

Frühmittelalterliche Fundstellen im Kanton Jura mit Beziehung zur Eisenverhüttung und -verarbeitung

Autor(en): **Senn, Marianne / Eschenlohr, Ludwig**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahrbuch Archäologie Schweiz = Annuaire d'Archéologie Suisse = Annuario d'Archeologia Svizzera = Annual review of Swiss Archaeology**

Band (Jahr): **96 (2013)**

PDF erstellt am: **27.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-392494>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

MARIANNE SENN UND LUDWIG ESCHENLOHR

FRÜHMITTELALTERLICHE FUNDSTELLEN IM KANTON JURA MIT BEZIEHUNG ZUR EISENVERHÜTTUNG UND -VERARBEITUNG*

Zusatzuntersuchungen zu Boécourt-Les Boulies, Develier-Courtételle,
Chevenez-Lai Coiratte und Courtedoux-Creugenat

Keywords: Eisenschlacken-Morphologie, Eisenschlacken-Typologie, Eisenschlacken-Materialbeschaffenheit, Massenbilanz, Metallografie, Metallanalysen (LA-ICP-MS), Analyse von Schlackeneinschlüssen (REM/EDX)

Zusammenfassung

Der vorliegende Synthese-Artikel stellt den publizierten Daten der vier bedeutendsten frühmittelalterlichen Fundplätze im Kanton Jura, welche Funde und Befunde mit Bezug zur Eisenverhüttung und -verarbeitung geliefert haben, einige neue Erkenntnisse zur Seite. Es handelt sich um einen Verhüttungsplatz (Boécourt-Les Boulies), zwei Gehöfte mit Schmieden (Develier-Courtételle und Courtedoux-Creugenat) sowie einen Werkplatz, an dem Verhüttung und Schmieden bezeugt sind (Chevenez-Lai Coiratte). Die

neuen Ergebnisse beruhen auf zusätzlichen metallographischen und chemischen Untersuchungen an Abfällen und Produkten, sowie einer systematischen Erfassung der Dichte der Schlacken und der Diskussion der damit verbundenen Materialgattungen. Dadurch gelingt es, die wichtigste Eisen- bzw. Stahl-Metallgattung im frühmittelalterlichen Verhüttungsbezirk zu erfassen und typische Schmiedetechniken und Produkte zu bestimmen.

Résumé

Cet article de synthèse complète de quelques faits nouveaux les résultats déjà publiés des quatre sites du haut Moyen-Age les plus importants du canton du Jura ayant livré des objets et des structures en connexion avec la réduction et le travail du fer. Ces sites se répartissent en un site de réduction (Boécourt-Les Boulies), deux hameaux avec forges (Develier-Courtételle et Courtedoux-Creugenat) et un atelier où la réduction et le forgeage sont attestés (Chevenez-Lai Coiratte). Les nouveaux résultats se basent sur

des analyses métallographiques et chimiques supplémentaires de quelques déchets et produits, ainsi que sur le calcul systématique de la densité des scories, grâce auxquelles il est possible d'établir des «familles» de matériaux. Ces recherches permettent d'appréhender les «familles» les plus significatives de fer, d'acier, dans ce district sidérurgique et d'en identifier les techniques spécifiques de forge et les produits.

Riassunto

L'articolo di sintesi presenta alcuni nuovi risultati che vanno a completare i dati già pubblicati di quattro importanti siti altomedievali del Canton Giura, che hanno fornito reperti e ritrovamenti connessi alla riduzione e alla forgiatura del ferro. Si tratta di un sito con tracce della riduzione del ferro (Boécourt-Les Boulies), due poderi con fucine (Develier-Courtételle e Courtedoux-Creugenat) nonché un'area di lavorazione, sulla quale sono attestate la riduzione e la forgiatura (Chevenez-Lai Coiratte). I nuovi risulta-

ti sono basati su analisi metallografiche e chimiche supplementari di qualche scarti e prodotti, come pure su di un rilevamento sistematico delle densità delle scorie e la discussione dei materiali ad esse collegate. In tal modo risulta possibile rilevare il tipo di ferro risp. di acciaio più importante per il distretto siderurgico altomedievale e determinare tecniche di forgiatura tipiche nonché prodotti caratteristici.

Summary

The synthesis presented here adds further insights to those already published with regard to the four most important early medieval sites in Canton Jura, which have yielded finds and features associated with iron smelting and manufacturing. They comprise a smelting site (Boécourt-Les Boulies), two farms with smithies (Develier-Courtételle and Courtedoux-Creugenat) and an activity area with evidence of smelting and forging (Chevenez-Lai Coiratte). The new results were mainly obtained from additional

metallographic and chemical analyses on some products and waste fragments on one hand and on the systematic measuring of the slag density as well as a discussion of the associated material categories on the other. The analyses have allowed us to identify the most important type of iron or steel produced in this early medieval smelting district and to pinpoint characteristic forging techniques and products.

* Publiziert mit Unterstützung des Kantons Jura sowie der Abteilung Analytische Chemie der Eidgenössischen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Empa.

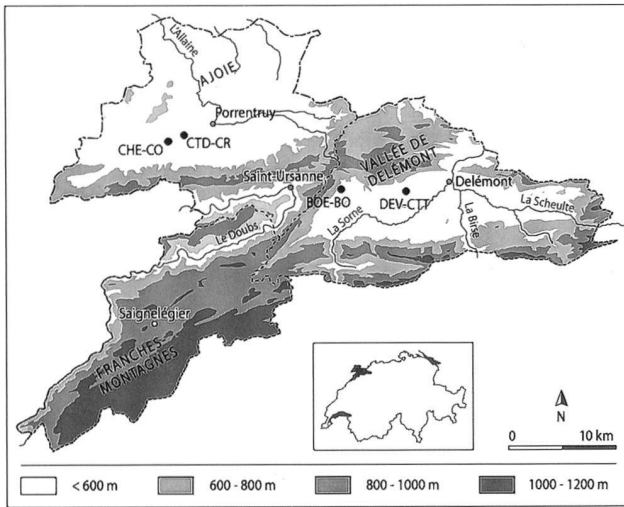


Abb. 1. Lage der vier wichtigsten, frühmittelalterlichen, mit der Eisentechnologie verbundenen Fundstellen. BOE-BO Boécourt, Les Boulies; DEV-CTT Develier-Courtételle; CHE-CO Chevenez-Lai Coiratte; CTD-CR Courtedoux-Creugenat.

1. Einleitung

1.1 Archäologisches Umfeld

Den publizierten Daten der vier bedeutendsten frühmittelalterlichen Fundplätze im Kanton Jura, welche Funde und Befunde mit Bezug zur Eisenverhüttung und -verarbeitung geliefert haben, werden im Folgenden einige neue Erkenntnisse zur Seite gestellt.¹ Es handelt sich um den Verhüttungsplatz Boécourt-Les Boulies (Ausgrabung 1989; Eschenlohr/Serneels 1991), die Gehöfte mit Schmieden Develier-Courtételle (1993-1996; Eschenlohr et al. 2007) und Courtedoux-Creugenat (2000-2002; Deslex 2013) und den Werkplatz Chevenez-Lai Coiratte (2001/2002; Évéquoz et al. 2012)², wo Verhüttung und Schmieden bezeugt sind. Die Fundstellen wurden seit 1989 im Zusammenhang mit dem Autobahnbau der A16-Transjurane ausgegraben (Abb. 1). Die Lage der vier Plätze - zwei befinden sich im Delsberger Becken, zwei in der Ajoie -, ihre analoge Funktion in der Prozesskette der Eisenmetallurgie - ein Verhüttungsplatz, sowie ein oder zwei Verarbeitungsplätze in beiden Gebieten und ihre annähernde Gleichzeitigkeit - erlauben es, Vergleiche auf verschiedenen Ebenen anzustellen (Abb. 2). Im Vordergrund steht dabei das Anliegen, die Qualität des

hergestellten Eisens und der daraus erzeugten Produkte einheitlich und nachvollziehbar zu beschreiben. Genauso wichtig erscheint eine zusammenfassende Darstellung der Schmiedeabfälle, insbesondere der morpho-typologischen und metrischen Daten (Gewicht und Dichte) der Kalottenschlacken. Das Ziel ist ein besseres Verständnis der angewandten Arbeitstechniken und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung.

Die Untersuchung basiert auf Erkenntnissen, welche im Lauf der letzten zwanzig Jahre dank der vollständigen Erfassung und Untersuchung der Produktions- und Verarbeitungsabfälle gewonnen wurden. Der mittelalterliche Eisenverhüttungsbezirk im Jura ist von europaweiter Bedeutung, zumindest was das direkte Verfahren zur Eisenverhüttung sowie die Übergangsphase vom direkten Verfahren zum indirekten betrifft (Eschenlohr 2001).

Die hier neu vorgestellten Aspekte betreffen alle vier Werkplätze. Im Vordergrund stehen die vertiefte Charakterisierung des in Boécourt produzierten Stahls, die schärfere Charakterisierung und Abgrenzung der Metallgruppe Develier-Courtételle mittels der chemischen Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse im Metall, sodann der Vergleich mit dem in Courtedoux und Chevenez verarbeiteten Metall anhand ausgewählter Abfälle und Produkte und schliesslich die für die beiden Produktionsstätten Boécourt und Chevenez in gleicher Weise berechneten Massenbilanzen.

Um die aufgeworfenen Fragen zu beantworten, bedarf es Materialanalysen. Es fanden daher metallographische Untersuchungen an Gegenständen der oben genannten Fundstellen statt (zur Methodik der Analyseverfahren s. Katalog). Hinzu kamen Analysen mittels Laserablation und induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (LA-ICP-MS) des Metalls. Ferner wurden am Rasterelektronenmikroskop mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie (REM/EDX) die Schlackeneinschlüsse im Metall und die das Metall umgebende Schlacke analysiert. Die zahlreichen Untersuchungen an Erzen, Schlacken, Ofen- und Herdwand erlauben es, die Schlacken und Schlackeneinschlüsse in Metall, die dem jurassischen Bezirk zugeordnet werden können, zu charakterisieren und entsprechend den Arbeitsschritten Verhütten, Ausheizen und Schmieden zu klassieren. Eine analoge Interpretation an Schlackeeinschlüssen in importiertem Metall ist hingegen nicht möglich, weil dafür die entsprechenden Daten fehlen und es nicht möglich ist, sie anhand des skizzierten Vorgehens zu erarbeiten.

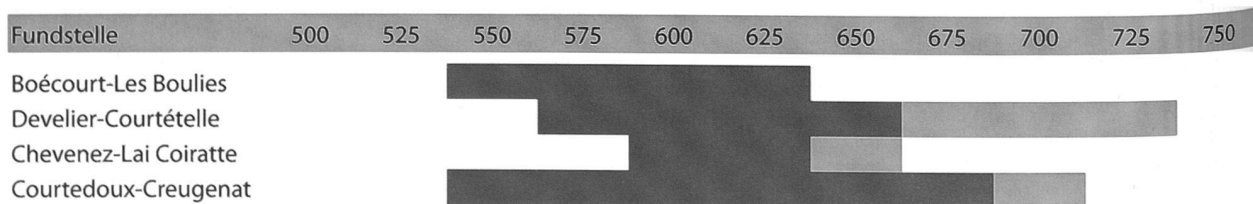


Abb. 2. Datierung der vier Fundstellen. Dunkelgrau: Periode mit metallurgischer Aktivität.

1.2 Einführung in die Metallurgie des Eisens

Um die Resultate der nachfolgenden metallographischen Untersuchungen nachvollziehbar zu machen, bedarf es einer Einführung in die Metallurgie des Eisens; unerlässliche Fachbegriffe und Kürzel, im Text mit einem *Stern am Wortanfang versehen, sind am Schluss des vorliegenden Artikels in einem Glossar erklärt. Die Einführung basiert im Wesentlichen auf dem Diagramm Eisen-Eisenkarbid ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$), das Auskunft gibt über Eisen, Stahl und weisses Gusseisen (Abb. 3, gestrichelte Linien). Als Eisen bezeichnet man in der modernen Metallurgie einen Werkstoff mit einem Kohlenstoffgehalt unter 0,02%. Stahl hat einen Kohlenstoffgehalt zwischen 0,02 und 1,9%, während Gusseisen einen solchen von 2,06 und mehr % hat. Dieses System lässt sich noch weiter unterteilen: Stahl wird gegliedert in einen untereutektoiden ($\text{C} > 0,02 - < 0,8\%$), eutektoiden ($\text{C} 0,8\%$), und übereutektoiden Bereich ($\text{C} > 0,8 - < 2,06\%$), Gusseisen in untereutektisches ($\text{C} 2,06 - < 4,3\%$), eutektisches ($\text{C} 4,3\%$) und übereutektisches ($\text{C} > 4,3\%$). Eisen wird auch als alpha-Eisen oder -Mischkristall bezeichnet und ist im Gefüge als Ferritkorn erkennbar (Abb. 4). Stahl weist neben dem alpha-Eisen oder Ferrit einen wachsenden Anteil an Eisenkarbid (Fe_3C) auf, das im Gefüge in Form von Perlit und Sekundärzementit auftritt (Abb. 4.5). Perlit ist ein eutektoides Gemenge aus Ferrit und Zementit. Das Gusseisen enthält zusätzlich Ledeburit, der ein eutektisches Gemenge aus Austenit und Zementit ist (Abb. 4.5). Austenit bezeichnet den kohlenstoffhaltigen gamma-Bereich von Stahl. Gusseisen mit Ledeburit wird weisses Gusseisen genannt. Parallel zum Kohlenstoffgehalt steigt auch die Härte von Stahl und Gusseisen von *HV 90 für Eisen zu HV 225–275 für eutektoiden Stahl bis HV 400–600 im übereutektoiden Stahl. Sie ist jedoch auch von der Korngrösse abhängig: je feinkörniger ein Metall ist, desto härter ist es. Stahl kann durch Abschrecken glashart werden (HV 600–900), dies vor allem, wenn sein Kohlenstoffgehalt mehr als 0,35% beträgt. Abschrecken ist ein Teil des Härtungsvorganges, bei dem das Metall zuerst erwärmt und dann plötzlich abgekühlt wird, sei es in Wasser oder in Öl. Danach ist der Stahl sehr hart, aber auch spröde, was zum Bruch führen kann. Deshalb wird er anschliessend bei Temperaturen zwischen 200 und 350°C angelassen (erwärmt), damit sich die inneren Spannungen abbauen.

Im frühmittelalterlichen Kontext des jurassischen Verhüttungsbezirks wurden Eisen und Stahl geschmiedet, wobei nur in einem Fall ein Stahl mit mehr als 0,8% Kohlenstoff für ein Objekt verwendet wurde. Als Abfälle in Schmieden und auf Verhüttungsplätzen finden sich jedoch auch übereutektoider Stahl und Gusseisen.

Neben dem Kohlenstoff ist der Phosphor von Bedeutung; er erreicht im jurassischen Metall Gehalte bis 0,8%. Alpha-Eisen kann bis zu 2,5% Phosphor aufnehmen. Ab Gehalten über 0,1% wird der Werkstoff ebenfalls härter (Buchwald 2001, 75). Phosphorreiches Eisen mit einem Gehalt zwischen 0,1 und 0,5% sollte bei Temperaturen unter 950 °C geschmiedet werden, sonst treten *Seigerungen auf. Bei phosphorreicherem Eisen ist das bekannteste solche Phäno-

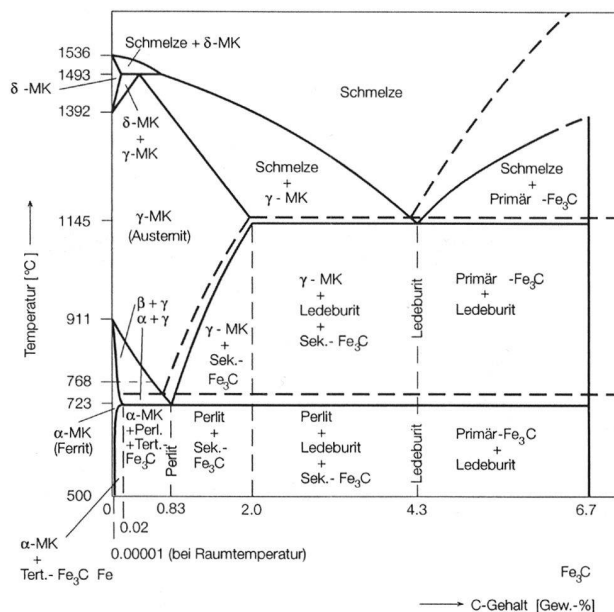


Abb. 3. Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff ($\text{Fe}-\text{C}$, ausgezogene Linie) und Eisen-Eisenkarbid ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$, gestrichelte Linie). MK Mischkristall; Tert. Tertiär; Sek. Sekundär; Fe_3C Zementit.

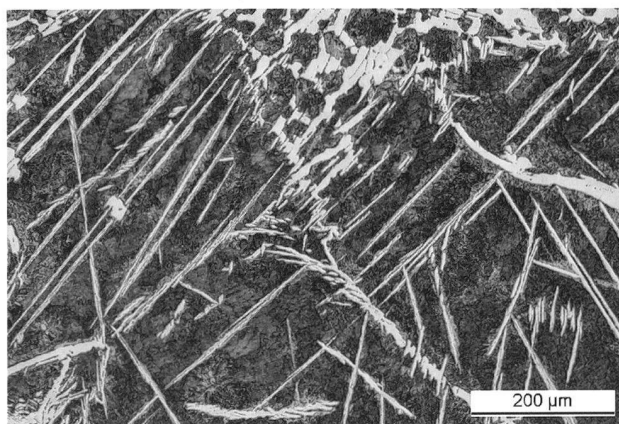
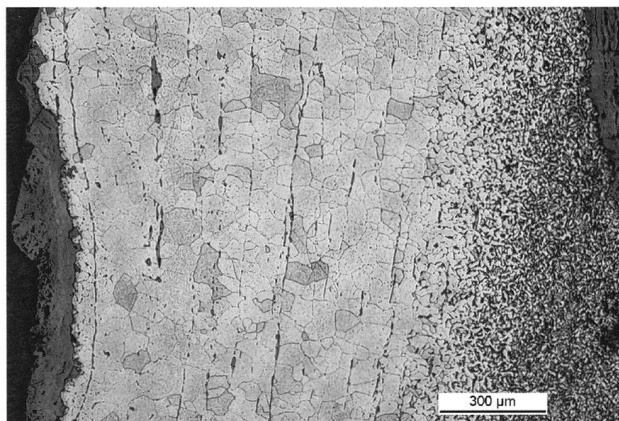


Abb. 4. Oben Messer Kat. 3.11 aus Chevenez. Ferritlagen (weiss) und Ferrit mit Perlit (dunkel); unten Eisenschwamm Kat. 3.5. Perlit (dunkel) mit Sekundärzementit-Nadeln (weiss) und Ledeburit (weiss).

men ein Phantomgefüge im Ferrit, das sich als Reliefunterschied abzeichnet. Es entsteht, wenn phosphorreiches Eisen über 950 °C erhitzt oder schnell abgekühlt wird und der Phosphor keine Zeit mehr hat, sich regelmässig im Gefüge zu verteilen. Bei der Kaltverformung von phosphorreichem Eisen entstehen so genannte Neumannsche Bänder (Abb. 5). Eine weitere, bekannte Erscheinung im Metall ist die Anreicherung von Phosphor entlang von Schweissnähten. In Eisenschwämmen und Abfällen treten ferner Eisenphosphide (Fe_3P , Fe_2P) als eigene Phasen auf, die wie der Zementit sehr hart sind. Phosphor wie auch Nickel, Kupfer, Cobalt und Arsen gelangen durch Reduktion aus dem Erz ins Metall. Als weitere Bestandteile mit beträchtlichen Gehalten kommen Nickel-Gehalte bis 0,5%, Kupfer-Gehalte bis 0,6% und Arsen-Gehalte bis 3% vor. Die meisten der teilweise sehr hohen Gehalte beschränken sich auf Abfälle und fehlen in fertig geschmiedeten Eisenobjekten. Diese Bestandteile können die Materialeigenschaften des Metalls je nach Gehalt ebenfalls verändern, was aber hier keine Rolle spielt, da es vorwiegend Abfälle betrifft. Ihr Gehaltmuster oder *pattern* unterscheidet sich entsprechend dem Ausgangserz und teilweise auch der Herstellung.

