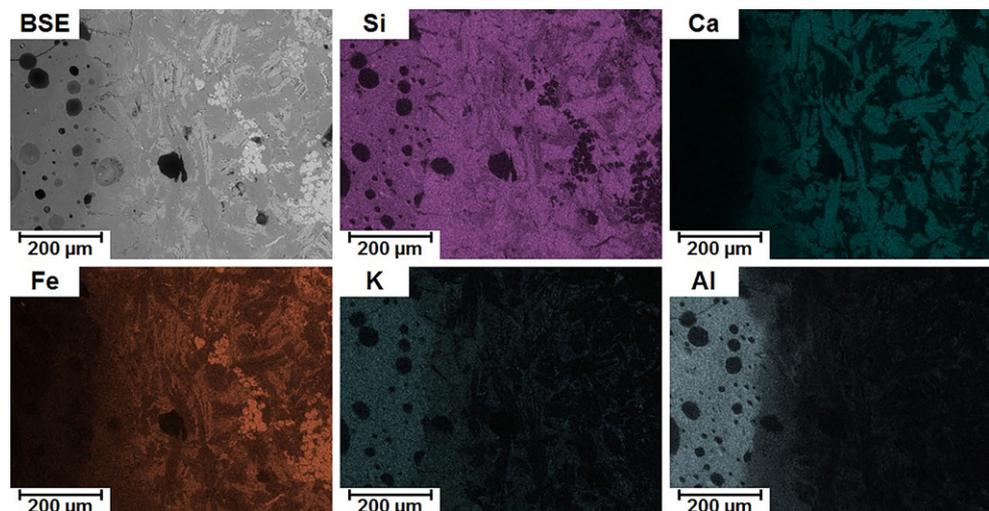


Abb. 10: Gefüge in der blasigen Schlacke von der Fundstelle Schreibbach-Dreizipfgraben (Abb. 2d): (a–c) LOM, (d–f) REM

Abb. 11: REM-EDX Elementverteilung in einem Übergangsbereich zwischen Kupferschlacke und Lehm (Fundstelle Schreibbach-Dreizipfgraben)



den, sind auch bis zu 500 µm längliche Gefügebestandteile erkennbar, welche Lamellen sein könnten (Abb. 12b,c). Dazwischen liegen Strukturen, die einem Eutektikum ähneln (Abb. 12b–d), wobei neben dem metallischen Kupfer eine kugelig ausgebildete Phase vorliegt. Diese kugelige Phase (Abb. 12e) erscheint im polarisierten Licht bunt (Abb. 12f). Damit entspricht es weder einem Cu_2O -Cu Eutektikum, da Cu_2O im polarisierten Licht rot aussieht, noch dem Cu_2S -Cu Eutektikum, da Cu_2S nicht optisch aktiv ist.

Eine REM-EDX Elementverteilung (Abb. 13) zeigt, dass die vorliegenden Kugeln Sb und O enthalten. Ob diese Phase auch Cu beinhaltet, kann aufgrund des umliegenden Kupfers nicht beurteilt werden. In den Lamellen wurden Sb, Ni und O nachgewiesen, was zusammen mit Cu der Verbindung Delafossit ($\text{Cu}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$) [7] entspräche.

In einem anderen Bereich der Probe wurden im REM helle und dunkle Schlieren beobachtet (Abb. 12d). In den Bildern der REM-EDX Elementverteilung (Abb. 14) sieht man, dass der dunkle Bereich neben Cu nur Sauerstoff enthält. Die hellen Bereiche enthalten Sb und O, ähnlich wie die oben beschriebenen Kugeln. In diesen Bereichen wurden auch geringe Mengen an As nachgewiesen. Vereinzelt sind auch kleine Punkte mit S zu sehen.