2. Der Verhüttungsplatz Boécourt-Les Boulies

2.1 Die bekannten Fakten

Die archäologischen Untersuchungen des Werkplatzes Boécourt-Les Boulies wurden 1989 durchgeführt (Eschenlohr/Serneels 1991). Der ganze Bereich von Boécourt, Montavon und Séprais war im Frühmittelalter reich an Bohnerz (*Siderolithikum), das aus Eisenhydroxyd-Konkretionen (Bohnen) besteht, die ihrerseits in Boluston als rote, lehmige Matrix eingebettet sind. Der Erzkörper ist in der Karst-Oberfläche des Jurakalks (Malm) eingelagert und mit Kies aus dem Pliozän überdeckt. Entlang von Abhängen und Geländeeinschnitten wurde das Erz durch Erosion freigelegt.

Der Verhüttungsplatz im Tälchen Les Boulies³ umfasst zwei Rennöfen, mehrere Erzröstfeuer und eine abgeflachte Schlackenhalde. Die Konstruktion der beiden Öfen weist, mit geringfügigen Unterschieden, die gleichen technischen Merkmale auf. Ihr Betrieb basierte auf künstlicher Luftzufuhr, die aus einem doppelten Gebläse durch eine seitliche und eine frontale Düse erfolgte. Letztere wurde direkt in die Ofentüre eingesetzt. Während der Hauptbetriebsphase des Werkplatzes wurden die beiden Öfen entweder alternierend oder gleichzeitig benutzt. Die C14-Daten sowie die archäomagnetischen Untersuchungen erlauben es, für den Werkplatz eine Datierung zwischen 550 und 650 n. Chr. vorzuschlagen.

Die Fliessschlacken des letzten Verhüttungsvorganges im Rennofen 2 – etwa 60 Einzelstücke – wurden in situ in der Grube vor dem Ofen gefunden. Sie flossen nach und nach während der Verhüttung nach aussen ab. Dabei änderte sich ihr Aussehen je nach Viskosität der Schmelze und dem Ge-

fälle beim Abfliessen: es erfolgte teilweise vertikal, was für eine Schwelle in der Türe spricht. Setzt man die Fliessschlacken wieder zusammen, wird sichtbar, dass an ein und demselben Schlackenfluss verschiedene Oberflächenstrukturen vorhanden sein können.

Die chemischen Analysen ermöglichten es, eine Massenbilanz betreffend aller Materialien aufzustellen, die am Verhüttungsprozess beteiligt waren. Es handelt sich dabei um die Ausgangsstoffe Erz und Ofenwand, sowie die Produkte Eisen und Schlacke:

$$x \text{ Erz} + y \text{ Ofenwand} = \text{Schlacke} + \text{Metall}$$

Mittels der Gleichung lässt sich die Ausbeute an Metall berechnen. Schlüssel zum Umfang sind die Relikte des letzten Verhüttungsvorganges vor Ofen 2. Bei 5500 kg Schlacken auf dem ganzen Platz und einem Ausstoss von etwa 40 kg pro Abfluss, kann die Anzahl der durchgeführten Verhüttungsvorgänge in beiden Rennöfen auf 125–150 veranschlagt werden. Die aus der Gleichung und dem Volumen errechnete Produktion von Eisenschwämmen beläuft sich auf ungefähr 1 t, was nach dem Ausheizen, dem Reinigungsprozess dem Eisenschwämme unterworfen werden, 800–900 kg Eisen entspricht.⁴

Mehrere Kalottenschlacken sind als Baumaterial im Ofen 2 wiederverwendet worden. Kalottenschlacken sammeln sich in einer Herdgrube und sind die typischen Abfälle des *Ausheizens des Eisenschwammes und des Schmiedens von gereinigtem Eisen. Die chemischen Analysen der Kalottenschlacken von Boécourt zeigen, dass sich diese beim Ausheizen von Eisenschwämmen gebildet haben. Zum Ausheizen von Eisenschwämmen gibt es ebenfalls eine Massenbilanz, die so, wie wir sie gebraucht haben, dazu dient, herauszufinden, ob und wie viel Verhüttungsschlacke sich an der Bildung der Kalottenschlacken beteiligt hat:

$$a \text{ Eisenschwamm} + b \text{ Verhüttungsschlacke} + c \text{ Essenauskleidung (Lehm)} + d \text{ Holzkohle} = \text{Kalottenschlacke}$$

Da der Eisenschwamm Reste von Verhüttungsschlacke enthält, findet man abgeschwächte Merkmale der Verhüttungsschlacke in der Kalottenschlacke. Die chemischen Analysen haben gezeigt, dass die Kalottenschlacken von Boécourt solche Eigenschaften aufweisen. Das Ausheizen ist auf dem Werkplatz selbst durch keine Befunde nachgewiesen, muss aber in der Nähe erfolgt sein – es sei denn, man hätte den Arbeitsschritt in der noch heissen Ofenmulde des Rennofens ausgeführt.

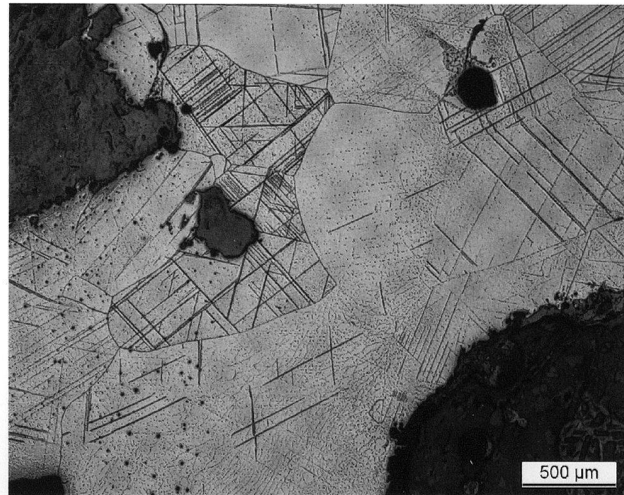
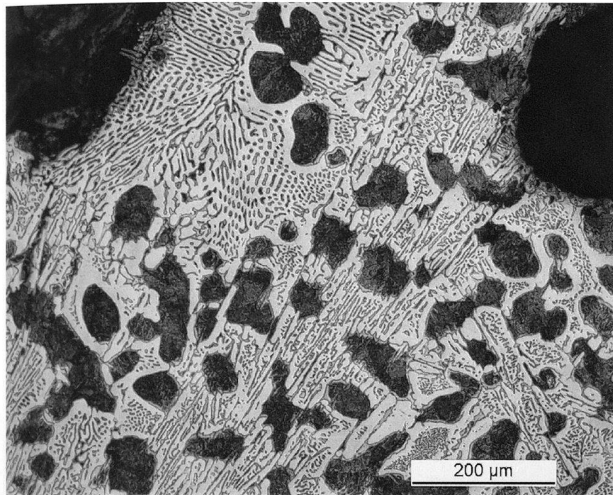


Abb. 5. Links Gusslauf Kat. 3.3 aus Chevenez. Weisses Gusseisen mit Perlit (dunkel) und Ledeburit (weiss); rechts bearbeiteter Eisenschwamm Kat. 3.2 aus Chevenez. Phosphorreiches Eisen (P-Gehalt 0,5%) mit Neumannschen Bändern und Ätzkratern.

2.2 Neue Erkenntnisse

2.2.1 Neues zum hergestellten Metall

Ein wesentliches Ziel der Untersuchung bestand darin, die Eigenschaften des in Boécourt hergestellten Metalls zu ermitteln. Erste Anhaltspunkte ergeben sich aus der Massenbilanz zur Verhüttung (Eschenlohr/Serneels 1991, 104; s. oben). Da die chemische Zusammensetzung von Erz, Ofenwand und Schlacke bekannt ist, kann die Gleichung basierend auf den Mittelwerten der drei Materialien aufgelöst werden. Sie muss dabei für die Hauptelemente Silicium, Aluminium und Eisen aufgehen, die restlichen Elemente werden zur Kontrolle mitgeführt. In Abbildung 6 sind nur die Elemente aus dieser Gleichung aufgeführt, welche im Metall vorhanden sein können. Darunter finden sich die stark siderophilen Elemente Cobalt, Nickel und Kupfer sowie die moderat siderophilen Elemente Phosphor und Arsen (Kronz 2007, 23). Kronz geht davon aus, dass sich die Elemente Chrom und Vanadium im Rennofen wegen der tiefen Prozesstemperatur zwischen 1050 und 1150°C kaum im Metall ablagern. Bereits Serneels hat darauf hingewiesen, dass die beiden genannten Elemente erst bei mittleren Temperaturen ab 1250° bzw. 1400°C ins Metall reduziert werden können (Serneels 1993, 49). Sie sollten sich deshalb im Rennofen in der Schlacke anreichern. Allerdings enthält die Verhüttungsschlacke aus Boécourt im Vergleich zu Erz und Ofenwand zu wenig Vanadium und Chrom. Daraus folgt, dass in der Spalte Metall umgerechnet auf 100% in der Massenbilanz ein phosphorreiches Metall (P 0,3 Massen%) mit erheblichen Vanadium- und Chromgehalten (V 0,3 und Cr 0,2 Massen%) postuliert werden muss (Abb. 6). Es stellt sich also die Frage, welche Gehalte an diesen Elementen das produzierte Metall tatsächlich aufweist. Einen handfesten Hinweis zu Einzelheiten der chemischen Zusammensetzung des Metalls liefert der bereits vorgestellte Eisenschwamm aus Boécourt (Eschenlohr 2001, 118-

Element	Erz + Ofenwand	Schlacke	Metall	umgerechnet auf 100%	Analyse Eschenlohr, 2001	Gruppe Boécourt
Fe	58.43	37.31	21.12	100	Rest	Rest
P	0.17	0.11	0.06	0.284	0.3	0.3-0.5
V	0.1815	0.1119	0.0696	0.330	0.003	0.003-0.012
As	0.0159	0.0015	0.0144	0.068	0.04	0.04-0.08
Pb	0.0132	0.0007	0.0125	0.059	n. b.	n. b.
Zn	0.0179	0.0048	0.0131	0.062	n. b.	n. b.
Cu	0.0061	0.0026	0.0035	0.017	0.03	0.014-0.03
Ni	0.0190	0.0021	0.0169	0.080	0.08	0.03-0.08
Cr	0.0630	0.0293	0.0337	0.160	<0.006	<NWG - 0.004
Co	0.0141	0.0084	0.0057	0.027	0.03	0.01-0.031

Abb. 6. Theoretische chemische Zusammensetzung in Prozenten des Metalls aus Boécourt (s. Spalte umgerechnet auf 100%), berechnet aus der Massenbilanz nach Eschenlohr/Serneels 1991, 104, sodann effektive Zusammensetzung eines Eisenschwamms nach Eschenlohr 2001, 121, sowie Bandbreite der Metallgruppe Boécourt.

122). Es handelt sich um ein grosses Stück Stahl (Gewicht 780 g, C-Gehalt zwischen 0,2 und 0,7 Massen%), das keine Bearbeitungsspuren aufweist, porös ist und viele Schlackeneinschlüsse und Holzkohle enthält. Seine mittlere chemische Zusammensetzung, die auf 20 Analysen basiert, stimmt verblüffend gut mit der oben berechneten überein: bei Phosphor, Nickel und Cobalt ist keine Differenz festzustellen, Arsen ist etwas über- und Kupfer etwas untervertreten. Einzig bei Vanadium und Chrom ist die Abweichung gross: es findet sich hundert Mal weniger Vanadium im Metall als aufgrund der Gleichung theoretisch möglich wäre (Abb. 6). Einen Aspekt des Metalls hat Eschenlohr (2001) ausgespart: die Form, in welcher der Phosphor im Metall gebunden ist. Das Element ist nämlich keineswegs regelmässig im Metall verteilt, sondern bildet im untereutektoiden wie im eutektoiden Stahl Einschlüsse von Eisenphosphiden (Fe_3P) in

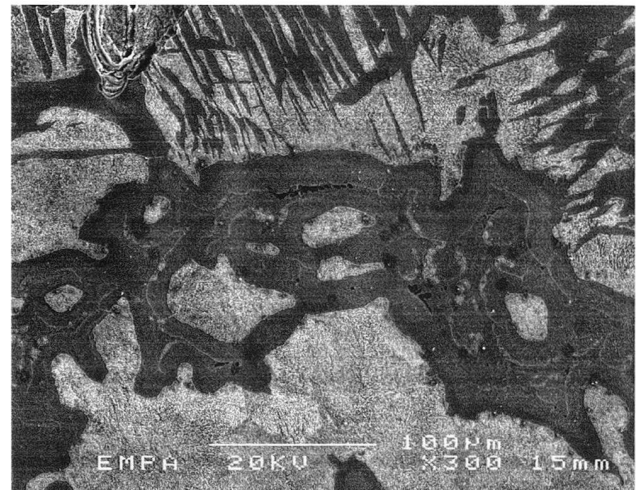
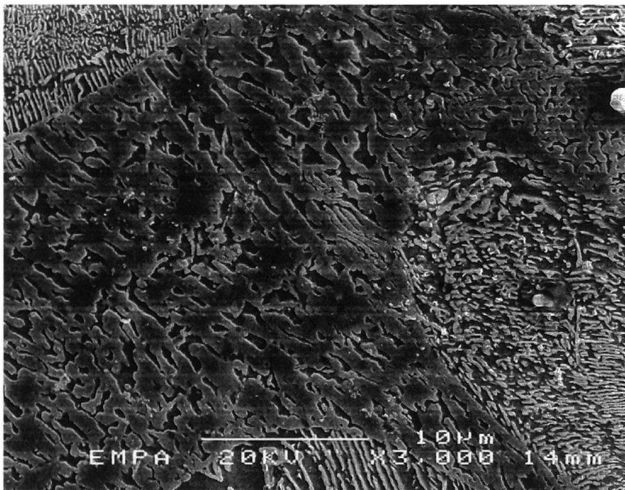


Abb. 7. Eisenphosphide im Eisenschwamm aus Boécourt, Eschenlohr 2001, 119-122 (REM-Aufnahmen, SE-mode). Links Eisenphosphid Fe,P (Bildmitte, P 12-13%) umgeben von lamellarem Perlit; rechts Eisenphosphidkonzentration (dunkel, örtlich P-Gehalt bis 15%) umgeben von Perlit (hell) und nadeligem Ferrit (dunkel).

mg/kg	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As
Median 1, Stahl C 0.2%	40	<	10	4200	300	800	300	470
Median 2, Stahl mit Phosphiden	40	<	10	11000	300	900	300	800
Median 3, Perlit	30	<	10	1000	300	800	200	300
RSD(%) 1	53	12	166	9	7	10	22	8
RSD(%) 2	130	5	54	32	18	23	355	23
RSD(%) 3	28	30	33	58	16	14	64	20
NWG	5	56	2	49	1	5	3	8

Abb. 8. Zusammensetzungsschwankungen im Eisenschwamm aus Boécourt, Eschenlohr 2001, 119-122. RSD relative Standardabweichung.

Netzform (Abb. 7). Nur wenige Bereiche bleiben frei von diesem Phänomen. Eisenphosphidnetze sind viel härter als der Ferrit und Perlit oder nur der Perlit, was zu grossen Härteunterschieden im Metall führt. Bei der Analyse wurden die vorhandenen Unterschiede im Gefüge miteinbezogen (Abb. 8). So beträgt der Phosphorgehalt im kohlenstoffarmen, untereutektoiden Stahl 0,4%, geht dann aber im eutektoiden Stahl auf 0,1% zurück. Werden Stellen in den beiden Stählen gemessen, wo Eisenphosphide vorliegen, steigt der Phosphorgehalt auf über 1%. Dieser Wert ist im Vergleich zum Phosphorgehalt eines Eisenphosphids tief, dies weil die Messfläche des Lasers mindestens 200 µm umfasst und deshalb grösser ist als das Eisenphosphid. Wegen seiner durch die Eisenphosphide verursachten Heterogenität war der untersuchte Eisenschwamm nicht zur Verarbeitung geeignet.

Um das Metall von Boécourt chemisch zuverlässiger definieren zu können, wurden fünf kleine, unförmige Objekte aus der Kategorie der eisenreichen Schlacken metallografischen und chemischen Untersuchungen (LA-ICP-MS, REM/EDX) unterzogen. In der Publikation von Eschenlohr und Serneels (1991, 83f.) tragen sie die Bezeichnung «*scories internes rouillées*». Anhand der Analysen wurden sie als teilweise

reduzierte Stücke mit Anteilen von Erz, Metall und der auf der Fundstelle üblichen *Fayalit- und *Hercynit-Mineralen enthaltenden Schlacke charakterisiert. Es war klar, dass nur in dieser Kategorie von Schlacken das nötige Metall für die Untersuchung zu finden sein würde.

Wie die morphologische Beschreibung zeigt, handelte es sich um Schlacken mit unterschiedlichem Metallanteil (s. Katalog). Zwei Stücke bestehen fast ganz aus Metall, in den anderen drei überwiegt Schlacke. Während Kat. 1.1-3 massives Metall enthalten, durchzieht das Metall in Kat. 1.4 und in einem weiteren, nicht abgebildeten Stück die Schlacke in Form von Fäden und Tropfen. Die rundliche Metallansammlung um die grossen Hohlräume in Kat. 1.4 könnte die Form von grossen Bohnerz-Kugeln reflektieren. Das massive Metall enthält unverformte Hohlräume und Schlackeneinschlüsse, wie es für un bearbeitetes Rohmetall typisch ist (z. B. Kat. 1.2). Die Schlacke weist nur bei Kat. 1.3 das von den Schlacken aus Boécourt bekannte Gefüge aus *Hercynit und *Fayalit in glasiger Matrix auf (Abb. 9). In den anderen Objekten hat die Schlacke einen hohen Glasanteil mit wenigen *Spinellen (*Hercynit) und unbekanntem Leisten sowie kleinsten Metalltropfen.

Die REM/EDX Analysen der glasigen Schlacke geben Aufschluss über deren Besonderheiten (Abb. 10). Die glasreiche Schlacke unterscheidet sich in ihrer chemischen Zusammensetzung grundsätzlich von der bekannten Verhüttungsschlacke aus Boécourt. Sie ist im Vergleich zu jener eisenarm und enthält viel Vanadium (im Mittelwert liegt der Gehalt aber unter der Nachweisgrenze von 0,5 Massen%) und kein Phosphor. Die Mineralphasen entsprechen nicht dem *Fayalit und dem *Hercynit, die aus der Verhüttungsschlacke bekannt sind. In der glasreichen Schlacke existieren zwar durchaus kleine Hercynit-spinelle, die Leisten jedoch bestehen aus reinem Aluminiumoxid oder Aluminium-Siliciumoxid mit einer Zusammensetzung ähnlich dem Mineral *Mullit (Al_xSiO_y), welches schon in ge-

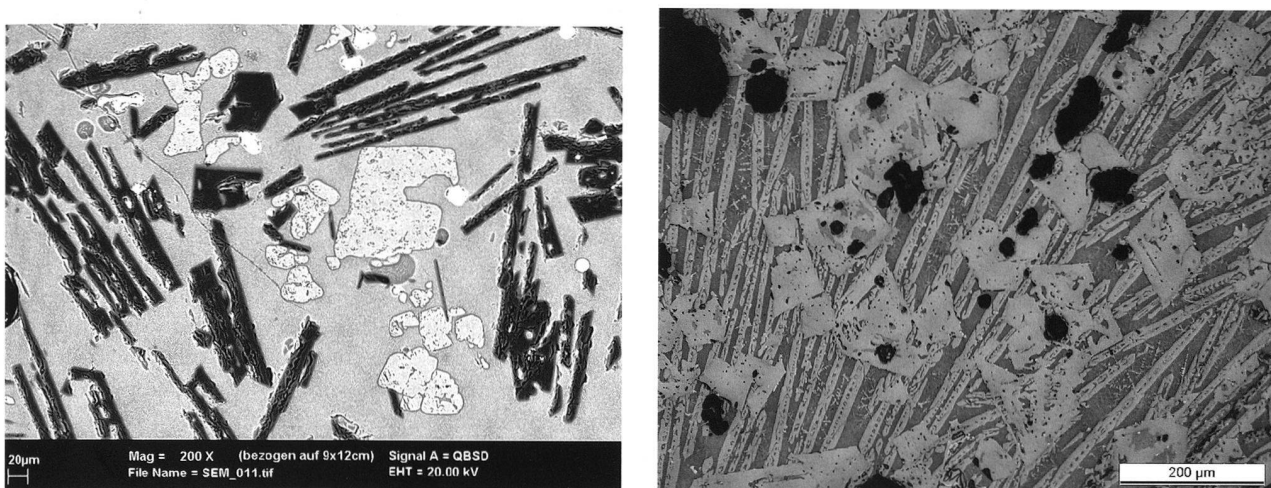


Abb. 9. Links Eisenschwamm Kat. 1.2 aus Boécourt. Die Schlacke hat ein Gefüge mit hohem Glasanteil und wenigen Leisten (dunkelgrau) sowie hellaufscheinenden Spinellen (REM-Aufnahme, BSD-mode; Schwere Elemente (z. B. Eisen) erscheinen hell, leichte (z. B. Aluminium) dunkel.). – Rechts Schlacke Kat. 1.3 aus Boécourt. Zu sehen ist das bekannte Gefüge aus Fayalitleisten und Hercynit-Spinellen in glasiger Matrix.

Massen%	Katalognr.	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
<i>Boécourt-Les Boullies</i>												
Erz		<	16	12	0.3	0	0	1.2	0.08	58	0.8	2
Ofenwand		0.6	10	84	0.07	2.8	0.3	0.4	0.05	4.5	8.4	0.1
Fliessschlacke		0.4	20	25	0.3	0.7	1.8	1	0.2	49	1.3	2.6
Ofenschlacke		0.3	20	27	0.3	0.8	1.8	1.2	0.2	46	1.4	2.3
Eisenschwamm	1.1	1	31	39	<	2.4	5.3	2.1	0.5	17	1.3	2.2
Eisenschwamm	1.2	0.8	40	39	<	3.4	3	2.6	0.6	11	1	1
<i>Develier-Courtételle, Hauptgruppe</i>												
Eisenschwamm	2.1	2.6	18	52	<	8.3	17	0.9	0.7	2.9	2.9	2.1
Eisenschwamm	2.2	3.5	15	47	<	5.6	25	0.8	0.8	4.7	3.1	4.9
Eisenschwamm	2.3	0.7	7.8	23	0.8	1.7	5.2	<	<	60	2.9	3
Eisenschwamm	2.4	0.8	7.7	23	4.2	1.3	4.3	<	<	59	3	3.3
Schmiedeaabfall	2.5	1.3	9.6	31	2.8	2	7.3	0.6	<	48	3.2	3.7
Schmiedeaabfall	2.6	1	4.8	31	4.5	2.6	5.7	<	<	52	6.6	2.1
Schmiedeaabfall	2.7	0.8	4.5	21	0.7	1.5	7.8	<	<	66	4.7	5.3
Fertigobjekt	2.8	1.2	5.4	28	3.8	2	7	<	<	56	5.5	3.4
Fertigobjekt	2.9	0.7	5.4	25	2.8	1.5	5.8	<	<	61	5	3.5
Fertigobjekt	2.10	1.3	5.4	43	1.7	3.2	8.9	<	<	34	8.1	2.8
Fertigobjekt	2.11	1.5	7.6	36	2.5	1.7	13	<	<	37	4.8	7.5
<i>Develier-Courtételle, kupferreiche Untergruppe</i>												
Eisenschwamm	2.12	<	22	23	0.7	0.8	1.4	1	<	54	1.3	1.7
Halbfabrikat	2.13	0.8	13	28	3.7	1.8	4.4	<	<	50	2.4	2.5
Fertigobjekt	2.14	1.1	4.2	34	4.8	1.4	15	<	<	var	8.3	13
Fertigobjekt	2.15	0.8	5.7	31	3.6	2.3	4.4	<	<	51	5.5	1.9

Abb. 10. Chemische Zusammensetzung aller aus Boécourt bekannten Materialien im Vergleich zu den neuen Analysen, durchgeführt an den Objekten Kat. 1.1 und 1.2. Zusammensetzung der Schlacke und Schlackeneinschlüsse der Metallgruppe Develier-Courtételle und der kupferreichen Untergruppe (Kat. 2.1-2.15).

schmolzener Ofenwand beobachtet wurde (Kronz 1997, 109–110). Bei der zweiten Leistensorte, die fast nur Al_2O_3 enthält, muss es sich laut Phasendiagramm $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ um *Korund handeln (Slag atlas 1995, 111). Der tiefste Kreuzungspunkt der Phasen Hercynit-Mullit-Korund im Diagramm liegt bei 1380 °C. Während *Mullit bereits bei tieferen Temperaturen existieren kann, beginnt für *Korund die Bildung erst bei dieser Temperatur. Sie ist also ein Anhaltspunkt für die vorherrschende Temperatur bei der Schlackenbildung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Metall in den neu untersuchten eisenreichen Schlacken demjenigen im grossen Eisenschwamm sehr ähnlich ist (Abb. 7; Katalog). Es handelt sich vorwiegend um untereutektoiden Stahl mit geringem Kohlenstoffgehalt (um 0,2%), der allerdings häufig örtlich aufgekohlt ist. Eisenphosphid-Einschlüsse finden sich in Kat. 1.1 und 1.4.

Als nächster Aspekt interessiert die chemische Zusammensetzung des vorliegenden Metalls. Aus den vier neuen Messungen ergibt sich die Bandbreite der chemischen Zusammensetzung (Abb. 6). Es ist bemerkenswert, dass im Metall in der metallreichen Schlacke Kat. 1.3 mit fayalitisch-hercynitischem Gefüge kein Vanadium vorhanden ist, während Chrom nur in den übereutektoiden Partien des Eisenschwammes Kat. 1.1 auftritt. Daraus lassen sich die unterschiedlichen Reduktionsbedingungen der untersuchten Objekte herleiten: Kat. 1.3 wurde bei tieferen Temperaturen gebildet als Kat. 1.1. Beim Phosphorgehalt wurden Regionen mit vielen Eisenphosphiden und deshalb hohen Phosphorgehalten von der Auswertung ausgeschlossen, da sie in einem für die Weiterverarbeitung geeigneten Eisenschwamm nicht vorkommen sollten. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass derartige Gefüge bis heute nur in Abfällen, jedoch nie in fertigen Objekten beobachtet wurden (Eschenlohr et al. 2007, 249–296). Zinn wurde nicht in allen neu untersuchten Objekten gefunden, weshalb der geringe Gehalt eher als zufällig erscheint. Unter den neu analysierten Elementen sind vor allem Molybdän und Antimon von Interesse, da beide, wie man bei den weiteren Fundstellen sehen wird, im Gehalt je nach Metalltyp stark schwanken können und deshalb mithelfen, verschiedene Herkunftserze zu unterscheiden.

Mit dem Analysenset zu Boécourt steht nun die Grundlage für eine Metallsorte im frühmittelalterlichen Verhüttungsdistrikt zur Verfügung, die eine bekannte Herkunft hat. Wurde diese Metallsorte von den Schmieden in Develier-Courtételle oder Courtedoux-Creugenat verwendet? Haben die Schmelzer dorthin geliefert oder waren sie gar dort zu Hause? Solchen Fragen werden wir in den folgenden Kapiteln nachgehen.

2.2.2 Neues zur Morphologie der Kalotten- und Fließschlacken

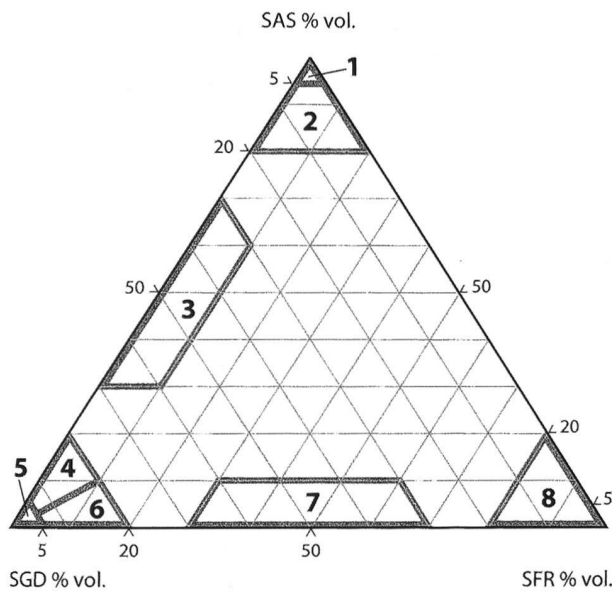
Zum Zeitpunkt ihrer Entdeckung stellten die Kalottenschlacken aus Boécourt eine Neuheit im jurassischen Bergbau dar. Sie können inzwischen mit drei umfangreicheren Fundkomplexen verglichen werden. Der insbesondere für das Material aus Develier-Courtételle verwendete Ansatz betreffend die Materialaufnahme und Typisierung stellt heute einen Referenzpunkt für den Umgang mit Schmiedeabfällen im Frühmittelalter dar: nach dem Waschen der Abfälle wurde direkt im Gelände ein Grobinventar erstellt. In einer ersten Auswahl wurden die markantesten Stücke sowie repräsentative Stichproben aufbewahrt. Dieses Vorgehen reduzierte die zu erfassende Restmenge auf einen Drittel des ursprünglichen Abfallvolumens von ca. 4 t. Die Kalottenindividuen mit einem Erhaltungsgrad von 50% oder mehr sowie Stichproben der anderen Abfallkategorien wurden sodann in einem Feininventar, auf dem die Auswahl für die Analysen basierte, morpho-typologisch aufgenommen.

Die wenigen Stücke aus Boécourt stellen hingegen keine repräsentative Gruppe dar. Ihr Informationsgehalt ist deshalb eher als Hinweis zu werten.⁵ Der Beitrag der an ihnen gewonnenen Daten ist vor allem im Vergleich mit den drei anderen Werkplätzen von Interesse (s. unten).

Für Develier-Courtételle wurde eine Klassifizierung der Kalottenschlacken basierend auf morphologischen und technologischen Merkmalen vorgeschlagen (Eschenlohr et al. 2007; s. Kap. 3). Der Referenz-Fundkomplex besteht aus 1432 Individuen. Die morpho-typologische Einteilung unterscheidet elf Typen. Sie umfasst eine Gruppe von vier kleinen Kalottentypen mit den weiteren Merkmalen: flach, dicht, flüssiger oder verglaster Aspekt der Oberfläche. Eine zweite Gruppe beinhaltet vier grosse Kalottentypen mit den weiteren Unterscheidungsmerkmalen: mit sandig-lehmigem Wulst, mit Holzkohleabdrücken oder mit einer Vertiefung auf der Oberfläche oder kreisförmig – mit sehr ähnlicher Länge und Breite. Einer der sehr grossen Typen unterscheidet sich durch seine grosse Dicke sowie eine stark konvexe Unterseite.

Ein anderer Klassifizierungsansatz für Schmiedeschlacken wurde von Serneels und Perret entwickelt (2003). Er basiert auf der Form der Stücke sowie ihrer Materialbeschaffenheit: graue, dichte Schlacke – (abgekürzt SGD aus dem französischen *scorie grise dense*), sandig-lehmige Schlacke (SAS abgekürzt aus *scorie argilo-sableuse*) und eisenreiche Schlacke (SFR abgekürzt aus *scorie ferreuse rouillée*). Je nach Anteil an den drei Materialtypen unterscheiden die Autoren drei Grundtypen mit je 100% SAS, SGD oder SFR sowie fünf Mischtypen (Abb. 11).

Der geschilderte Ansatz wurde auch auf die jurassischen Kalottenschlacken angewendet; allerdings wurde hier zusätzlich ein repräsentativer Teil der Exemplare entlang der Mittelachse zersägt. In einer Stichprobe von Kalottenschlacken zeigte sich, dass zwischen den äusserlich erfassten Merkmalen und der effektiven, im Schnitt festgestellten Material-Zusammensetzung ein markanter Unterschied be-



	Type	% SAS sandy-clayey material	% SGD grey dense material	% SFR iron-rich rusty material
1	SAS	100		
2	SAS-M	80 to 90	10 to 20	10 to 20
3	SAS-SGD	50	50	
4	SGD-B	10 to 20	80 to 90	
5	SGD		100	
6	SGD-SFR	0 to 10	70 to 90	10 to 20
7	SFR-M		50	50
8	SFR			100

Abb. 11. Klassierung der Kalottenschlacken abhängig vom Anteil und der Art der vorhandenen Materialien. Nach Serneels/Perret 2003.

stehen kann (Eschenlohr, im Druck). Für den Vergleich der Aussagen aus beiden Systemen haben wir versucht, die Kalottenschlacken aus Boécourt (Abb. 12) und – soweit auswertbar – aus den drei anderen jurassischen Werkplätzen nach beiden Systemen zu klassifizieren. Die so gewonnene Erfahrung lehrt, dass es sinnvoll ist, die Kalottenschlacken im Schnitt zu begutachten, weil erst damit eine sichere Zuordnung möglich wird: Das zweifache Einordnen ergibt eine Komplementarität zwischen beiden Ansätzen, was wir im Folgenden aufzuzeigen versuchen.

Bei der ersten Auswertung des Platzes Les Boulies wurden an den Kalottenschlacken keine Dichtemessungen⁶ durchgeführt. Die etwas mehr als zwanzig Einzelstücke wurden nun, bei der erneuten Analyse, zusätzlich in Bezug auf ihre Materialbeschaffenheit und Morphologie eingeordnet. Die publizierten 18 Kalottenschlacken sind gross: Sie wiegen mehr als 1 kg, die meisten zwischen 2 und 2,5 kg (Abb. 12,a); sie belegen die bevorzugte Wiederverwendung grosser Stücke in der Wand des Rennofens. Die gemessene Dichte des auswertbaren Teils der Kalottenschlacken (13 Objekte) liegt fast immer zwischen 2,5 und 3,25, nur in einem Fall über 3,5 (Abb. 12,c) – in Anbetracht der getroffenen Auswahl und der Ausmasse der Kalotten keine Überraschung.

Die 19 auswertbaren Individuen aus dem Gesamtkorpus verteilen sich auf sechs morphologische Typen (Abb. 12,d). Aufgrund ihrer Materialbeschaffenheit fällt mehr als die Hälfte in die Mischform der grauen-dichten und eisenreichen Schlacke (SGD-SFR). Kalotten mit lehmig-sandigem Anteil (SAS) fehlen völlig (Abb. 12,b).

Der Verhüttungsplatz Boécourt lieferte als erste Fundstelle einen letzten Schlackenfluss in situ in der Arbeitsmulde vor dem Rennofen 2 (Eschenlohr/Serneels 1991, 71-78). Vor zwanzig Jahren gab es dazu keine Vergleichsbasis, weder im Jura selber noch anderswo. Erst die Untersuchungen zwischen 1993 und 2000 zum mittelalterlichen Verhüttungsbezirk im Jura haben es ermöglicht, typische Fliessschlacken als Abfall der Verhüttung zu erkennen: es handelt sich um eine grau-dichte Schlacke, die in Strängen abfließt, welche oft aneinander haften. Sie stellt im zentralen Schweizer Jura den vorherrschenden frühmittelalterlichen Schlackentyp dar (Eschenlohr 2001, 105-118).

Dichtemessungen an Fliessschlacken wurden erstmals für den Werkplatz Chevenez-Lai Coiratte durchgeführt (s. Kap. 4; Evéquo et al. 2012). Zum Vergleich wurde die Dichte von 22 Stücken aus dem letzten Schlackenfluss vor Ofen 2 in Boécourt gemessen (Abb. 13).⁷ Zwei Drittel von ihnen (67%) weisen Werte zwischen 1,7 und 2,5 auf, der Rest höhere.

Aus heutiger Sicht widerspiegeln solche einzelnen Flüsse nicht die erwähnten typischen grau-dichten Fliessschlacken. Dies zeigen die Resultate der morpho-typologischen Nachuntersuchung⁸: bis zur Dichte von 2,0 handelt es sich mit zwei Ausnahmen um eindeutig grau-poröse Schlacken. Zwei Stücke sind etwas weniger porös und sind deshalb als Mischform ± SGP zu klassifizieren.⁹ Eindeutige SGD-Stücke sind selten: nur vier Individuen verteilen sich auf eine Dichte zwischen 2,51 und 3,0, während die restlichen Stücke mit zwei Ausnahmen besser als Mischform ± SGD bezeichnet werden. Zwei davon unterscheiden sich von den anderen durch eine rostige, unre-

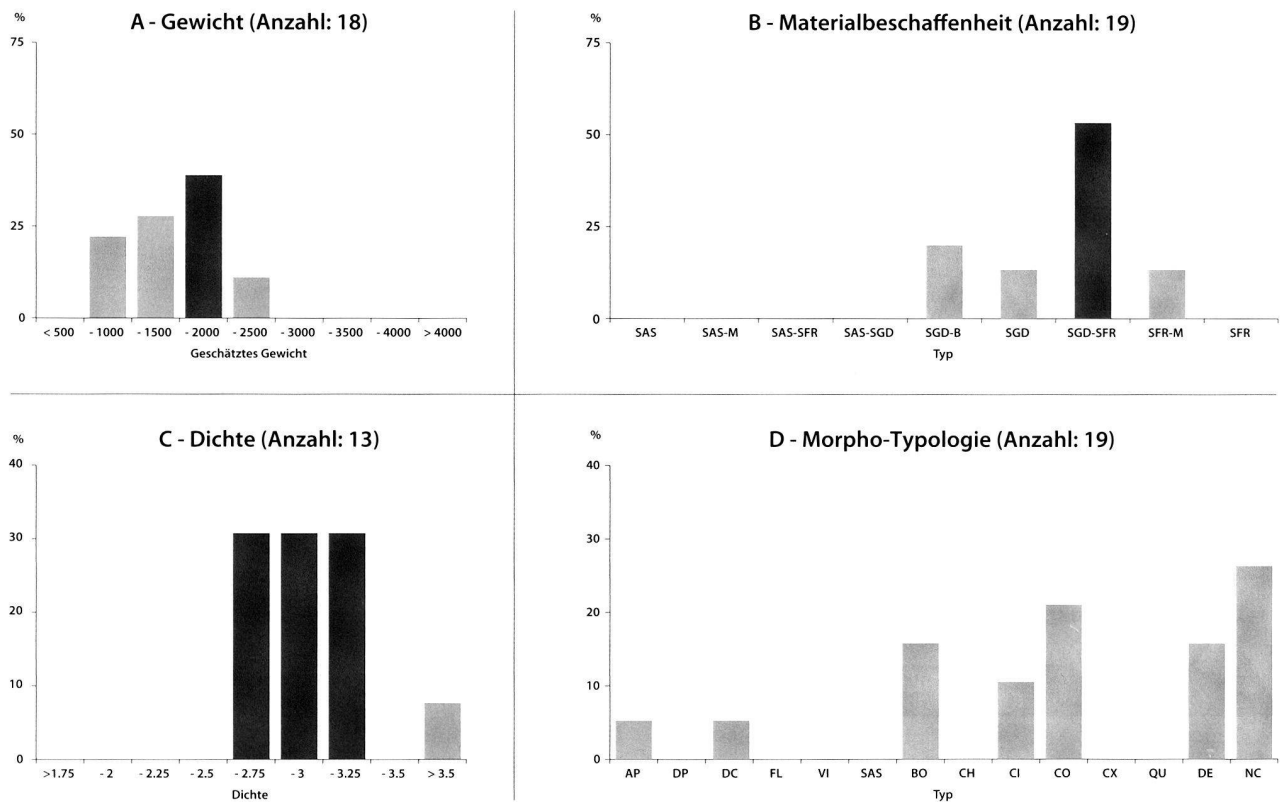


Abb. 12. Morphologische Merkmale der Kalottenschlacken aus Boécourt-Les Boulies. Zur Auswertung standen über 20 Individuen zur Verfügung, die aber nicht einheitlich für die Merkmale a bis d ausgewertet werden konnten.

gelmässige, Oberfläche, respektive eine ziemlich starke Magnetisierung; sie dürften beide eine gewisse Menge Eisen(oxyde) enthalten. Es ist hervorzuheben, dass nur gerade drei Stücke eine Dichte über 3,0 aufweisen.