Wie man nach einer Ätzung mit Klemm 2-Lösung sieht, ist das Kupfer sehr sauber (Abb. 12h). Es kann angenommen werden, dass zuerst reineres Kupfer erstarrte und sich die Verunreinigungen in der Schmelze anreicherten, wodurch verunreinigtes Kupfer zuletzt erstarrte. Bereiche aus reinerem Kupfer erscheinen bei der vorliegenden Ätzung dunkel, das zuletzt erstarrte Kupfer mit den angereicherten Verunreinigungen erscheint hell. Diese vermutlich vor-

Abb. 12: Gefüge des Kupfergusskuchens aus der Radmer. (a–c, e) Polierte Probe, LOM, (f) LOM polarisiertes Licht, (d, g, i) REM, (h) Klemm 2 Ätzung, LOM

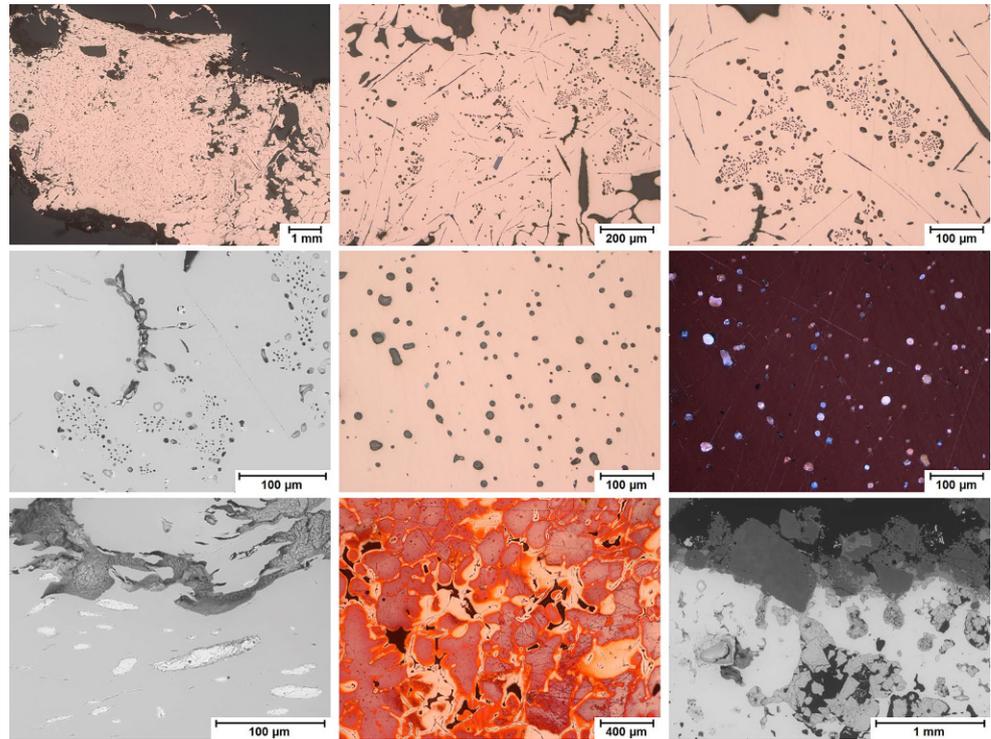
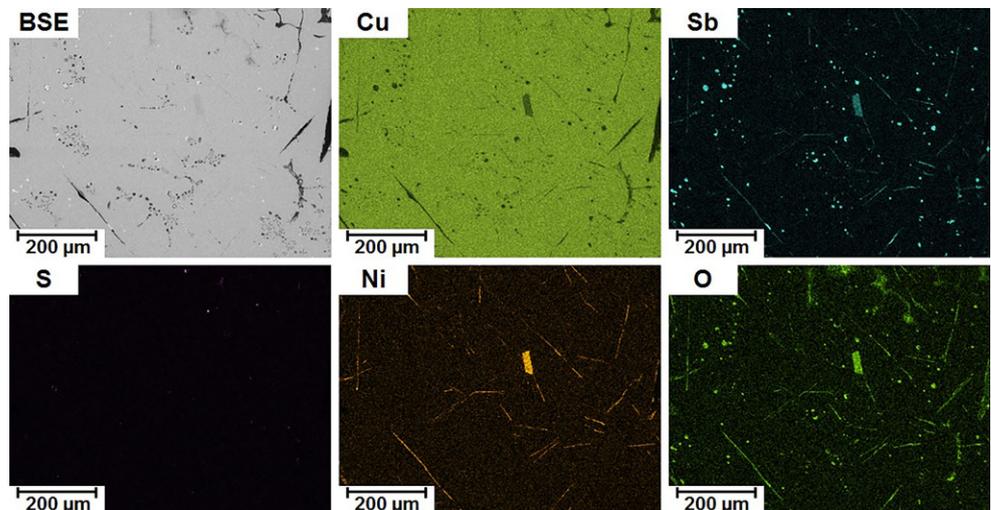