2.3 Nachtrag zur Ausbeute und Massenbilanz der Rennöfen

Eine Berechnung der Ausbeute erfolgte bereits in der ursprünglichen Untersuchung (Eschenlohr/Serneels 1991, 104f.). Die Berechnung wurde für den vorliegenden Artikel leicht erweitert, damit sie vergleichbar ist mit den Ergebnissen der anderen Produktionsplätze, z.B. Chevenez-Lai Coiratte. Neu daran ist, dass Werte für die Holzkohle zur Verfügung stehen. Es handelt sich aber nicht um Holzkohle oder Asche aus dem jurassischen Verhüttungsrevier, sondern um rezente Holzkohlen-Asche von Buchen aus den Pyrenäen, welche bei Experimenten verwendet wurde (Serneels 2002, 104). Die Resultate sind deshalb nur als Beispiel zu verstehen, denn Holzkohle aus dem Jura hätte nicht genau die gleiche chemische Zusammensetzung.

Unsere neuen Berechnungen weichen nur geringfügig von den früheren ab, es wird jedoch erneut deutlich, dass keine weiteren Zusätze zur Charge notwendig sind, wenn das Erz mit der Ofenwand reagiert (Abb. 14).

2.4 Ergänzungen betreffend die metallurgischen Aktivitäten

Das Verständnis der materiellen Hinterlassenschaft aus den beiden Rennöfen von Boécourt hat sich seit der ersten Auswertung durch die neueren Untersuchungen weiter entwickelt.

In Anbetracht der neuen morphologischen Daten zum letzten Schlackenfluss im Rennofen 2, der höchstwahrscheinlich die Überreste des letzten Verhüttungsvorganges in Les Boulies umfasst, stellt sich die Frage, ob die Relikte repräsentativ sind für die Abfälle im Allgemeinen, die aus einem Rennofen im Jura kommen. Es könnte durchaus sein, dass der Prozessablauf nicht so erfolgte, wie die Eisenhandwerker es beabsichtigten, mit der Folge, dass die Anlage aufgelassen wurde. Vielleicht aber ist die höhere Porosität der Flieβschlacken die Folge einer eigenen Vorgehensweise in den Öfen von Boécourt. Welche Annahme einleuchtender ist, lässt sich nicht mehr entscheiden, denn die Flieβschlacken auf der Halde wurden bei der Erstuntersuchung nicht mittels der heute gängigen Kriterien aufgenommen (Eschenlohr 2012a).

Daneben zeigt die Nachuntersuchung an den *scories internes rouillées* neue Details der Temperaturgeschichte innerhalb des Rennofens. Zumindest lokal wurden Temperaturen bis 1400°C erreicht. Da systematisch zu wenig Vanadium

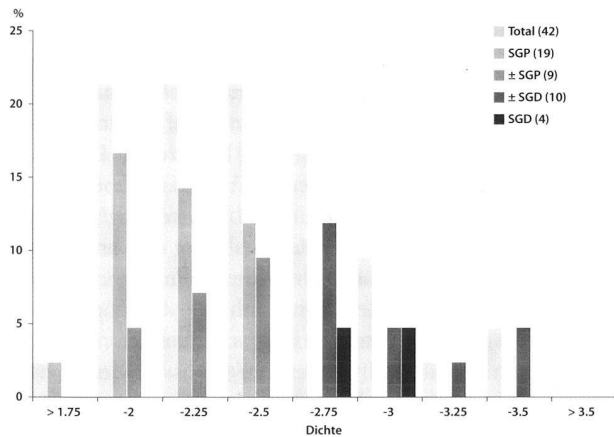


Abb. 13. Klassifizierung der Bruchstücke des letzten Schlackenlaufs aus Boécourt-Les Boulies nach Dichte und morpho-typologischen Kriterien. Prozentzahlen in Bezug auf die 42 vorhandenen Fragmente. SGD scorie grise dense, SGP scorie grise poreuse.

	Erz +	Ofenwand+	Asche	= Total	Schlacke	+ Metall	Ausbeute %
Fe-Gehalt in 100 kg Erz	52	0.49	0.03	52.5	34.5	18	34.3
auf 100 kg Erz	100	14	2.4		93	18	
g Material	108	15	3		100	19	
Variable	a=1.077	b=0.1517	c=0.026				
Si	6.65	5.74	0.10	12.50	12.50		
Al	10.14	0.80	0.04	10.98	10.98		
Fe	55.94	0.53	0.03	56.50	37.26	19.2	34.4
Ti	0.87	0.04	0.00	0.91	0.69		
Mn	0.08	0.01	0.03	0.11	0.14		
Mg	0.00	0.05	0.17	0.22	0.21		
Ca	0.04	0.03	1.12	1.19	1.19		
Na	0.00	0.03	0.01	0.04	0.05		
K	0.02	0.35	0.23	0.60	0.55		
P	0.16	0.00	0.03	0.20	0.12	0.08	
Zr	365	77	2	444	158		
Y	42	3	1	46	19		
Sr	12	8	20	40	53		
Rb	4	28	6	37	182		
Ba	31	77	28	136	507		
V	1773	11	0	1784	71	?	
Sb	6	0	0	6	0		
As	136	5	0	140	31	109	
Pb	123	1	0	124	7		
Zn	142	7	45	194	44		
Cu	42	3	6	50	18	32	
Ni	174	4	1	179	29	150	
Cr	507	12	1	520	81	?	
Co	103	35	0	138	228		
Si/Al	0.7	7.2	2.7	1.1	1.1		

Abb. 14. Massenbilanz aller Materialien aus Boécourt unter zusätzlicher Berücksichtigung der Holzkohle. Si bis P: %; Zr bis Co: mg/kg.

und Chrom in den untersuchten Verhüttungsschlacken vorkommt und die glasige Schlacke in der Umgebung des Eisenschwammes tendenziell mehr Vanadium und Chrom enthält, ist anzunehmen, dass sich die glasige Schlacke systematisch in geringem Ausmass mit dem Eisenschwamm bildete. Im Ofen müssen also zwei Temperaturzonen bestanden haben: eine heissere an der seitlichen Düse, wo sich der Eisenschwamm bildete, und eine kühlere, vorne in der Ofentüre, wo die Schlacke austrat. Das würde zudem bedeuten, dass die aus den Schlacken berechnete Ausbeute als Minimalwert aufzufassen wäre, da sie nur auf der eisenreichen Schlackenzusammensetzung der grau-dicht bzw. porösen Schlacke beruht, die aus dem Ofen heraus geflossen ist.

Im Fall von Boécourt-Les Boulies zeigt sich, warum es von Interesse ist, selbst zwei Jahrzehnte nach der ersten Auswertung, nun mit einem erweiterten Kenntnisstand, die vorhandenen archäologischen Fakten und Materialien erneut zu begutachten. Eine kritische Neu beurteilung durch die Person(en), welche einen Fundplatz ausgegraben, ausgewertet und publiziert haben, stellt dabei einen methodisch interessanten Ansatz dar: Pelet hat auch hier den Weg aufgezeigt, als er 1993 seine Erstauswertung (1973) betreffend die Eisenverhüttung im Waadtland im Lichte der neuesten Erkenntnisse, wie zum Beispiel der Publikation von Boécourt-Les Boulies, überarbeitet hat (Pelet 1973; 1993).

3. Der Weiler von Develier-Courtételle

3.1 Die bekannten Fakten

Der frühmittelalterliche Weiler Develier-Courtételle wurde in den Jahren 1993–1996 auf einer Fläche von 3,5 ha ausgegraben. Die Forschungsergebnisse wurden in fünf Bänden publiziert (CAJ 13–17, zum Metall speziell CAJ 14, Eschenlohr et al. 2007). Der Erhaltungszustand der merovingerzeitlichen Schichten ist weitgehend durch die frühere Aktivität des Baches La Pran bestimmt: stellenweise sind die Schichten ganz erodiert, andernorts setzten sie sich aus umfangreichen aufeinander folgenden Ablagerungen zusammen.

Die Befunde entsprechen sechs Gehöften und vier Arbeitszonen, die durch Gräben und unbebaute Flächen voneinander getrennt waren und an den Ufern des Baches lagen. Jedes Gehöft bestand aus mindestens einem Wohnhaus, das von mehreren Nebengebäuden – vorwiegend kleinen Vierpfostenbauten und Grubenhäusern – umgeben war. Öfen, Feuerstellen, Gruben, Steinsetzungen und Abfallbereiche fanden sich um- und innerhalb der Gebäude. Ausstattung und Belegungsdauer waren von Fall zu Fall sehr unterschiedlich. Zwei der Arbeitsareale – die Zonen 1 und 4 – sind vor allem mit der Eisenverarbeitung in Zusammenhang zu bringen. Die Funktion der zwei Übrigen konnte nicht näher festgelegt werden.

Das Vorhandensein einer bedeutenden Schmiedeaktivität war bereits während der Ausgrabung fassbar, da neben den Abfällen auch fünfzehn Befunde mit Bezug zur Eisenverarbeitung entdeckt wurden. Bei zwölf dieser Feuerstellen handelt es sich um Ausheizherde oder Schmiedeeissen, bei drei weiteren um Schmiedeplätze.

Mit 100 000 Bruchstücken mit einem Gesamtgewicht von mehr als 4 t sind die metallurgischen Abfälle ausserordentlich zahlreich. Sie sind typisch für das Schmieden; Nachweise für Eisenverhüttung hingegen fehlen innerhalb der ausgegrabenen Fläche gänzlich. Bezeichnend ist zudem, dass rund die Hälfte aller Schlackenbruchstücke der Kategorie der kalottenförmigen Schlacken angehört, vom Gewicht her umfasst diese Kategorie sogar 90% der Abfälle. Eine zweite, kleine, aber informationsreiche Kategorie bilden eisenreiche Abfälle bestehend aus Schmiedeabfällen und eisenreichen Schlacken. Der Rest der metallurgischen Relikte besteht aus Hammerschlag, Schlacken mit Fliebsstrukturen, Erz sowie verschlackten Herdwandbruchstücken aus sandigem Lehm. Die detaillierte Untersuchung von 1172 kalottenförmigen Funden stellt den Schwerpunkt in Eschenlohr et al. 2007 dar. Zunächst galt es, die Kalottenschlacken technisch richtig zuzuordnen. Kalottenschlacken entstehen einerseits beim Ausheizen, d. h. dem Reinigen und Kompaktieren des im Verhüttungsvorgang gebildeten Eisenschwammes, und andererseits beim Fertigen eines Eisenobjektes. Um die beiden Arbeitsschritte voneinander zu unterscheiden, waren Untersuchungen zur Chemie, Mineralogie und Metallographie der Kalottenschlacken notwendig. Die Resultate der Metallanalysen der eisenreichen Schlacken und Schmiedeabfälle erlaubten es, eine chemische Referenzgruppe des in Develier-Courtételle verarbeiteten Eisens zu definieren.

Die Klassifizierung von etwa 2200 Gegenständen und Objektbruchstücken aus Metall erfolgte getrennt nach Material: Die Eisenfunde sind zahlreich, die Buntmetallobjekte selten. Die Vielfalt und Qualität dieser Gerätschaften lässt Rückschlüsse auf wirtschaftliche und häusliche Aktivitäten zu. Neben Gebrauchs- und persönlichen Gegenständen sind Waffen und Zaumzeug vorhanden. Die handwerklichen Tätigkeiten spielten in der Ökonomie des Weilers eine bedeutende Rolle: Ein Teil der Werkzeuge wurde zum Schmieden und zum Guss von Kupferlegierungen gebraucht, ein anderer lässt auf Arbeiten mit Holz, Textilien und Leder schliessen. Einige Gegenstände stellen einen Bezug zu Landwirtschaft und Tierzucht her. Trachtbestandteile und Schmuck sowie in geringerem Umfang Waffen und Zaumzeug liefern Anhaltspunkte für die Datierung: Der Siedlungsplatz war im Wesentlichen im 7. Jh. bewohnt. Ausserdem gelang der Nachweis für die Herstellung gewisser Metallobjekte vor Ort, dies einerseits dank den archäologischen Beobachtungen an Schmiedeabfällen und spezifischen Werkzeugen, andererseits anhand der chemischen Untersuchungen, die einen Bezug zwischen dem am Platz verarbeiteten Metall und demjenigen gewisser Metallobjekte herstellen liessen.

Anhand der räumlichen Verteilung der Abfälle waren mehrere metallurgische Werkstätten zu erkennen. Das Verhältnis der Kalottenschlacken untereinander, die einem der drei Schmiedeprozesse, also dem Reinigen oder dem Kompaktieren des Eisenschwammes oder dem Herstellen von fertigen Eisengegenständen, dem eigentlichen Schmieden, zugewiesen werden konnten, erlaubt es manchmal, die Ausrichtung der in einer Werkstatt durchgeführten Arbeiten etwas genauer zu erkennen.

Die ermittelten Daten führten zu einem präziseren Verstehen der metallurgischen Techniken, die in den Schmieden von Develier-Courtételle zwischen 550 und 650 n. Chr. angewendet wurden: Damals stand am Ufer des Baches La Pran eine landwirtschaftliche Niederlassung mit verschiedenen Schmiedeeinrichtungen. Dass und wie im Rahmen einer landwirtschaftlichen und handwerklichen Siedlung Metall verarbeitet wurde, stellt einen der interessantesten Aspekte des Fundplatzes dar. Die Werkstätten sind kleiner und räumlich verstreuter als zur Römerzeit; das Modell der Arbeitsorganisation unterscheidet sich aber klar vom für das Frühmittelalter noch sehr geläufigen Bild der «Wanderschmiede», also dem postulierten Modell einer Versorgung mit verhüttetem Eisen von aussen und der Verarbeitung in der Siedlung. Aufgrund der nun verfügbaren Daten lassen sich vielmehr dauerhafte Werkplätze mit entsprechender Organisation und Bezügen zum jurassischen Verhüttungsbereich erahnen.

3.2 Neues zur Metallgruppe Develier-Courtételle

Aus den Schmieden von Develier-Courtételle wurden wie oben erwähnt zahlreiche Abfälle metallographisch und chemisch untersucht, mit dem Ziel, daraus eine auf dem chemischen Fingerprint basierte Metallgruppe zu eruieren (Abb. 15). Sie ist das Ausgangsmaterial, mit dem die Schmiede arbeiteten (Senn Bischofberger 2005, 52–54, Eschenlohr et al. 2007, 71f.). Das Metall wurde in Form von Eisenschwämmen im jurassischen Verhüttungsbezirk an Plätzen wie Boécourt produziert. Auf der Basis der chemischen Zusammensetzung des verarbeiteten Materials hat Senn anschliessend fertige Eisenobjekte der Gruppe Develier-Courtételle zugeordnet bzw. von ihr ausgeschlossen und so zwischen lokalen und importierten Eisengegenständen unterschieden (Eschenlohr et al. 2007, 83f.).

Bei den Abfällen aus den Schmieden in Develier-Courtételle handelt es sich um kleine Objekte. Sie gehören verschiedenen Fundgattungen an. Sie treten einerseits in Form von unförmigen Fragmenten von Eisenschwämmen mit keinen oder wenig Bearbeitungsspuren auf. Sie sind kenntlich an unverformten oder wenig verformten Hohlräumen und Schlackeneinschlüssen. Ihr Gewicht variiert zwischen 5 und 95 g und liegt nur ausnahmsweise höher (130, 195 g), die meisten Stücke wiegen jedoch 10–30 g. Andererseits handelt es sich um Schmiedeabfälle, bestehend aus fertig ausgeschmiedetem Metall, die auch mehrlagig sein können. Bei ihnen handelt es sich um Halbfabrikate, missratene Stücke und Restmetall mit Schrottsuren. Auch diese Abfallgruppe umfasst kleine Stücke. Der gleichen Gruppe zugerechnet wurden Restmetallabfälle aus Recycling-Metall.

Rund zwei Drittel der metallographisch untersuchten Eisenschwammfragmente sowie ein Grossteil der Schmiedeabfälle und Fertigprodukte wurden auf die chemische Zusammensetzung des Metalls mittels LA-ICP-MS untersucht (Abb. 15). Obwohl davon auszugehen war, dass alle Eisenschwammfragmente Varianten aus der lokalen Produktion sind, hatten nur zwei Drittel eine vergleichbare chemische Zusammensetzung. Unter den Schmiedeabfällen ist der Anteil mit abweichender chemischer Zusammensetzung etwa gleich. Hingegen bestehen alle vier Recycling-Abfälle nicht aus lokalem Metall. Es handelt sich um zwei mehrfach gefaltete Bleche (Eschenlohr et al. 2007, Nr. 89 und 112), sowie zwei weitere Stücke aus *paketgeschweisstem Metall (Senn Bischofberger 2005, Kat. 94 und 95). Alle vier Objekte wurden bereits in einer Publikation vorgestellt, die sich um eine grundsätzliche archäologische und metallografische Definition von recyceltem Eisen bemüht (Schwab/Senn 2008). Bei den Schmiedeabfällen ist es schwieriger zu beurteilen, welche Bedeutung die Stücke mit abweichender Zusammensetzung haben. Einerseits kann es sich dabei um Fragmente von importierten Fertigprodukten handeln, die keine eigentlichen Schmiedeabfälle sind, andererseits ist es auch möglich, dass in kleinem Umfang bisher nicht näher definiertes Metall aus dem Verhüttungsbezirk bearbeitet wurde. Bei den Fertigprodukten sinkt der Anteil lokaler

Objekttyp	Metallographie	LA-ICP-MS	REM-EDX	Lokal	Ausreisser/extern
Eisenschwammfrgt	45	27	7	18	9
Schmiedeabfall	17	14	3	9	5
Abfälle aus recyceltem Eisen	4	4	-	-	4
Fertigprodukte	64	58	8	24	34
Total	130	103	18	51	52

Abb. 15. Übersicht über die mit verschiedenen Methoden untersuchten Abfälle und Fertigprodukte aus Develier-Courtételle sowie die Ergebnisse zur Herkunft des Metalls.

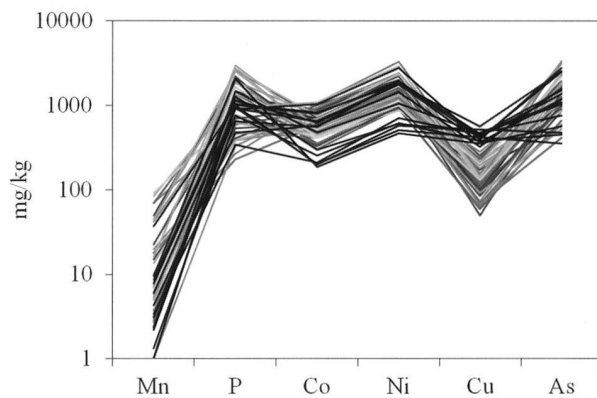


Abb. 16. Zusammensetzung der Metallgruppe Develier-Courtételle sowie der Untergruppe mit erhöhten Kupferwerten. Develier-Courtételle: hellgrau, 47 Analysen bzw. 46 Objekte; Cu-Gruppe: schwarz, 14 Analysen, 13 Objekte.

Element	Gruppe DEV-CTT	Untergruppe Cu-reich	Boécourt
Mn	< NWG–90	< NWG–40	(10)
P	230 – 3000	340 – 2100	3000 – 5000
Co	300 – 1100	190 – 1000	100 – 310
Ni	660 – 3300	460 – 2800	300 – 800
Cu	50 – 280	320 – 560	140 – 300
As	410 – 3300	350 – 2800	400 – 800
Ni/Co	1,9 – 3,2	2,0 – 3,5	1,7 – 2,7

Abb. 17. Schwankungsbreite der Metallgruppe Develier-Courtételle, der kupferreichen Untergruppe und der Gruppe aus Boécourt. NWG: Nachweisgrenze.

Erzeugnisse auf etwas über 40%. Hier ist anzunehmen, dass die Objekte mit abweichender Zusammensetzung als Importe nach Develier-Courtételle gelangten.

Bei der erneuten Durchsicht der LA-ICP-MS-Daten der Gruppe Develier-Courtételle fiel auf, dass Objekte mit erhöhten Kupferwerten von Senn bei der Auswertung nicht immer gleich behandelt worden waren. Bei den Eisenschwämmen führte dies zum Ausschluss der betreffenden Objekte aus der Metallgruppe, während sie in allen anderen Kategorien als lokal angesprochen wurden. Führt man alle Daten mit erhöhten Kupferwerten zusammen, so ergibt sich daraus zwanglos eine bisher nicht definierte Untergruppe zum Metall von Develier-Courtételle (Abb. 16).

In beiden Gruppen sind mit Ausnahme des Kupfergehalts die Anteile an anderen Elementen sehr ähnlich (Abb. 17).

Natürlich interessiert, ob das in Boécourt hergestellte Metall in Develier-Courtételle verarbeitet wurde: Wie die Gegenüberstellung der mittleren Zusammensetzungen zeigt, gibt es keine Übereinstimmung. Die Funde aus Boécourt lassen sich weder in die Gruppe Develier-Courtételle noch in die kupferreiche Untergruppe vollständig einpassen. Der Vergleich zeigt aber auch, dass die Zusammensetzung des Metalls aus Boécourt und jene der kupferreichen Gruppe viel homogener ist als diejenige der Metallgruppe von Develier-Courtételle. Letztere umfasst also möglicherweise Metall aus mehreren Verhüttungsplätzen. Allerdings gibt es aus Develier-Courtételle ein paar wenige Einzelstücke, die ganz oder annähernd der Zusammensetzung des Metalls von Boécourt entsprechen. Es handelt sich um das Messer Kat. 319, den Schmiedeabfall Nr. 81 und das tauschierte Gürtelbeschlag Kat. 238 in Eschenlohr et al. 2007. Messer und Schmiedeabfall entsprechen der Zusammensetzung des Metalls Typ Boécourt vollständig, das Gürtelbeschlag unterscheidet sich durch seinen hohen Arsengehalt (0.3% As).

Die chemische Zusammensetzung der Schlacke um das Metall bzw. der Schlackeneinschlüsse im Metall wurde für den vorliegenden Aufsatz in 18 Fällen erhoben (s. Katalog), in der Hoffnung, dass die Schlacke noch Merkmale ihrer Herkunft aufweist. In einer analogen Untersuchung an Objekten aus dem skandinavischen Raum ist dies bereits gelungen (Buchwald/Wivel 1998). Im jurassischen Verhüttungsbezirk liessen sich im besten Fall die Merkmale der Verhüttungsschlacke aus Bohnerz in den Schlackeneinschlüssen feststellen oder in einer durch die Verarbeitung abgeschwächten Form. Die Merkmale der Verhüttungsschlacke sind: ein hoher Al_2O_3 -Gehalt, der gleichgross oder grösser als der SiO_2 -Gehalt sein kann, und ein leicht erhöhter TiO_2 -Gehalt. Unter den Spurenelementen dominieren Vanadium und Chrom. Ihre Konzentrationen liegen jedoch meist unter der Nachweisgrenze der verwendeten Analyse-methode (REM/EDX).

In den gemittelten Zusammensetzungen der Schlackeneinschlüsse und der am Metall anhaftenden Schlacke sind keine Unterschiede zwischen den Metallgruppen feststellbar (Abb. 10). Die dominierenden Spurenelemente Vanadium und Chrom finden sich wie erwartet in der Pauschalzusammensetzung nicht. Der gesuchte hohe Aluminiumgehalt tritt nur in wenigen Funden auf: in Kat. 2.1, 2.2, 2.12 und 2.13, die auch zu den wenigen Objekten gehören, in denen TiO_2 und MnO nachweisbar sind und das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tief ist (Abb. 10). Bei den jurassischen Verhüttungsschlacken schwankt letzteres zwischen 1 und 3 (Eschenlohr 2001, 106–116). Alle untersuchten Objekte mit diesem Charakteristikum enthalten folglich Verhüttungsschlacke oder sind mit solcher umgeben. Steigt der Wert auf 4, handelt es sich um Ausheizschlacke, in der sandig-lehmige Materialien die Zusammensetzung verändern. Solche Materialien stammen entweder von der geschmolzenen Essenauskleidung oder wurden benutzt, um das Metall im Feuer vor Oxidation zu schützen. Erreicht das Verhältnis 5, bewegt es sich in der Zusammensetzung von Schmiedeschlacken. Letztere bilden sich aus oxidiertem Metall, Asche, geschmolzener Essenauskleidung und vor allem sandig-lehmigen Materialien. In

Develier-Courtételle hat die Essenauskleidung ein Verhältnis von $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ von 6 (Eschenlohr et al. 2007, 55). Bei der Mehrzahl der untersuchten Produkte und Abfälle aus fertig verarbeiteten Metall liegt der Wert bei 5 und darüber; die Stücke haben deshalb eine Schmiedeschlackenzusammensetzung. Liegt er sogar über 6, ist wahrscheinlich vom Gebrauch eines Schweißmittels wie Sand oder einem Sand-Asche-Gemisch auszugehen. Unter Schweißen versteht man das Verbinden zweier Metallstücke bei tropfender Hitze; bei Eisen entspricht dies Weissgluthitze. Dabei kann die Metalloberfläche im heissen Zustand mit Sand bedeckt werden, um sie vor Oxidation zu schützen. Ein direkter Beleg für dieses Verfahren sind zwei Einschlüsse in Messer Kat. 2.8, die nur aus Quarzsand (SiO_2) und oxidiertem Metall (FeO und evtl. P_2O_5) bestehen. Nicht beurteilen lässt sich das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ in den Fertigprodukten Kat. 2.17 und 2.18, da unbekannt ist, aus welchem Erz das Eisen gewonnen wurde. Die Untersuchung zeigt, dass im jurassischen Verhüttungsbezirk im fertig bearbeiteten Metall meist keine Spuren des Ausgangserzes mehr feststellbar sind. Der Eisenschwamm muss also auf dem Weg zum fertigen Objekt viele Arbeitsschritte durchlaufen haben.

Auffällig und ähnlich in ihrer Zusammensetzung sind die beiden Eisenschwämme Kat. 2.1 und 2.2: Sie enthalten mehr MgO , Al_2O_3 , K_2O und CaO als alle anderen Proben und sehr wenig Eisen. Die Schlacke besteht aus Glas. Es könnte sich wie in Boécourt (Kap. 2.2) um eine Hochtemperatur-Variante handeln, die nur im Zusammenhang mit dem Eisenschwamm auftritt. Die erhöhten Vanadium- und Manganengehalte im Metall von Kat. 2.1 würden die Vermutung unterstützen (Abb. Kat. 2.1–18). Verhüttungsschlacke mit erhöhten CaO -Gehalten und einem hohen Verhältnis $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ kennt man aus einigen weiteren Plätzen (Eschenlohr 2001, 196–199). Eine genauere Zuordnung ist ohne Metalluntersuchung an den einzelnen Verhüttungsplätzen jedoch nicht möglich.

Ein Detail zur Fertigung soll nicht unerwähnt bleiben: Das mit einer angeschweissten Stahlschneide versehene Messer Kat. 2.18 ist ein importiertes Objekt. Diese Fertigungsweise scheint in der jurassischen Schmiedetradition nicht angewandt worden zu sein, wie weitere Beispiele aus Chevenez und Courtedoux zeigen. Hier zog man es vor, in Lagen- und Streifendamast-Technik zu arbeiten oder Sandwich-Konstruktionen aus weichem und hartem Stahl herzustellen.

3.3 Ergänzungen zu den morphologischen Merkmalen der Schmiedeschlacken

Der zahlenmässig bedeutendste bis jetzt im Jura untersuchte Kalotten-Fundkomplex liefert als Referenzgruppe im Vergleich mit den drei anderen Plätzen einige interessante, teils neue Erkenntnisse (Abb. 18).

Von über 1400 Kalottenschlacken-Individuen wiegen zwei Drittel unter 1 kg, ein gutes Drittel der Gesamtmenge wiegt maximal bis zu 0,5 kg. Unter den 500 kleineren Kalotten wiegt nur ein Zehntel bis zu 100 g (Abb. 18,a). Trotz seiner grösseren Ausgewogenheit beinhaltet dieses Ensemble deut-

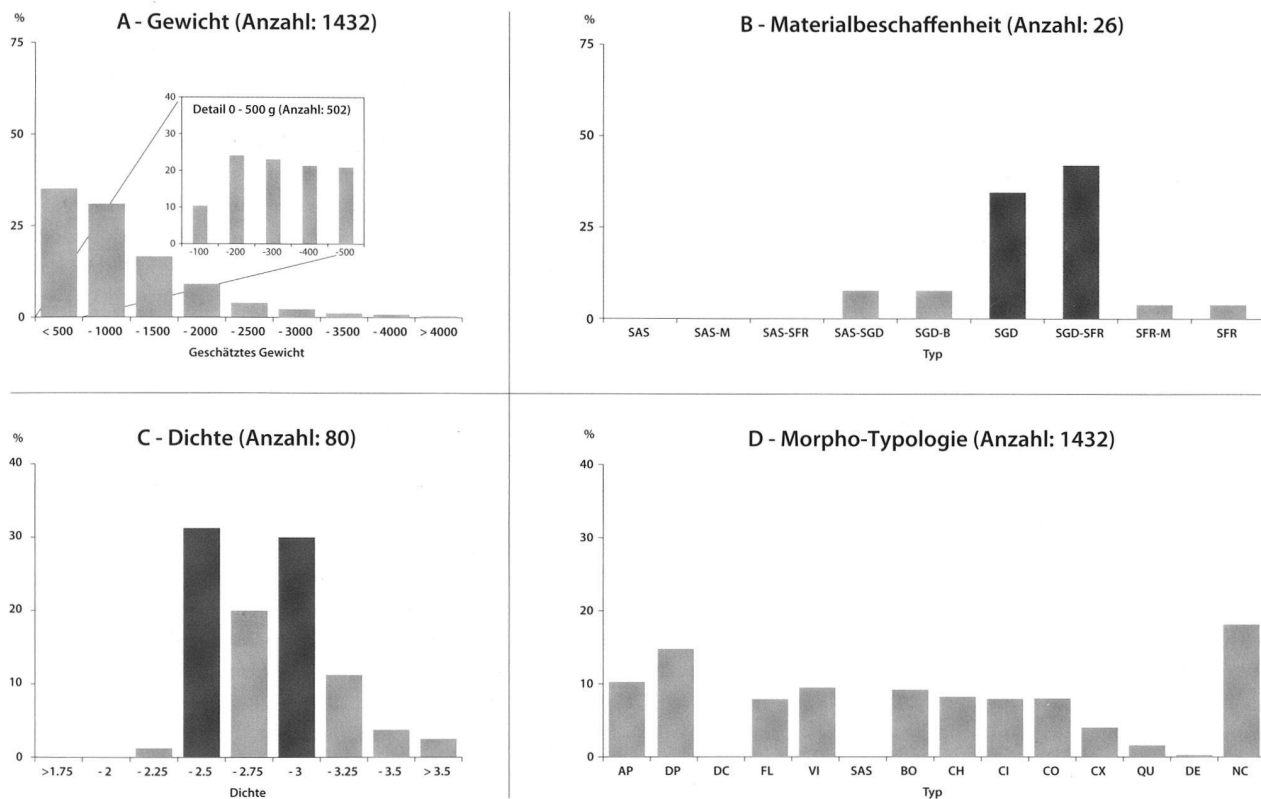


Abb. 18. Morphologische Merkmale der Kalottenschlacken von Develier-Courtételle. Nur wenige Individuen konnten zur Dichte und Materialbeschaffenheit ausgewertet werden.

lich weniger ganz kleine Kalottenschlacken als jene von Chevenez und Courtedoux (Kap. 4.3; 5.3).

Aus praktischen Gründen konnte die Datenbasis nur in beschränktem Mass um die Parameter Materialbeschaffenheit und Dichte erweitert werden. Die folgenden Angaben stützen sich auf die vergleichende Auswertung bereits bestehender Zahlen (Abb. 18,c, Dichte), sowie auf die Klassifizierung der im Katalog der Monographie vorgelegten Kalotten (Abb. 18,b, Materialbeschaffenheit). Acht von zehn Kalotten weisen eine Dichte zwischen 2,25 und 3,0 auf, mit einer starken Abnahme für die Werte zwischen 2,5 und 2,75. Hier dürfte eine durch die geringe Anzahl Proben bedingte Ausgewogenheit eine vielleicht komplexere Situation überdecken.

Auch wenn sich nur einige wenige Kalotten bezüglich Materialbeschaffenheit einordnen liessen, fällt auf, dass die dominierende Gruppe SGD-SFR dicht gefolgt ist von derjenigen der SGD. Daraus resultiert eine einzigartige Situation für die Schmiedeschlacken im jurassischen Bergbaurevier. Die fast völlige Abwesenheit von ausschliesslich sandig-lehmigen (SAS)-Kalotten ist hervorzuheben. Dieser Befund unterstreicht wiederum einen der deutlichsten Unterschiede zwischen einem frühmittelalterlichen jurassischen Schmiedeschlacken-Ensemble und den vorausgehenden römischen und einem Teil der eisenzeitlichen im Jura und in der Schweiz (Serneels/Perret 2003, 477), hat aber Parallelen im hochmittelalterlichen Röserental, Gemeinde Liestal BL.

3.4 Metallurgische Aktivitäten

Es zeigt sich, dass es wegen der starken Umarbeitung des Metalls vom Eisenschwamm zum Fertigprodukt nicht möglich ist, die Metallgruppe Develier-Courtételle und ihre kupferreiche Untergruppe mit Hilfe der Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse durchgehend der jurassischen Verhüttungsschlacke zu zuordnen und so ihre Herkunft und Geschlossenheit abzusichern. Alle Schlackeneinschlüsse in den Fertigprodukten haben eine Zusammensetzung, die nicht mehr mit den jurassischen Verhüttungsschlacken in Verbindung zu bringen ist. Im Gegensatz dazu lassen sich Schmiedeabfälle und Produkte aus der späteisenzeitlichen Schmiede im Oppidum Rheinau (Rheinau ZH-Grabung Postautogarage) zwanglos wahrscheinlich zwei Erztypen zuweisen (Senn et al., in Vorb.).

Als interessantes Detail gilt es fest zu halten, dass es in den Schmiedewerkstätten von Develier-Courtételle durchaus üblich war, beim Schweißen als Antioxidans Sand oder ein Sand-Asche-Gemisch zu benutzen, obwohl sich hier keine Schlacken finden, die nur SAS-Qualität haben wie solche aus den vorausgehenden keltischen und römischen Schmieden. Allerdings gibt es zwei Schlackentypen, die als Endphase eine SAS-Episode kennen: die vorwiegend beim Schmieden entstandenen Kalotten mit Verglasung auf der Oberseite (Typ VI) und die meist beim Ausheizen beginnenden Kalotten mit glasigem Wulst (Typ BO).

4. Der Werkplatz Chevenez-Lai Coiratte

4.1 Die bekannten Fakten

Die Untersuchungen im Gelände vom Fundplatz Chevenez-Lai Coiratte erfolgten von 1998 bis 2002 (Évéquoz et al. 2012). Der Werkplatz weist die Standortspuren eines Rennofens sowie eine Gruppe von Ausheizherden und Schmiedezonen auf. Er dürfte völlig dem Eisengewerbe gewidmet gewesen sein und belegt zum ersten Mal die Erzverhüttung in der Ajoie im Frühmittelalter. Die Entdeckung von Befunden zur Verhüttung und Verarbeitung von Eisen ermöglicht es, die räumliche Organisation des Werkplatzes zu erfassen. Daraus entsteht ein Gesamtbild der Prozesskette des Eisengewerbes, das die in Boécourt-Les Boulies, Develier-Courtételle und Courtedoux-Creugneat gesammelten Informationen ergänzt. Neben den Eisenschlacken wurden vor allem Keramik und einige Eisenobjekte geborgen, ferner wenige Gefässbruchstücke aus Glas und Lavez sowie Werkzeuge aus Stein. Die Untersuchung der Keramik bestätigt die chronologischen und morphologischen Daten von Develier-Courtételle. Der Standort der regionalen Produktionszentren der Keramik bleibt jedoch nach wie vor unbekannt. Die Handelsverbindungen hingegen sind dank Importware leichter nachzuvollziehen. Der Anteil an Ware aus dem Burgund und aus dem Elsass liegt höher als etwa in Develier-Courtételle. Die Glas- und Lavezstücke lassen auf einen gewissen Wohlstand der in Chevenez tätigen Menschen schliessen. Die pflanzlichen Reste belegen den Ackerbau in der Umgebung, die Knochenreste weisen auf eine umfangreiche Viehzucht hin. Dies spricht für eine Agropastoral-Gesellschaft mit autarker Lebensweise deren Wohnsitz sich sehr nahe beim Werkplatz befinden musste.

Es handelt sich um den zurzeit zweitgrössten jurassischen Fundkomplex aus dem Frühmittelalter mit Bezug zur Eisenerzverhüttung und Eisenverarbeitung, obwohl er unvollständig erhalten ist: Der überwiegende Teil der Abfälle wurde seit ihrer Ablagerung wegerodiert.

4.2 Neues zum Metall aus Chevenez

In der Monographie zur Fundstelle (Évéquoz et al. 2012) sind fünf Abfallstücke der Kategorie eisenhaltige Schlacken vorgestellt, bei denen es sich vermutlich durchwegs um Teilstücke von Eisenschwämmen mit mehr oder weniger Bearbeitungsspuren handelt. Für den vorliegenden Aufsatz wurden acht weitere, eckige bis unförmige Eisenstücke ausgewählt, um auch die eigentlichen Schmiedeabfälle aus fertig ausgeschmiedetem Metall zu erfassen. Das Ziel war es, mit ihrer Hilfe eine für den Verhüttungsplatz Chevenez typische Metallsorte zu definieren und möglicherweise daraus hergestellte Produkte zu bestimmen. Deshalb wurden zudem zwei Messer und eine Ahle neu untersucht (s. Katalog). Die meisten untersuchten Abfälle wiegen 10–30 g, einige sind um etliches schwerer (50, 90, 150 und 250 g). Damit bewegen sie sich in derselben Gewichtskategorie wie diejenigen aus Develier-Courtételle (Kap. 3.2).

Das Ziel wurde jedoch nicht erreicht. Die Gruppe der fertig ausgeschmiedeten Schmiedeabfälle hat sich mittels der neuen Untersuchungen nicht wesentlich vergrössert, denn fünf von acht Stücken gehören ebenfalls in die Kategorie der mehr oder weniger bearbeiteten Eisenschwämme: es sind dies die Gusseisenstücke Kat. 3.3 und 3.4, das Fragment eines metallarmen Eisenschwammes Kat. 3.1, das kaltgehämmerte Eisenschwammfragment Kat. 3.2 und der unbearbeitete Eisenschwamm Kat. 3.5.

Kat. 3.1, ein metallarmer Eisenschwamm, besteht aus Schlacke mit grossem Glasanteil, in der sich neben *Mullit feldspatartige Phasen finden – also nahezu wie die Schlacke im Metall von Boécourt (Kap. 2.2). Die Schlacke in Kat. 3.2 hat hingegen ein Gefüge aus *Hercynit in Glas, was in Chevenez typisch für die Verhüttungsschlacken ist.

Die Schlackeneinschlüsse in den Fertigobjekten wurden nicht untersucht. In den Eisenschwämmen und Schmiedeabfällen sind sie nicht grundsätzlich anders zusammengesetzt als die Verhüttungs- und Schmiedeschlacken (Abb. 19). Allerdings ist ihr SiO_2 -Gehalt oft höher, was eine Anreicherung aller anderen Bestandteile ausser FeO , mit entsprechend kleinerem Gehalt, nach sich zieht. Das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ bewegt sich mit Ausnahme des Eisenschwammes Kat. 52 (Évéquoz et al. 2012, 290) im Rahmen der Verhüttungs- und Schmiedeschlacken von Chevenez. In jenem liegt es höher und zeigt die Beteiligung eines sandig-lehmigen Materials an der Schlacke an. Der Gehalt an CaO ist in zwei Fällen massiv höher als in den anderen: In Kat. 52 und Kat. 3.5 beläuft er sich auf 24%. Das Zustandekommen dieser Zusammensetzung ist nicht mehr mit der blossen Beteiligung von Holzkohlenasche am Schlackenbildungsprozess zu erklären. Es stellt sich vielmehr die Frage, ob ein Antioxidans aus sandigem Quarz und Holzkohle beim Schmieden verwendet wurde oder ein kalkhaltiger Sand. Der Schmiedeabfall Kat. 3.8, ein aufgerolltes und in der Mitte schlecht verschlossenes Metallstück, kann anhand seiner Machart dem Recyclieren von Altmittel zugeordnet werden. Mehrere so gefertigte Objekte sind aus Manching bekannt, alle sind aus recyceltem Metall gefertigt (Schwab/Senn 2008). Kat. 3.8 weicht vorwiegend durch sein hohes Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ von den übrigen Funden ab.