Abb. 13: REM-EDX Elementverteilung von Sb-O-haltigen Einschlüssen im Kupfergusskuchenfragment



handenen Verunreinigungen konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. RFA-Messungen an zwei Proben ergaben Kupfergehalte von über 98 Gew.%. (Tab. 2) sowie etwa 0,2 Gew.% As und 0,4 Gew.% Ni, hingegen schwankte der S-Gehalt zwischen 0,5 und 0,03 Gew.%.

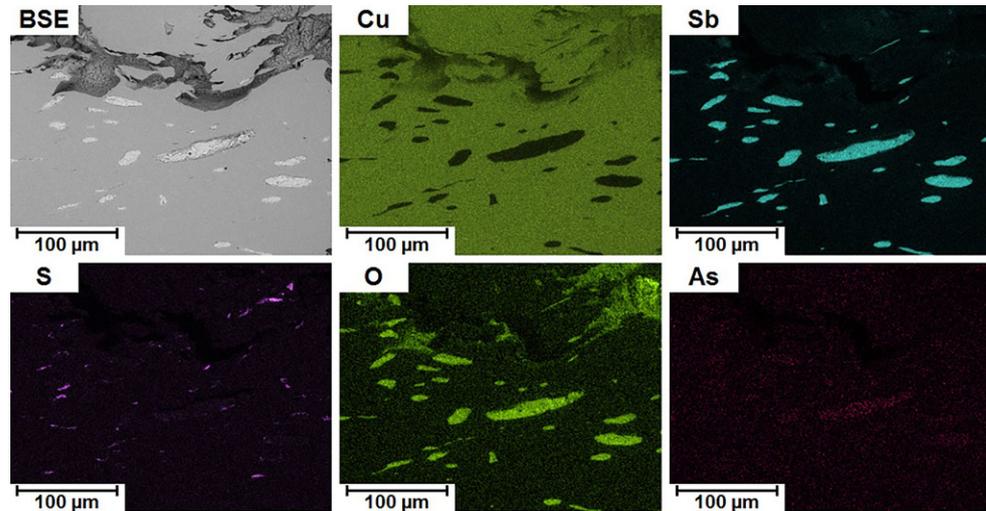
Eine Stelle im Randbereich des Gusskuchens ist in Abb. 12i zu sehen. Bei der im oberen Bildbereich erkennbaren dunkelgrauen Phasen handelt es sich um SiO_2 , wobei auch lokal geringe Mengen an Al und K nachgewiesen wurden. Die hellgrauen Kristalle innerhalb von Löchern im Kupfer enthalten nur Cu und O mit der Zusammensetzung Cu_2O , welche vermutlich bei der Abkühlung des Gusskuchens an der Luft entstanden sind.

Es wurde auch eine RFA-Messung von den nichtmetallischen Anhaftungen an der Probe durchgeführt (Tab. 2). Diese enthalten hauptsächlich Si sowie höhere Al und K Anteile wie es typisch für Tonmineralen ist.