Auf der Basis der Metallzusammensetzungen wurden entsprechend den vorherrschenden Elementen Gruppen gebildet (Abb. 20). Zusätzlich zur kupferreichen Gruppe aus Develier-Courtételle wurden so eine P-Gruppe und eine As-Gruppe unterschieden. In ersterer hat Phosphor immer den höchsten Gehalt. Kat 1 und 3 sind darin ein Sonderfall, da alle übrigen Elemente in sehr geringen Gehalten auftreten. Die P-Gruppe umfasst Eisenschwammfragmente, einen Schmiedeabfall und ein Fertigobjekt. Die Eisenschwämme Kat. 3.2 und 55 sowie der Gusslauf Kat. 3.4 haben eine Zusammensetzung, die dem Metall von Boécourt sehr ähnlich ist. Die As-Gruppe hingegen umfasst zwei Eisenschwämme und einen Schmiedeabfall. Sie zeichnet sich durch hohe Arsen- und Nickel-Gehalte aus. Ein weiterer Eisenschwamm gehört in die Gruppe Develier-Courtételle.

Massen%	Katalognr.	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
<i>Chevèze, Lai Coiratte</i>												
Dichte Fließschlacke		0.3	12	23	0.4	0.8	1.6	0.6	0.3	61	1.9	2.2
Poröse Fließschlacke		0.4	13	27	0.6	1	2	0.7	0.5	55	2.2	2
Ofenschlacke		0.4	8	23	0.4	1	1.9	0.5	0.2	63	3	2
Kalotten Typ AP		0.3	3.9	18	0.4	1.1	2.8	0.2	0.1	73	4.6	2.4
Kalotten Typ CI		0.3	5	20	0.6	1.6	3.3	0.3	0.1	68	4	2.2
Kalotten Typ DC		0.3	4.4	17	0.6	0.8	1.9	0.3	0.1	75	4	2.3
Kalotten Typ VI		0.5	6.4	29	0.5	2.3	4.6	0.4	0.1	75	4.6	2.2
Eisenschwamm	3.1	<	21	46	<	1.6	5	1.3	<	var	2.2	3.2
Eisenschwamm	3.2	<	19	43	1	1	1.9	1.6	<	36	2.4	2
Eisenschwamm	3.5	1.4	13	56	<	1.8	24	0.8	<	3.3	4.1	14
Schmiedeaabfall	52, CAJ 27	1.7	11	55	<	3.3	24	0.7	<	10	5.2	7.2
Eisenschwamm	51, CAJ 27	<	5.4	15	2.3	0.7	1.2	<	<	81	2.8	1.7
Eisenschwamm	54, CAJ 27	0.6	7.9	35	0.9	2.6	4.2	<	<	46	4.3	1.5
Eisenschwamm	55, CAJ 27	<	7.9	24	1.1	1.1	3.4	<	<	66	3	3.1
Schmiedeaabfall	3.6	<	5	17	0.8	1	2.2	<	<	73	3.3	2.2
Schmiedeaabfall	3.7	1.1	13	var	<	3.7	11	0.7	<	var	4.1	3.1
Schmiedeaabfall, recycliertes Metall	3.8	0.9	4.5	var	1	2.3	4.7	<	<	var	6.9	2.1
<i>Courtedoux, Creugenat</i>												
Eisenschwamm	13, CAJ 33	0.5	13	31	<	4.3	1.8	0.9	1.4	53	2.3	2.4
Eisenschwamm	15, CAJ 33	0.5	8.1	28	1	8.3	1.5	0.5	0.7	50	3.5	5.6
Eisenschwamm	17, CAJ 33	0.5	17	38	0.7	5.7	2.2	1.2	1.7	47	1.9	2.7
Schmiedeaabfall	19a, CAJ 33	0.7	4.4	39	2.8	1.6	1.5	0.5	<	50	9.1	1.2
Schmiedeaabfall	19b, CAJ 33	1.9	10	41	3.1	20	2.4	0.9	<	19	4	16
Schmiedeaabfall	20, CAJ 33	1.3	9.6	43	1.5	5.6	6.3	<	<	36	4.5	1.4
Schmiedeaabfall	25, CAJ 33	<	6	17	5.1	1.6	<	<	<	76	3.2	-
Schmiedeaabfall	26, CAJ 33	1	12	53	3.5	6.5	4.5	0.8	<	25	4.7	1.5
Schmiedeaabfall	22, CAJ 33	<	4.1	23	1	6.4	1.6	<	0.7	66	5.8	5.9
Fertigobjekt	28, CAJ 33	1.3	6.2	37	1.1	7.9	3.4	<	<	44	6.7	2.5
Fertigobjekt	31, CAJ 33	0.8	6.3	31	3.2	7.6	2	<	<	52	5.1	3.8
Fertigobjekt	33, CAJ 33	<	2.2	17	6.7	0.8	1.1	<	0.7	74	9.5	0.7
Schmiedeaabfall	18, CAJ 33	0.6	3.4	25	3	16	1.3	<	<	52	8.1	13
Schmiedeaabfall	21a, CAJ 33	<	<	66	<	<	<	<	<	36	-	-
Schmiedeaabfall	21b, CAJ 33	1.8	8.1	58	0.4	18	5.5	<	<	9.4	7.2	3.3
Schmiedeaabfall	24, CAJ 33	0.9	3.9	36	2.8	3.9	1.9	<	<	53	9.7	2.1
Fertigobjekt	27, CAJ 33	0.7	6.1	31	3.5	6.9	2.1	<	<	56	5.1	3.4
Messer, Körper	29a, CAJ 33	<	1.7	26	3.1	1.2	0.6	<	<	66	21	2.2
Messer, Körper	29b, CAJ 33	0.6	3.5	29	6	5.5	1.6	<	<	54	8.8	3.3
Fertigobjekt	30, CAJ 33	0.8	2	27	1.2	4.5	1.2	<	0.6	62	9	5.4
Messer, Körper	32a, CAJ 33	0.6	5.5	28	4.4	3	1.8	<	<	61	5.1	1.6
Fertigobjekt	34, CAJ 34	1	5.6	34	2.5	6.9	2	<	<	47	6.3	3.5
Schmiedeaabfall	23, CAJ 23	2.3	5.8	32	1.7	9.8	2	0.6	5.3	40	5.9	4.8
Messer, Klinge	29c, CAJ 33	1.3	8	53	1.6	11	3.5	0.7	5.6	19	6.7	3.3
Messer, Klinge	32b, CAJ 33	1.4	7.6	69	<	6.8	3.6	<	7.7	5.4	9.4	2

Abb. 19. Oben Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse und anhaftenden Schlacke im Vergleich zu den Schlacken aus Chevèze; unten Zusammensetzung der anhaftenden Schlacke und Schlackeneinschlüsse der untersuchten Schmiedeaabfälle und Eisenobjekte aus Courtedoux. Grau Objekte mit teilweise oder generell tiefem Verhältnis SiO₂/Al₂O₃; hellgrau Objekte mit viel MnO. Die Objektnummern beziehen sich auf den Katalog in Deslex 2013.

Objekttyp	Katalognr.	Ni/Co	Cr	V	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W	Zuordnung
<i>Chevez, Lai Coiratte</i>		mg/kg														
Gusslauf	3.3	1.1	<	<	<	400	50	60	30	30	<	<	10	<	<	P-Gruppe
Eisenschwamm	3.1	1.4	<	40	<	1500	30	40	30	<	<	<	<	<	5	P-Gruppe
Eisenschwamm	52, CAJ 27	2.4	<	<	10	700	250	620	130	400	20	<	20	20	5	P-Gruppe
Eisenschwamm	51, CAJ 27	2.3	<	<	<	800	370	830	180	300	30	<	20	5	<	P-Gruppe
Schmiedeabfall	3.6	2.1	<	80	<	1200	120	250	60	240	30	<	<	<	<	P-Gruppe
Eisenschwamm	3.2	1.7	<	<	<	5000	390	700	230	560	40	<	20	30	10	P-Gruppe
Gusslauf	3.4	1.4	<	<	<	8000	530	750	180	780	50	<	5	20	5	P-Gruppe
Eisenschwamm	55, CAJ 27	2.2	<	<	10	3000	420	920	140	300	30	<	20	5	<	P-Gruppe
Messer	3.10	2.2	<	<	10	7000	180	390	50	130	20	<	10	5	10	P-Gruppe
Eisenschwamm	3.5	6.9	<	300	80	6000	360	2460	60	5000	600	<	<	40	<	As-Gruppe
Eisenschwamm	3.5	6.9	<	100	50	1300	340	2400	60	3300	330	<	<	20	<	As-Gruppe
Eisenschwamm	54, CAJ 27	5.1	<	<	<	1000	500	2300	160	2000	180	<	30	10	5	As-Gruppe
Eisenschwamm	54, CAJ 27	5.3	<	<	<	1900	370	2000	170	2500	140	<	40	20	<	As-Gruppe
Schmiedeabfall	3.7	4.3	<	<	<	1000	220	940	160	7000	2900	<	<	20	<	As-Gruppe
Eisenschwamm	53, CAJ 27	2.4	<	<	5	2500	370	910	190	500	40	<	20	5	<	DEV-CTT
Ahle	3.9	2.9	<	<	<	600	300	900	330	700	150	<	20	30	5	Cu-Gruppe
Ahle	3.9	3.1	<	<	<	500	260	800	350	1100	160	<	20	50	5	Cu-Gruppe
Schmiedeabfall recycelt	3.8	1.6	<	<	<	1300	250	390	40	1800	20	<	<	5	<	extern
Schmiedeabfall recycelt	3.8	2.2	<	<	<	210	900	1600	150	3600	40	<	<	10	<	extern
Messer, Stahlschneide	3.11	0.6	<	<	50	<	900	500	40	40	<	<	5	<	<	extern
Messer, Körper	3.11	1.1	<	<	<	400	550	600	70	60	<	<	10	<	<	extern
<i>Courtedoux, Creugenat</i>																
Eisenschwamm	13, CAJ 33	3.3	5	<	5	700	700	2300	30000	1200	n.d.	<	20	n.d.	n.d.	jurassisch
Eisenschwamm	15, CAJ 33	2.1	<	<	5	1500	600	1400	12000	1200	n.d.	10	20	n.d.	n.d.	jurassisch
Eisenschwamm	17, CAJ 33	3.5	5	5	10	900	720	2540	29000	1700	n.d.	10	20	n.d.	n.d.	jurassisch
Eisenschwamm	16, CAJ 33	3.1	10	10	5	1000	640	2020	90	1400	n.d.	5	20	n.d.	n.d.	DEV-CTT
Schmiedeabfall	21, CAJ 33	2.6	<	<	10	900	600	1300	50	800	50	<	30	5	<	DEV-CTT
Schmiedeabfall	26, CAJ 33	2.4	<	<	5	1900	400	1000	200	700	90	<	30	20	10	DEV-CTT
Fertigobjekt	27, CAJ 33	2.7	<	<	<	2000	580	1490	110	1720	110	<	30	20	<	DEV-CTT
Fertigobjekt	31, CAJ 33	2.8	20	<	30	1000	500	1500	90	1800	70	<	<	20	<	DEV-CTT
Schmiedeabfall	25, CAJ 33	2	<	<	<	2000	800	1500	380	1200	120	<	30	40	<	Cu-Gruppe
Schmiedeabfall	20, CAJ 33	4.3	<	<	<	600	200	800	110	600	140	<	30	10	<	jurassisch
Schmiedeabfall	24, CAJ 33	7.5	<	<	<	3000	70	600	150	4000	200	<	20	70	<	As-Gruppe
Schmiedeabfall	19, CAJ 33	7.9	<	<	<	200	100	1000	40	6000	1200	<	30	10	<	As-Gruppe
Schmiedeabfall	18, CAJ 33	4.3	<	<	5	<	940	4050	1000	11000	n.d.	<	n.d.	n.d.	n.d.	As-Gruppe
Fertigobjekt	28, CAJ 33	7.2	<	<	<	<	300	2000	110	1700	140	<	20	20	<	jurassisch
Fertigobjekt	33, CAJ 33	1.5	10	<	20	600	100	200	20	40	<	<	<	<	<	P-Gruppe
Schmiedeabfall	22, CAJ 33	2.1	<	<	10	<	220	460	30	70	10	<	30	<	<	jurassisch
Schmiedeabfall	23a, CAJ 33	2.3	<	<	10	200	70	170	1300	1000	10	10	150	430	<	?
Körper 1	29a, CAJ 33	1.4	20	<	20	1700	400	500	20	70	<	<	<	<	<	extern
Körper 2	29b, CAJ 33	3.1	20	<	20	1300	60	200	30	300	10	<	<	<	<	extern
Fertigobjekt	34, CAJ 33	4.1	10	<	20	800	700	2900	300	1800	200	<	5	50	<	extern
Fertigobjekt	30, CAJ 33	0.7	20	<	30	1100	400	300	30	80	5	<	<	<	<	extern
Körper	32a, CAJ 33	5.6	20	<	30	2000	50	250	40	100	10	<	<	20	<	extern
Eisenschwamm	14, CAJ 33	2.1	<	<	400	100	10	30	20	10	n.d.	<	n.d.	n.d.	n.d.	Mn-Gruppe
Schmiedeabfall	23b, CAJ 33	2.8	<	<	200	300	40	100	90	80	5	<	30	10	<	Mn-Gruppe
Klinge	29c, CAJ 33	0.4	20	<	200	200	800	300	40	100	<	<	5	5	<	Mn-Gruppe
Klinge	32b, CAJ 33	0.6	30	<	500	100	110	70	3800	100	<	<	<	5	10	Mn-Gruppe

Abb. 20. Oben Metallzusammensetzungen der untersuchten Objekte aus Chevez; grau hinterlegt sind Zusammensetzungen wie sie nur in Gusseisen oder aufgekohltem Stahl vorkommen. - Unten Zusammenstellung zu Courtedoux; grau die in Lagendamast-Technik hergestellten Objekte, 32 ist ein komplexer Damast. Develier-Courtételle und die Cu-Gruppe sind die in Develier-Courtételle erarbeiteten Metallgruppen, die As- und P-Gruppe stammen aus Chevez, jurassisch bezeichnet Metall, in dessen Schlackenzusammensetzung das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tief ist.

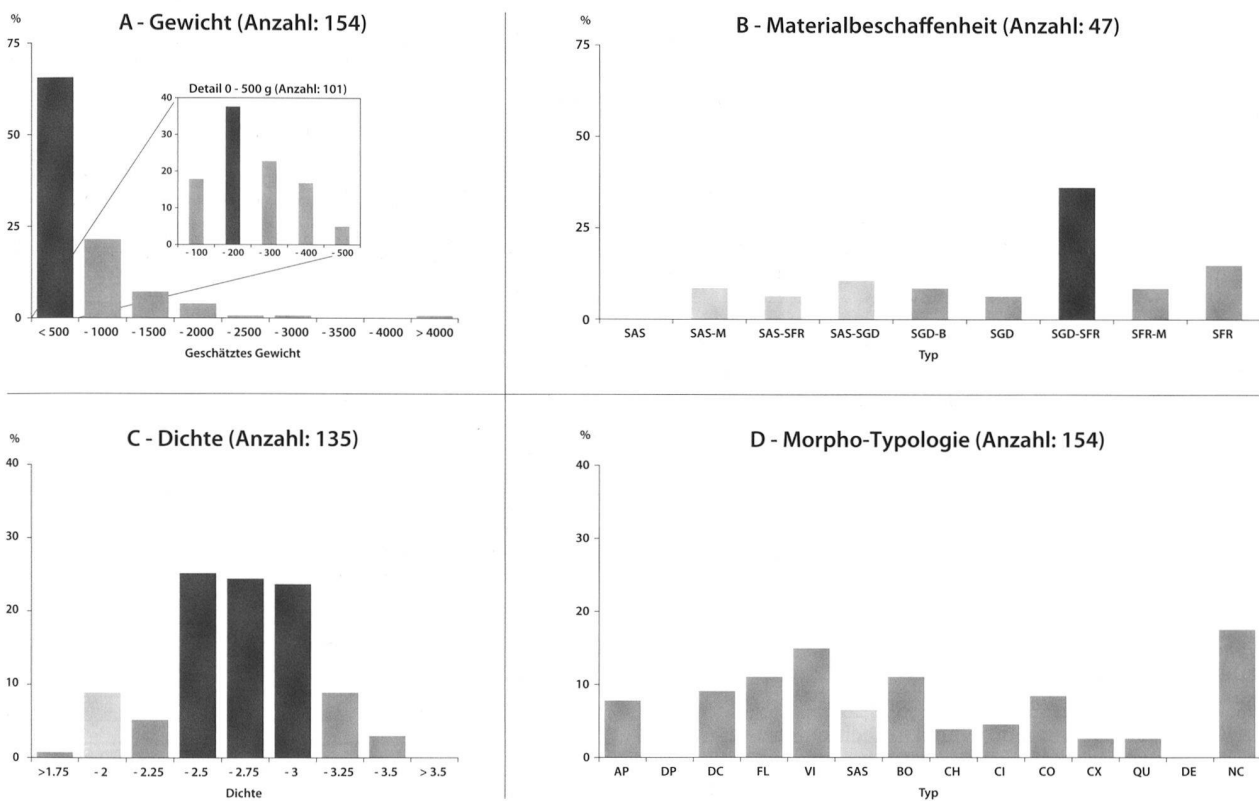


Abb. 21. Die morphologischen Merkmale der Kalottenschlacken aus Chevenez-Lai Coiratte. Es konnten nicht alle Individuen für alle Merkmale ausgewertet werden.

An den chemischen Metallzusammensetzungen lässt sich zudem beobachten, dass die Bildung von Gusseisen und ebenso die sekundäre Aufkohlung des Metalls bei bestimmten Elementen zu Extremgehalten führen, so dass die entsprechenden Objekte aus den erfassten Metallgruppen ausgeschlossen werden müssen.

Für Chevenez ist das phosphorreiche Metall typisch, es umfasst am meisten Objekte. Es lässt sich bei den tieferen Gehalten gut vom Ensemble aus Boécourt abgrenzen, während die hohen Gehalte zu grosser Ähnlichkeit der betreffenden Stücke führen (Abb. 6). Arsenreiches Metall ist möglicherweise ein zweites Produkt, denn die Massenbilanz betreffend die Verhüttung in Chevenez kann auf zwei Arten gelöst werden, was zur Entstehung unterschiedlicher Metallsorten führt (Kap. 4.3).

Das Messer Kat. 3.11 mit angesetzter Stahlschneide (Abb. 20) hat in Develier-Courtételle Kat. 2.18 einen Verwandten, der genau gleich gefertigt ist. Beide Objekte sind aus Metall hergestellt, dass keinen Bezug zum jurassischen hat. Die untersuchte Ahle Kat. 3.9 wurde wahrscheinlich in Develier-Courtételle gefertigt; sie gehört der kupferreichen Untergruppe des Metalls von Develier-Courtételle an, die sonst in Chevenez nicht vertreten ist. In Develier wurde ein Gegenstück geborgen (Kat. 644, CAJ 14), das nach Ausweis der Metallzusammensetzung als lokales Produkt gelten kann.

4.3 Morphologische Ergänzungen zu den Kalotten- und Fliessschlacken

Ursprünglich wurde die Dichte von 48 der 154 Kalottenindividuen sowie von sechs morphologischen Typen gemessen. Inzwischen sind 135 Stücke und alle morphologischen Typen untersucht.¹⁰ Der Schritt erwies sich als sinnvoll aufgrund der überschaubaren Grösse des Fundkomplexes sowie wegen gewisser markanter Unterschiede zum Referenzkomplex von Develier-Courtételle (Abb. 21).

Chevenez-Lai Coiratte ist der einzige untersuchte Platz im Jura mit einer grösseren Anzahl Kalotten, die eine niedrige Dichte aufweisen (Abb. 21,c). Bei vier von zehn Individuen liegt der Wert zwischen 1,5 und 2,5, in Develier-Courtételle hingegen unterschreitet er 2,5 nur mit einem einzigen Stück (Abb. 18,c).

Der Komplex von Lai Coiratte hat den grössten Anteil an kleinen Kalotten aller vier Fundstellen: zwei Drittel wiegen bis zu 500 g, wovon mehr als die Hälfte bis zu 200 g schwer sind und fast 40% zwischen 100 g und 200 g wiegen (Abb. 21,a). Nur auf diesem Werkplatz fand sich bisher eine grössere Anzahl von Individuen mit sandig-lehmigen Material (SAS): ein Viertel der untersuchten Kalotten fällt in eine SAS-Mischkategorie (Abb. 23,b) – eine neue Erkenntnis zur frühmittelalterlichen Eisenverarbeitung im Jura. Die sandig-lehmigen Kalotten haben typischerweise eine geringe Dichte, da sie sehr porös sind und eher klein, mit einem gerin-

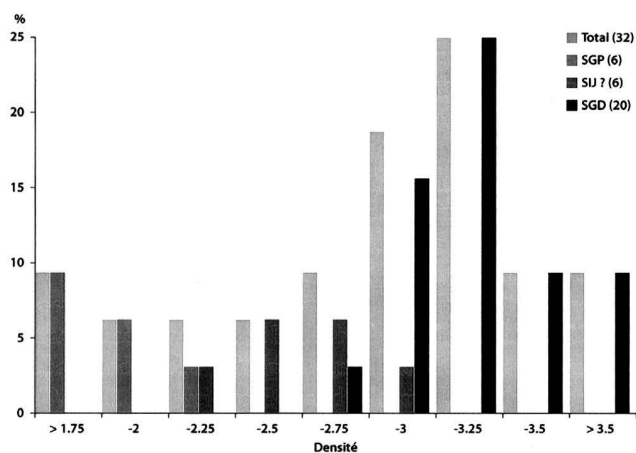


Abb. 22. Verteilung nach Dichte und Morpho-Typologie der Fliesssclacken aus Chevenez-Lai Coiratte. Prozentzahlen in Bezug auf die 32 vorhandenen Fragmente.

gen Gewicht, wenn man sie mit analogen Funden aus anderen Fundstellen vergleicht (Serneels/Perret 2003, 477). Die positiven Resultate der seit dem Projekt Develier-Courtétable regelmässig vorgenommenen Dichtemessung an Kalottenschlacken veranlasste uns übrigens, dieselbe Untersuchung auch an Kupfererzverhüttungssclacken vorzunehmen, mit der Idee, das Vorgehen danach auf die Eisenerzverhüttungssclacken auszudehnen (Eschenlohr 2012b).

Zum Abschluss einige grundlegenden Bemerkungen zur Unterscheidung von Verhüttungssclacken, die auch auf die Schlacken von Chevenez angewandt wurden: Die Klassifizierung von Verhüttungssclacken basiert auf den Grundlagen, die V.Serneels als Folge der Untersuchung von Boécourt-Les Boulies für das Eisengewerbe in der Westschweiz vorlegte (Serneels 1993). Es lassen sich im Verhüttungsprozess als erste Kategorie Schlacken, die sich im Ofeninnern bilden und ablagern, von solchen unterscheiden, die aus dem Ofen heraus fließen: Die ersten nennt man Ofenschlacken, die zweiten Fliesssclacken. Zusätzlich werden der Grad der Porosität, die Farbe sowie der Anteil an Eisen(oxyden) zur Unterscheidung beigezogen. Es erfolgt also eine morphotypologische Klassierung, die durch chemische Analysen ergänzt wird.

Auf mittelalterlichen Verhüttungsplätzen, die Öfen im direkten Verfahren aufweisen, lassen sich grau-dichte Schlacken (SGD – *scorie grise dense*), eisenhaltige Schlacken (SRF – *scorie rouillée ferreuse* oder *scorie riche en fer*), schwarz-glasige Schlacken (SVN – *scorie vitreuse noir*), gelb-intermediäre Schlacken (SIJ – *scorie intermédiaire jaune*) und schliesslich grau-poröse Schlacken (SGP – *scorie grise poreuse*) unterscheiden. Im Laufe der Arbeiten zur Verhüttung im Bezirk des zentralen Schweizer Juras gelang der Nachweis, dass die grau-dichten Schlacken den dominierenden und recht homogenen Typ der Fliesssclacken auf frühmittelalterlichen Werkplätzen darstellen (Eschenlohr 2001). Die Auswertung der Fundstelle von Lai Coiratte bestätigt dieses Resultat. Die eisenhaltigen Schlacken stellen eine Interpretationsbasis dar, die mehrere Deutungen zulässt. Sie

	Erz+	Ofenwand +	Asche =	Total	Schlacke +	Metall	Ausbeute %
Fe-Gehalt in 100 kg Erz	58	1	0.02		33	27	46
auf 100 kg Erz	100	20	2		83	27	
g Material	121	24	2		100	33	
Variable	a=1.208	b=0.2439	c=0.0212				
Si	4.2	7.8	0.08	12.07	12.07		
Al	4.6	1.9	0.03	6.54	6.54		
Fe	70.7	1.7	0.02	72.50	39.93	33	46
Ti	0.25	0.14	0.001	0.38	0.38		
Mn	0.13	0.03	0.02	0.19	0.30		
Mg	0.03	0.20	0.14	0.37	0.21		
Ca	0.16	0.16	0.91	1.23	1.23		
Na	<	0.10	0.01	0.11	<		
K	0.02	0.47	0.19	0.68	0.72		
P	0.35	0.04	0.03	0.42	0.22	0.2	
Zr	121	137	2	260	278		
Y	97	15	1	113	134		
Sr	<	24	16	40	56		
Rb	<	44	5	49	<		
Ba	<	103	23	126	300		
V	808	39	0.4	847	879		
As	170	<	<	170	<	0.02	
Zn	242	<	37	279	66		
Cu	<	<	5	5	<		
Ni	162	18	0.5	180	<	0.02	
Cr	202	24	0.7	227	245		
Mo	107	<	<	107	80	0.003	
Si/Al	0.9	4.0	2.7	1.8	1.8		

Abb. 23. Massenbilanz 1 aller Materialien aus Chevenez, basierend auf den Mittelwert aller Verhüttungssclacken und dem Bohnerz. Si bis P: %; Zr bis Mo: mg/kg.

finden sich in verschiedenen Formen, je nach angewandtem Verhüttungsverfahren: es kann sich um Ofenschlacke handeln, die sich in der Nähe des Eisenschwammes im Ofen bildet, um eisenhaltige Fliesssclacke oder, wie am spätmittelalterlichen Werkplatz Lajoux JU-Envers des Combes nachgewiesen, um eigentliche Ausheizschlacken (Eschenlohr 2012a). Im Jura dürfte der schwarz-glasige Fliesssclackentyp vor allem in Verbindung mit spätmittelalterlichen Verhüttungsplätzen stehen. Der intermediäre, gelbe Typ findet sich sowohl auf früh- wie auch in spätmittelalterlichen Anlagen. Bei der ersten Untersuchung der Fliesssclacken von Chevenez-Lai Coiratte wurden der grau-dichte und der grau-poröse Typ unterschieden.

Erstmals wurde für den vorliegenden Artikel die Dichte an einer kohärenten Stichprobe von grauen, dichten (SGD), sowie grauen, porösen (SGP) Fliesssclacken gemessen. Die einfache Fragestellung war: Ist der makroskopisch festgestellte morphologische Unterschied messbar?¹¹ Die nochmalige Sichtung der Fliesssclacken für diese Messungen brachte vermutlich auch den gelb-intermediären Typ zum Vorschein; für den sicheren Nachweis aber wären chemische Analysen nötig.

Das Ergebnis der Dichtemessungen spricht für sich (Abb. 22): Die Werte der grau-porösen Schlacken schwanken zwischen 1,6 und 2,2, die der grau-dichten Schlacken zwischen 2,7 und 3,8. Da sie bei der Mehrheit der porösen Schlacken unter 2,0 liegen und bei den dichten um 3,0 oder darüber,

	Erz 1+	Erz 2+	Ofenwand +	Asche =	Total	Schlacke +	Metall	Ausbeute %
Fe-Gehalt in 100 kg Erz	27	35	0.4	0.0		15	48	77
auf 100 kg Erz	47	53	5	3		36	48	
g Material	128	147	14	9		100	131	
Variable	a=1.275	b=1.465	b=0.137	c=0.009				
Si	4.5	3.2	4.4	0.04	12.1	12.1		
Al	4.8	0.6	1.1	0.01	6.5	6.5		
Fe	75	96	1.0	0.01	171.3	39.9	131	77
Ti	0.26	0.03	0.08	0.001	0.37	0.38		
Mn	0.14	0.07	0.02	0.01	0.24	0.30		
Mg	0.03	0.09	0.11	0.06	0.30	0.21		
Ca	0.17	0.27	0.09	0.39	0.92	1.23		
Na	<	<	0.06	0.003	0.06	<		
K	0.02	0.08	0.26	0.08	0.45	0.72		
P	0.37	0.22	0.02	0.01	0.63	0.22	0.41	
Zr	128	<	77	1	206	278		
Y	140	<	8	0	149	134		
Sr	<	<	13	7	20	56		
Rb	<	<	25	2	27	<		
Ba	<	<	58	10	68	300		
V	852	443	22	0	1318	879		
As	179	1108	<	<	1287	<	1300	
Zn	256	517	<	16	788	66		
Cu	<	<	<	2	2	<		
Ni	171	2882	10	0	3063	<	3000	
Cr	213	44	14	0	271	245		
Mo	113	296	<	<	408	80	330	
Si/Al	0.9	5.4	4.0	2.7	1.8	1.8		

Abb. 24. Massenbilanz 2 aller Materialien aus Chevenez, basierend auf den Mittelwert aller Verhüttungsschlacken und dem Bohnerz (Erz1) sowie dem zweiten lokalen Erz (Erz 2). Si bis P: %; Zr bis Mo: mg/kg.

lassen sich die zwei Gruppen eindeutig voneinander trennen. Die Situation ist jedoch etwas komplexer, wenn die Schlacken vom gelb-intermediären Typ miteinbezogen werden: Deren Dichte bildet den Übergang von den grauen porösen zu den grauen dichten Schlacken. Es gilt jedoch im Auge zu behalten, dass die grau-dichten Schlacken die weitest häufigsten sind.

Zum Vergleich wurde die Dichte an einigen Stücken des letzten Schlackenflusses aus Rennofen 2 in Boécourt ebenfalls gemessen (Abb. 13). Was Neues zu den Fließschlacken resultiert daraus? Darum geht es in den abschliessenden Überlegungen in Kapitel 6.

4.4 Ausbeute und Massenbilanz des Rennofens

Die vorgestellte Massenbilanz bezieht zum ersten Mal rezente Holzkohlenasche mit ein, die vor allem sonst fehlendes Calcium ins System einbringt (Abb. 23). Die Resultate erstaunen: Während der Verhüttung von 100 kg Erz wurden 20 kg Ofenwand heruntergeschmolzen, also 6 kg (30%) mehr als anhand der Massenbilanz von Boécourt errechnet (Abb. 14). Nimmt man an, dass pro Ofengang vergleichbar viel Schlacke wie in Boécourt anfiel, also rund 40 kg, so schmilzt jedes Mal auch 8 kg Wand weg und nimmt an der Schlackenbildung teil.

Die Massenbilanz ist jedoch auch im Gleichgewicht, wenn

man das zweite Erz miteinbezieht, das auf der Fundstelle ausgegraben wurde (Abb. 24). Seine geologisch korrekte Bezeichnung bleibt unbekannt, es unterscheidet sich jedoch chemisch stark vom Bohnerz. Wenn ein Gemisch beider vorgefundenen Erze verhüttet wird, ist die Ausbeute extrem hoch und die Reaktion mit der Ofenwand geht stark zurück, auch bildet sich viel weniger Schlacke. Es muss aber betont werden, dass unzählige Mischungsverhältnisse möglich sind, bei welchen die Massenbilanz ausgeglichen ist. Entscheidend ist, woher das unerlässliche Silicium stammt. Als Lieferant kommt sowohl Erz 2 als auch die siliciumreiche Ofenwand in Frage. Die präsentierte Massenbilanz wurde so ausgeglichen, dass möglichst viel Silicium aus Erz 2 stammt.

Die festgestellten Metallgruppen sprechen dafür, dass beide Verhüttungsarten angewandt wurden, nämlich die, bei der nur Bohnerz verhüttet wird, und die, bei der ein Gemisch aus Bohnerz und dem zweiten Eisenerz verhüttet wird: Phosphorreiches lokales Metall ist ebenso nachgewiesen wie arsenreiches (Abb. 20). Es scheint jedoch eher unwahrscheinlich, dass je eine so hohe Ausbeute erreicht wurde wie sie aus der zweiten Massenbilanz mit dem Erzgemisch abgeleitet werden kann (Abb. 24).

5. Der Weiler Courtedoux-Creugenat

5.1 Die bekannten Fakten

Die Untersuchungen zum Weiler Courtedoux-Creugenat werden erst im Laufe des Jahres 2013 publiziert (Deslex 2013). Wir geben daher hier nur einen Überblick betreffend die wichtigsten Resultate mit Bezug zur Eisenmetallurgie.

Die Metallanalysen an vor allem eisenhaltigen Schlacken und Eisenabfällen zeigen, dass im Weiler von Courtedoux mehrere Metallsorten in einer oder mehreren Schmiedewerkstätten verarbeitet wurden (Kap. 5.2). Eine der nachgewiesenen Metallgruppen weist die gleichen Merkmale auf wie diejenige von Develier-Courtételle. Die Verwendung einer anderen, kupfer- und antimonreicheren Metallsorte ist beim jetzigen Kenntnissstand noch nicht belegt.

Im ausgegrabenen Areal fanden sich Spuren, die vom Reinigen der Eisenschwämme und von der Herstellung von Metallobjekten herrühren. Welche metallurgischen Tätigkeiten darüber hinaus durchgeführt wurden, bleibt unklar. Mehrere Faktoren tragen zu diesem eher unscharfen Bild bei: die Begrenztheit der untersuchten Grabungsfläche, der ständige Abbau der Befunde durch die fortlaufende Erosion und schliesslich die Unkenntnis über die Herkunft des vor Ort verarbeiteten Metalls.

In Courtedoux-Creugenat wurden Metallgegenstände nur in den Mengen hergestellt, wie die Bewohner sie benötigten. Dies leitet sich u. a. aus der geringen Anzahl an Schmiedeabfällen ab (rund 80 kg). Anders als in Develier-Courtételle fehlen deshalb Anzeichen für eine auf Export ausgerichtete Überschussproduktion. Im verschlackten Abfall von Courtedoux gibt es nur zwei wesentliche Typen von Kalottenschlacken, von denen einer eine aussergewöhnliche homogene chemische Zusammensetzung aufweist. Offenbar wurden hier spezialisierte Arbeiten auf die immer gleiche Weise in der oder den Werkstätte(n) der Siedlung durchgeführt, zu der/denen es allerdings keine Befunde gibt. Vermutlich wurde dementsprechend nur ein Teil der Schmiede-Arbeitstechniken verwendet. Es würde sich so um eine gezielte, begrenzte und spezialisierte Produktion handeln, was durchaus Sinn macht im Zusammenhang mit der Überschussproduktion in Develier-Courtételle. Darüber hinaus sprechen die geringe Grösse des Fundkomplexes aus verschlackten und metallischen Abfällen sowie der lokale Zusammenhang für eine Schmiede allein für den lokalen Bedarf. Der Weiler von Courtedoux-Creugenat lag an einem der alluvialen Zugänge zum Becken von Porrentruy und verfügte wahrscheinlich weder über Erzvorkommen, wie dies im Delsbergerbecken der Fall ist, noch über einen Absatzmarkt, der den Überschuss hätte aufnehmen können. Für die letztgenannte Annahme spricht auch, dass Courtedoux nicht die einzige frühmittelalterliche Siedlung mit Spuren metallurgischer Tätigkeiten im Umfeld von Porrentruy war.

5.2. Neues zum Metall und den Produkten der Schmiede

Anders als in anderen Fundstellen wurden hier eher grosse Objekte aus der Kategorie der eisenreichen Schlacken untersucht. Es handelt sich um fünf vorwiegend oder ausschliesslich aus Metall bestehende Eisenschwammfragmente mit einem Gewicht zwischen 75 und 220 g. Daneben wurden neun kleine Schmiedeabfälle aus fertig ausgeschmiedetem Metall untersucht. Unter den Eisengegenständen wurden vier Messer und zwei Meissel für eine Untersuchung ausgewählt, da sie in Develier-Courtételle oft zu den Produkten der dortigen Schmieden zählen. Es sollte abgeklärt werden, ob in Courtedoux von dort importierte Eisenobjekte in Gebrauch waren.

Wiederum wurden in allen Gegenständen die Schlackeneinschlüsse bzw. die anhaftende Schlacke analysiert (Abb. 19). Alle Eisenschwämme, die nicht aus Gusseisen bestehen, enthalten Schlackeneinschlüsse (Kat. 13, 15 und 17 in Deslex 2013). Sie weisen ein Gefüge aus *Hercynit, Wüstit und *Fayalit in glasiger Matrix auf, in Kat. 15 gibt es nur Wüstit in glasiger Matrix. Die Wüstitbildung steht wohl mit dem Ausheizen in Zusammenhang. Die Schlackeneinschlüsse sind aluminiumreich, was zu einem tiefen Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ führt. Auffällig ist der Manganoxidgehalt um 1% der drei Eisenschwämme (Abb. 19), der diese Schlacken von allen anderen untersuchten unterscheidet. Ein leicht erhöhter Mangangehalt ist teilweise auch in Schmiedeabfällen und Fertigobjekten von Courtedoux festzustellen. Ein Schmiedeabfall (Kat. 23) und zwei Messerklingen enthalten Schlackeneinschlüsse mit deutlich höheren Gehalten an MnO (5–8%). Darin wird ein manganhaltiges Ausgangserz fassbar, dass mit keinem bekannten Vorkommen im jurassischen Verhüttungsbezirk übereinstimmt bzw. aus einem Vorkommen ausserhalb dieses Bezirks stammt. Es gibt Bohnerzvorkommen zwischen Genf und dem Kanton Schaffhausen, die einen erhöhten Mangangehalt haben, so dasjenige auf dem vorwiegend frühmittelalterlichen Eisenverhüttungsplatz in Montcherand VD (Serneels 1993, 211). Es existieren aber auch zahlreiche andere Eisenerzvorkommen mit erhöhtem Mangangehalt.

Fünf Schmiedeabfälle und drei Fertigobjekte sind aufgrund des tiefen Verhältnisses $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ generell oder in einzelnen Einschlüssen mit der jurassischen Eisenverhüttung zu verknüpfen. Im Weiteren zeugen einzelne Zusammensetzungen mit einem hohen Verhältnis $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ von einem starken Einfluss von Holzkohlenasche auf die Schlackenbildung. Die Zusammensetzung der restlichen Objekte lässt sich nur bei einem allfälligen Zusammenhang mit jurassischem Metall wie der Gruppe Develier-Courtételle beurteilen. Dies trifft für den Schmiedeabfall Kat. 21 und das Fertigobjekt Kat. 27 zu.