4. Die Kupfererzverhüttung in den Eisenerzer Alpen

Aufgrund der geologischen Situation der Alpen und der Grauwackenzone gab und gibt es sehr viele Kupfererzvorkommen unterschiedlichster Größe entlang des Alpen [8]. Der in der Steiermark am besten untersuchte bronzezeitli-

Abb. 14: REM-EDX Elementverteilung von Delafossit und Sb-O-haltigen Einschlüssen im Kupfergusskuchenfragment



che Kupferschmelzplatz trägt die Bezeichnung S1 und liegt in der Eisenerzer Ramsau [9].

Die Suche nach Kupfererzen und die nachfolgende Metallgewinnung in der Kupferzeit/Spätneolithikum (4. und 3. Jahrtausend v. Chr.) kann sehr einfach erklärt werden. Zitat nach Herdits: „Bringt mir grüne Steine (Malachit) und ich mache daraus ‚Stein, der nicht bricht‘ (Kupfer)“ [10]. Diese ersten Verhüttungsprozesse konnten einfach in einer Schmelzgrube durchgeführt werden, da oxydische Kupferminerale, wie z. B. Malachit, keinen Schwefel enthalten und daher keine Röstung notwendig war [11]. Später, bei der Verwendung von Chalkopyrit und Fahlerzen als Ausgangsprodukt, wurden mehrstufige Verhüttungsprozesse notwendig, da der vorhandene Schwefel durch Rösten entfernt werden musste [12].

Während sämtliche Schlackenproben den bronze- und urnenfelderzeitlichen Schlacken im Aussehen nach anderen Proben aus den Eisenerzer Alpen entsprechen, gibt es in der Region kein vergleichbares Fundstück eines Kupfergusskuchens.

Es sieht so aus, als wäre Kupfer auf einem tonigen Untergrund verschüttet worden. Ein mögliches Szenario wäre, dass ein Schmelztiegel mit flüssigen Cu gebrochen ist und dadurch Schmelze verschüttet wurde. Warum dieses Kupfer nicht nochmals verarbeitet wurde, liegt vielleicht an den vorhandenen Tonanhaftungen. Eine weitere Auffälligkeit dieses Kupfergusskuchens ist die Anwesenheit von Sb-O-Verbindungen, die in Kugelform vorliegen und deren Verteilung einer eutektischen Erstarrung ähnelt. Es wurden auch längliche Ni-Sb-O-Verbindungen im metallischen Cu festgestellt, die Delafossit sein könnten [13].

Die Fahlerzverhüttung ist gut untersucht, wobei zu beachten ist, dass As und Sb während des Röstens verdampfen beziehungsweise in die Schlacke gehen [14]. Beim Rösten nicht entfernter S, aber auch noch vorhandenes As werden in das metallische Kupfer aufgenommen [15].

Es ist natürlich unmöglich, auf die tatsächlichen Herstellungsbedingungen zurückzuschließen, aber die geringen S- und As-Gehalte lassen den Schluss zu, dass Verwitterungsprodukte von Sb-Fahlerz (Tetraedrit, $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) verarbeitet wurden. Derartige Verwitterungsprodukte wä-

ren Malachit, Azurit und Sb-haltige Mineralien wie Partzit, $\text{Cu}_2\text{Sb}_2(\text{O},\text{OH})_7$ und Antimonocker, der aus verschiedenen Mineralien besteht (Valentinit Sb_2O_3 , Senarmontit Sb_2O_3 , Stibiconit $\text{Sb}_3\text{O}_6(\text{OH})$) [16]. Aufgrund der grünen beziehungsweise blauen Farben der Kupferminerale waren derartige Erze leicht zu finden und auch einfach in einem Grubenofen mit Holz oder Holzkohle zu reduzieren.

Bei den meisten Verhüttungsstufen von Kupfererzen fallen Schlacken als Abfallprodukte an, wodurch die Schlackenuntersuchungen einiges über deren Entstehung offenbaren können, aber sicher nicht alles. Mit Hilfe der Metallographie ist es möglich, die Homogenität der Schlacken zu zeigen und die Verteilung der vorliegenden Phasen zu erhalten. Es können auch Erz- und Metalleinschlüsse analysiert werden [17–20].

Die untersuchten Plattenschlacken enthielten überwiegend Fayalit und Glasphase und waren vollständig aufgeschmolzen. Vereinzelt wurden kupferhaltige Partikel gefunden, die hauptsächlich aus Sulfiden bestanden.

Stücke der verschlackten Ofenwand enthielten mehr Al, welches eher in der Glasphase angereichert war. In den Bereichen mit typischem Schlackengefüge war wenig K vorhanden, jedoch in den Bereichen der Ofenwand, welche aus Ton bzw. Lehm bestand, wurde sowohl K als auch Al nachgewiesen.

5. Zusammenfassung

Von verschiedenen bronzezeitlichen Fundstellen der Kupfergewinnung in der Radmer, Steiermark, Österreich, wurden Kupferschlacken, Ofenwandfragmente sowie ein Kupfergusskuchen werkstoffkundlich untersucht.

Die Plattenschlacken weisen eine homogene Schlackenstruktur auf, die überwiegend aus Fayalit und Glasphase besteht. In den Schlacken sind kupferhaltige Partikel aus teilweise nicht umgesetztem Kupfererz eingeschlossen. Im Vergleich zu anderen Fayalitschlacken wurden lokal erhöhte Konzentrationen an Al und K nachgewiesen, was auf Reaktionen zwischen der sich im Ofen bildenden Schlacke und dem Lehm der Ofeninnenwand schließen lässt. Ofenwand-

TABELLE 2
RFA-Analysen des Kupfergusskuchens aus der Radmer (Gew.%)

Gew. %	Kupfergusskuchen	Anhaftungen
Cu	98,75	99,07
Ni	0,43	0,47
S	0,51	0,03
As	0,21	0,21
Fe	0,02	0,05
P	0,03	0,03
Si	0,05	0,11
Al	0,01	0,02
K	–	–
Ca	–	–
Na	–	–
Mg	–	–
Ti	–	–
Mn	–	–

fragmente zeigen deutlich den Übergang von aufgeschmolzener Schlacke zur Innenseite der mit Lehm verkleideten Ofenmauern.

Der Kupfergusskuchen scheint durch Verschütten von Kupferschmelze entstanden zu sein. Im metallischen Cu sind kugelige Sb-O-Verbindungen sowie längliche Delafossitkristalle zu sehen. Das Cu enthält jedoch wenig S und As. Es kann angenommen werden, dass hier verwitterte Kupfererze beziehungsweise verwitterte Fahlerze geringeren Schwefelgehalts verhüttet wurden.

Danksagung. Unser Dank gilt unserem Kollegen Herrn Dr. Johannes Zbiral (TU Wien) für die RFA Messungen.

Funding. Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Klemm, S.: Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark. Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen zum prähistorischen Kupferbergbau in der Eisenerzer Ramsau. Mitteilungen der Prähistorischen Kommission 50. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien (2003)
- Gröbl, S.: Der Kupferbergbau in der Radmer von den Anfängen bis 1650. Dissertationen der Karl-Franzens-Universität Graz 69, Graz 1968
- Gröbl, S.: Die Bergbautechnik in der Radmer im 17. Jahrhundert. In: Manfreda, A.K.P.S. (Hrsg.) Aus der Geschichte des Erzbergbaues im Zentraleuropäischen Raum Vorträge des 4. Erzberg-Symposiums, Eisenerz, 9.–22. Oktober 1988. Leobner Grüne Hefte, Neue Folge, Bd. 10, S. 109–121. Wien (1992)
- Zum heutigen Schaubergwerk Radmer. <http://www.kupferschaubergwerk.at>. Zugegriffen: 12.06.2023
- Sperl, G.: Zur ehemaligen Kupfergewinnung in der Radmer und im Johnsbachtal. In: Montangeschichte des Erzberggebietes Vorträge der Arbeitstagung, Vordernberg, 17.–19. November 1978. S. 135–145. Montanhistorischer Verein für Österreich, Leoben (1979)
- Klemm, S.: KG Radmer in der Stube, OG Radmer, VB Leoben (Urnenfelderzeit). Fundberichte Aus Österreich 36, 796–797 (1997)
- Roudebush, J.H., Sahasrabudhe, G., Bergman, S.L., Cava, R.J.: Rhombohedral polytypes of the layered honeycomb dddelafossites with optical brilliance in the visible. Inorg. Chem. 54(7), 3203–3210 (2015)
- Stöllner, T.: Between mining and smelting in the Bronze Age—Beneficiation processes in an Alpine copper producing district. In: Turck, R., Stöllner, T., Goldenberg, G. (Hrsg.) Alpine Copper II—Alpenkupfer II—Rame delle Alpi II—Cuivre des Alpes II. New Results and Perspectives on Prehistoric Copper Production. Der Anschnitt Rahden. Beiheft, 42. S. 165–190. (2019)
- Klemm, S.: Der bronzezeitliche Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau, Steiermark (Österreich). In: Historischen Landeskommission für Steiermark (Hrsg.) Forschungen zur geschichtlichen Landeskunde der Steiermark, Bd. 91. Graz (2021). <https://www.hlk.steiermark.at>
- Herdits, H.: private Mitteilung; Burgenländische Landesmuseen in Eisenstadt (2022)
- Haubner, R.: Die prähistorische Kupfermetallurgie – allgemeine Betrachtungen. Berg Huettenmaenn. Monatsh. 166, 343–351 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00501-020-01056-0>
- Tylecote, R.F.: A history of metallurgy. The Metals Society, Mid County Press, London (1976)
- Ertl, F., Strobl, S., Haubner, R.: An ancient bronze ingot smelted from fahlro. Mat. Sci. Forum. 891, 613–617 (2017). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF891.613>
- Haubner, R., Strobl, S.: Considerations on copper smelting from fahlroes and the metallurgy of Cu-as bronzes. Berg Huettenmaenn. Monatsh. (2022). <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01230-6>
- Mödlinger, M., Oro Calderon, R., Haubner, R.: Arsenic loss during metallurgical processing of arsenical bronze. Archaeol. Anthropol. Sci. 11, 133–140 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0534-1>
- Dreyer, G.: Neue Mineralien der Rheinpfalz. Mitt. Pollichia 20, 113–136 (1973)
- Haubner, R., Strobl, S., Klemm, S.: Investigations of a slag from copper smelting discovered at the Bronze Age site Prein VII/Cu in Lower Austria. In: Montero-Ruiz, I., Perea, A. (Hrsg.) Archaeometallurgy in Europe IV. Bibliotheca Praehistorica Hispana, Bd. 33, S. 135–142. Editorial CSIC, Madrid (2017)
- Haubner, R., Strobl, S., Trebsche, P.: Materialogographic investigations of plate slags from the Late Bronze Age copper production site of Priggglitz-Gasteil (Lower Austria). J. Archaeol. Sci. Rep 48, 103838 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103838>
- Haubner, R., Strobl, S.: Slag investigations from Bronze Age copper smelting sites. Mat. Sci. Forum. 891, 608–612 (2017). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF891.608>
- Addis, A., Angelini, I., Nimis, P., Artioli, G.: Late Bronze Age copper smelting slags from Luserna (Trentino, Italy): interpretation of the metallurgical process. Archaeometry 58, 96–114 (2016)

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.