Im Schmiedeabfall Kat. 21 finden sich wie im Messer Kat. 2.8 aus Develier Einschlüsse (Kap. 3.2), die nur aus Quarzsand (SiO_2) und oxidiertem Metall (FeO) entstanden sind, und weitere mit einem hohen Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Offen-

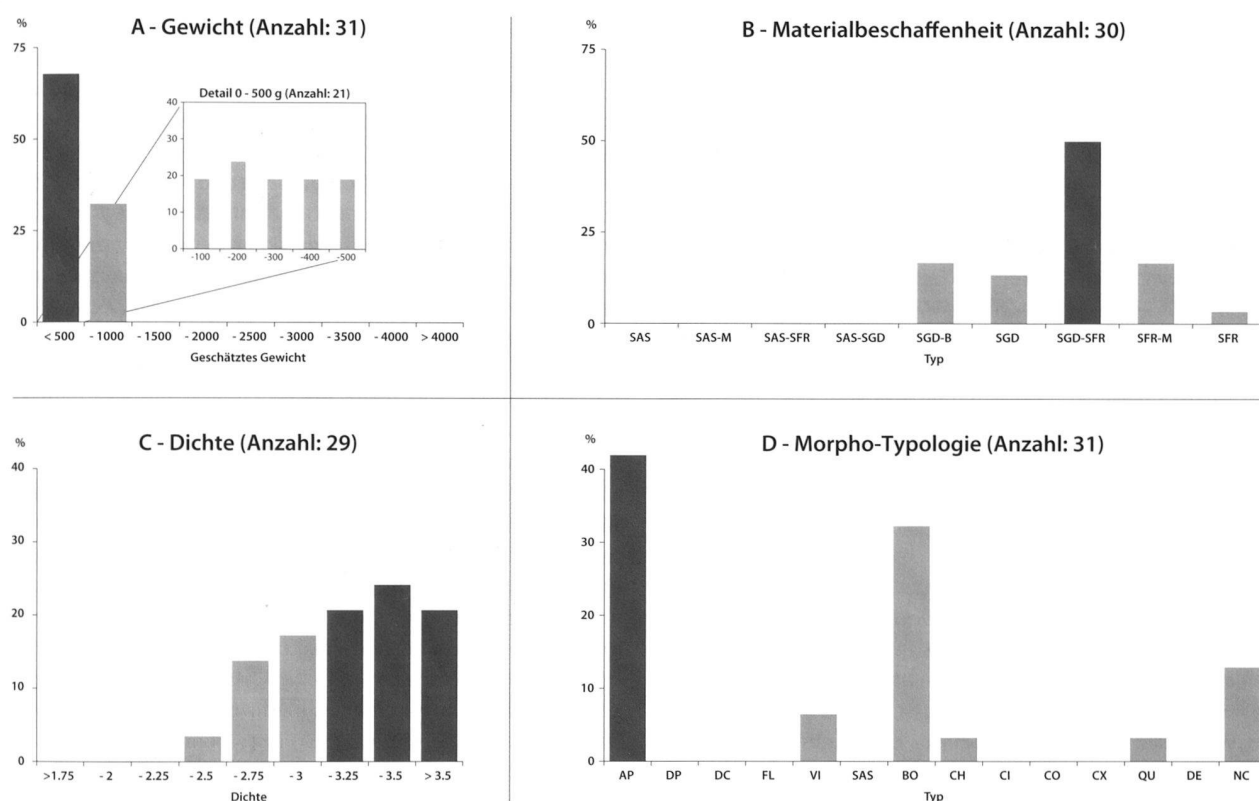


Abb. 25. Die morphologischen Merkmale der Kalottenschlacken aus Courtedoux-Creugenat. Es konnten nicht alle Individuen auf alle Merkmale ausgewertet werden.

sichtlich fand auch in Courtedoux Sand als Antioxidans beim Schweißen Verwendung. Ein noch höheres Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ im Fertigobjekt Kat. 33 und in Teilen des Schmiedeabfalles Kat. 19 sind weitere Belege für diese Praxis. Das Gleiche gilt für Schlackeneinschlüsse im Fertigobjekt Kat. 30: Dort liegt das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ teilweise um 100, während K_2O in einem Teil der Schlackeneinschlüsse fehlt – ein Hinweis dafür, dass nicht nur Sand (SiO_2), sondern ein Sand-Asche-Gemisch als Antioxidans beim Schweißen eingesetzt wurde.

Die chemische Zusammensetzung des Metalls bringt wieder neue, überraschende Aspekte ans Licht (Abb. 20). So dominiert unter den Eisenschwämmen Metall mit sehr hohem Kupfergehalt (1–3% Cu), das nach Ausweis der Schlackenzusammensetzung aus jurassischen Erzlagerstätten hergestellt sein muss. Im alpha-Eisen oder Ferrit liegt die Löslichkeit von Kupfer bei 0,8 Massen%. In den angesprochenen Schwämmen aber sind viel höhere Konzentrationen anzutreffen. Hier hat sich das Kupfer als eigene Phase netzartig im Ferrit auskristallisiert und zwar als Kupfer-Antimon-Verbindung. Antimon ist nur durch die REM/EDX-Analysen nachgewiesen, da es zum Zeitpunkt der Metallanalyse noch nicht mittels LA-ICP-MS im Metall gemessen wurde. Die Form der Auskristallisation der Kupfer-Antimonphase im Eisen ist sehr ähnlich wie bei den Eisenphosphiden. Wie die Zusammensetzung der Schmiedeabfälle und Fertigobjekte

jedoch zeigt, gibt es keine Belege für eine Weiterverarbeitung des kupfer- und antimonreichen Metalls. Es ist anzunehmen, dass es sich bei den betreffenden Eisenschwammfragmenten um ebenso missratene Stücke mit Extremzusammensetzung handelt wie z.B. bei den Eisenschwämmen aus Stahl mit Eisenphosphid-Netz von Boécourt.

In Courtedoux am besten nachgewiesen ist Metall der Gruppe Develier-Courtételle und der zugehörigen Cu-Gruppe. Eisenschwämme, Schmiedeabfälle und zwei Fertigprodukte, ein Messer und ein Werkzeugfragment bestehen daraus. Zudem gibt es ein arsenreiches Metall, das nur in Schmiedeabfällen vorkommt, wiederum jurassischer Herkunft, wie die Schlackenzusammensetzung zeigt. In Chevenez kamen Eisenschwämme zum Vorschein, die wahrscheinlich zur selben Metallgruppe gehören. Hier wurde zudem ein Vertreter der P-Gruppe geborgen, der Spitzmeißel Kat. 33, ebenfalls mit jurassischer Schlackenzusammensetzung. Bei zwei weiteren Gegenständen spricht die Schlackenzusammensetzung ebenfalls dafür, dass das verwendete Metall aus einer Lagerstätte im Jura stammt.

Von dieser jurassischen Metallvielfalt setzt sich ein manganhaltiges Metall ab, ein eutektoider Stahl, der in Messerschneiden verwendet wird, aber auch in einem Schmiedeabfall und in einem Eisenschwamm vorkommt. Bei letzterem handelt es sich um ein kleines, eckiges Stück weisses Guss-eisen. In keiner der untersuchten Fundstellen gibt es An-

haltspunkte für jurassisches Metall mit so hohen Mangangehalten. Alle Messer mit angesetzten Stahlklingen sind Importe (s. Kap. 4.2), auch jene aus Courtedoux.

Vier von neun Schmiedeabfällen aus Courtedoux weisen einen Lagendamast-Aufbau auf, was sehr aussergewöhnlich ist und weder in Develier-Courtételle noch in Chevenez vorkommt. Alle vier sind aus jurassischem Metall geschmiedet. Dazu passt das Messer Kat. 31, dessen untersuchter Schaft in der gleichen Technik gefertigt ist. Die Schmiede in Courtedoux waren wohl auf die Herstellung von Messern in Lagendamast-Technik spezialisiert; für ihre Produkte verwendeten sie Metall, dessen Zusammensetzung jener der Funde aus Develier-Courtételle entsprach.

5.3 Die archäologischen Daten zu den Kalottenschlacken

Alle Kalotten aus Courtedoux wiegen weniger als 1 kg, zwei Drittel höchstens 0,5 kg, in regelloser Verteilung zwischen 0 g und 500 g (Abb. 25,a). Trotz ihres geringen Gewichts weisen die Kalotten sehr hohe Dichtewerte auf: Zwei Drittel liegen über 3,0, was einzigartig ist für alle vier untersuchten Werkplätze (Abb. 25,c). Bei der Einordnung nach Materialbeschaffenheit überwiegt die Mischgruppe SGD-SFR mit 50% aller bestimmten Kalotten (Abb. 25,b). Kein einziges Stück lässt eine sandig-lehmige Komponente erkennen, wenn man von der Wulstbildung beim Typ BO absieht. Es dominieren flache, stark eisenhaltige Kalotten (Typ AP), was mit ein Grund zur allgemein sehr hohen Dichte vieler Stücke sein dürfte (Abb. 25,d).

6. Schlussfolgerungen

Mit Hilfe der neuen Untersuchungen und der systematisch gleichen Auswertung ist es gelungen, bisher unbekannte Aspekte des jurassischen Verhüttungsbezirks im Frühmittelalter heraus zu arbeiten. Ein erster ist der Betrieb der Öfen in Boécourt mit zwei Temperaturzonen: einer zur Metallbildung um 1400°C (seitliche Düse) und einer zur Schlackenbildung um 1200°C (vordere Düse). Der letzte, in situ gefundene Schlackenfluss ist nicht repräsentativ für die graudichten Verhüttungsschlacken, welche typisch sind im frühmittelalterlichen Jura. Das Metall aus Boécourt erwies sich als leicht kohlenstoffhaltiger, phosphorreicher Stahl. Nur ausnahmsweise fand er in den Schmieden in Develier-Courtételle und Chevenez-Lai Coiratte Verwendung.

Sodann ist es gelungen, die Definition der Metallgruppe Develier-Courtételle zu präzisieren und von ihr eine kupferreiche Untergruppe abzutrennen, womit das in der dortigen überregional wichtigen Produktionsstätte verwendete Material nun besser bekannt ist. Weil dessen Zusammensetzung stärker schwankt als jene des Metalls aus Boécourt und jene der kupferreichen Untergruppe, ist anzunehmen, dass darin Rohprodukte aus mehreren jurassischen Verhüttungsplätzen subsumiert werden. Wo die Lieferanten gesessen haben, ist unklar, kommen doch 20 sicher frühmittelalterliche bzw.

über 60 wahrscheinlich frühmittelalterliche Verhüttungsplätze im Delsberger Becken, im Val Terbi und im Grand-Val in Frage (Eschenlohr 2001, 92). Die Untersuchung der Schlackeneinschlüsse hilft nicht weiter, weil das Metall stark umgeschmiedet ist, was sich als Störfaktor auswirkt: Die Objekte wurden beim Schmieden und vor allem beim Schweissen mit Sand vor Oxidation geschützt; daher verschob sich die Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse immer mehr in einen lehmig-sandigen oder nur sandigen Bereich, je mehr Schmiedearbeit geleistet wurde. Besonders viele solche Arbeitsgänge sind nötig, um von einem Eisenschwamm bis zu einem herausragenden Erzeugnis der hiesigen Betriebe zu gelangen: einem Messer in Lagendamast-Technik. Zu dessen Herstellung wurde zunächst der Eisenschwamm ausgeheizt, also von einem Übermass an Schlacke befreit. Danach wurde er kompaktiert, das heisst alle inneren Hohlräume wurden verschweisst, bis ein festes, ausgearbeitetes Metall entstand. Für die Fertigung eines Lagendamasts musste ein mehrlagiger Stab hergestellt werden, der gefaltet und verschweisst wurde. Anschliessend folgte die Formgebung zum eigentlichen Messer mit Schaft. In Chevenez war es möglich, eine Gruppe von phosphorreicher Metall (P-Gruppe) zu identifizieren. Daneben gibt es eine sehr kleine arsenreiche Gruppe. Beide spielen im Verhüttungsbezirk wahrscheinlich eine untergeordnete Rolle, einige Stücke beider Metalle sind aber im benachbarten Courtedoux anzutreffen. Es stellt sich die Frage, ob die Situation deshalb so unklar erscheint, weil die Spezialisierung in Chevenez weniger in der Verhüttung lag als im Ausheizen von Eisenschwämmen mit unterschiedlicher Herkunft, einem Arbeitsschritt, der in allen Kalottenschlackentypen von Chevenez fassbar ist, während er in Develier-Courtételle nur in wenigen Stücken nachzuweisen ist. Eine solche Spezialisierung würde erklären, warum grössere Mengen von Schmiedeabfällen aus fertig ausgeschmiedetem Metall fehlen.

Der Werkplatz von Chevenez ist der einzige der hier untersuchten, aus dem Kalottenschlacken mit eindeutig sandig-lehmigem Bestandteil vorliegen – vielleicht ein Hinweis auf eine Spezialisierung. Die erneute Untersuchung der Verhüttungsschlacken und die Messung ihrer Dichte trugen dazu bei, sie besser zu definieren: Zwei Typen wurden sichtbar, die graudichte und die grau-poröse Fliessschlacke. Eine untergeordnete Bedeutung der Verhüttungstätigkeit würde zumindest teilweise die geringe Menge von Verhüttungsschlacken erklären. Für eine solche Hypothese spricht ebenso die Tatsache, dass der Fundplatz im Randbereich des jurassischen Verhüttungsbezirkes liegt und die ihn nutzenden Menschen nicht auf so viel Erzlagerstätten Zugriff hatten wie etwa jene im Delsberger Becken.

In Courtedoux treffen wir, obwohl Befunde zur Metallurgie fehlen und der Schlackenkomplex klein ist, auf eine spezialisierte Schmiedewerkstätte, die wahrscheinlich Messer und vielleicht auch Werkzeuge in Lagendamast-Technik herstellte. Weitere Fertigungstechniken, so das Anschweissen von Stahlklingen an Messern und die Herstellung von komplexen Damaszener-Messern wie ein aus Courtedoux untersuchtes, sind zwar typische frühmittelalterliche Techniken, sie wurden jedoch im jurassischen Verhüttungsbezirk nicht angewendet.

Die Vielfalt der Metallzusammensetzungen im jurassischen Frühmittelalter überrascht. Allerdings beruht unser Bild vorwiegend auf Abfällen, sei es aus der Verhüttung, sei es vom Ausheizen oder Schmieden. Solche Stücke zeigen oft nicht die Regel des gewünschten Produkts an sondern die Ausnahme, in der aus einem wertvollen Rohstoff ein unbrauchbarer Metallklumpen wurde. Dies trifft sicher für den grossen Eisenschwamm aus Boécourt zu, für alle Gusseisenstücke und für die kupferreichen Eisenschwämme aus Courtedoux. Die Regel aber ist das Metall vom Typ Develier-Courtételle mit seiner kupferreichen Untergruppe, die den verbreitetsten Rohstoff des frühmittelalterlichen, jurassischen Verhüttungsbezirks darstellen.

Schliesslich brachten unsere neuen Untersuchungen die Besonderheit der in bemerkenswerter Art und Weise durch die jurassischen Handwerker im Frühmittelalter beherrschten Arbeitstechniken zutage. Ebenso ist die überregionale Bedeutung des hiesigen regionalen Eisengewerbes zu unterstreichen. So wird das Bild dieser Gegend im Frühmittelalter etwas differenzierter, als dies bisher auf Grund von Gräberfeldern und einigen Siedlungen der Fall war.

Unklar ist nach wie vor, was sich beim Ausheizen im Metall abspielt. Das Austreiben der Schlacke muss bei etwas mehr

als 1200°C erfolgen, sonst wird letztere nicht flüssig. Das Kompaktieren des Eisenschwammes muss bei Weissgluthitze (zwischen 1200 und 1400°C) erfolgen, wenn die bestehenden Hohlräume verschweisst werden sollen. Das bietet viel Spielraum für Fehler, sei es, dass das Metall zu stark erhitzt, sei es, dass es zu lange geglüht wird. Es ist sogar möglich, dass Gusseisen entsteht oder sich zum Schmieden ungeeignete Gefüge entwickeln. Metall kann aber nur dann dem Ausheizen zugeordnet werden, wenn es in der begleitenden Schlacke Anhaltspunkte wie die Wüstit-Bildung gibt, ein Mineral das in den jurassischen Verhüttungsschlacken fehlt.

Marianne Senn

Empa

Abteilung Analytische Chemie

Überlandstrasse 129

CH-8600 Dübendorf

marianne.senn@empa.ch

Ludwig Eschenlohr

Jonnières 11

CH-2900 Porrentruy

ludwig.eschenlohr@bluewin.ch

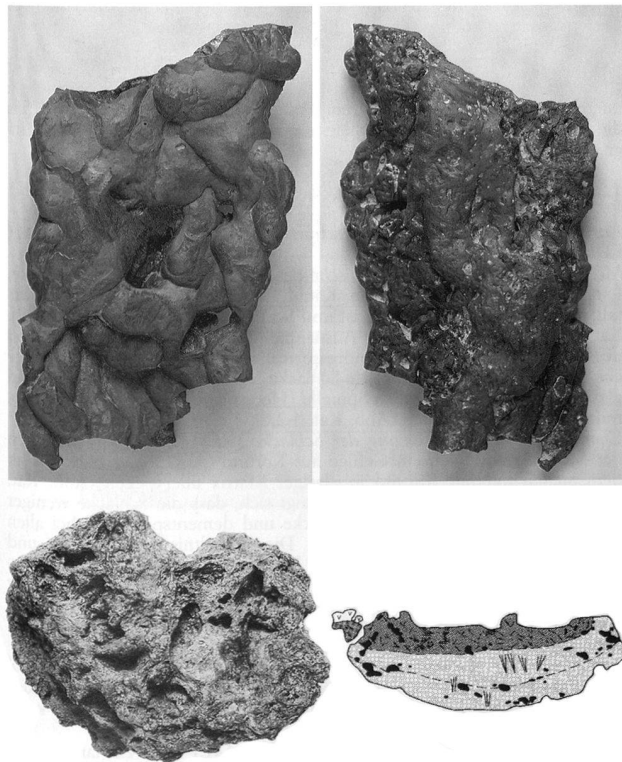


Abb. 26. Oben Fliessschlacke; unten Kalottenschlacke. Nach Evéquo et al. 2012, 47, Fig. 51 (oben); Eschenlohr et al. 2007, 224 (unten).

Glossar

Ausheizen: Prozess, in welchem der Eisenschwamm kompaktiert und Restschlacke aus ihm ausgetrieben wird. Er findet in der Regel in einem Schmiedeherd in Form einer Grube mit seitlicher Luftzufuhr statt.

Ätzung nach Oberhoffer: Metallografisches Ätzmittel zum Sichtbarmachen der Phosphorverteilung in Stahl. Bei diesem Vorgang werden phosphorfreie Partien mit einer kupferfarbenen Beschichtung bedeckt. Je nach Aufnahmetechnik sind phosphorreiche Gebiete hell (Mikroskop) oder dunkel (Stereolupe).

BSD-mode: Rückstreu-Elektronen-Aufnahme am REM. Sie vermittelt erste Eindrücke zur Elementverteilung im beobachteten Gebiet, da schwere Elemente wie Metalle hell, leichte Elemente wie etwas Al und Si dunkel erscheinen.

Fayalit: Eisensilicat Fe_2SiO_4 , kann auch Mg, Ca und Mn enthalten.

Hercynit: *Spinell aus der Gruppe der Aluminat-Spinelle, $FeAl_2O_4$, kann auch Ti und V enthalten.

HV: Härte nach Vickers, Methode der Härtemessung des Metalls. Die anschliessende Zahl, Bsp. HV1 bezeichnet die Kraft mit der der Eindringkörper auf die Probe gedrückt wird (1 = 1 kp bzw. 9.8 Newton).

Korund: Aluminiumoxid Al_2O_3 .

Mullit: Das Mineral Mullit hat einen SiO_2 -Gehalt um 27%, der Al_2O_3 -Gehalt liegt zwischen 64 und 67%, Fe_2O_3 schwankt zwischen 4 und 5% (Kronz 1997, 110).

Nital: alkoholische Salpetersäure, das gebräuchlichste Ätzmittel zur metallografischen Untersuchung von Stahl und Gusseisen.

Paketschweissen: unorganisiertes Verschweissen von Bändern und Blechen zu fertigen Eisengegenständen.

SE-mode: Sekundär-Elektronen-Aufnahme am REM; sie gibt das Relief der Probe wieder.

Siderophil: Eigenschaft von Elementen, die im Rennofen genau so leicht oder leichter als Eisen aus dem oxydischen Zustand im Erz in den metallischen Zustand im Eisenschwamm überführt werden können.

Siderolithikum: Festlandboden, der sich am Ende der Kreidezeit bildete, als die zuvor im Meer liegende Region des Helvetikums trockenfiel.

Seigerung: Entmischungerscheinung, die beim Erstarren einer Schmelze auftritt und die zu Inhomogenitäten im Gefüge führt.

Spinell: Mineral aus der Oxidgruppe. Die Spinellgruppe umfasst Aluminat-, Ferrit- und Chromit-Spinelle mit der allgemeinen Formel $A B_2 O_4$.

Katalog

Die angewandten analytischen Methoden

Alle ausgewählten Eisengegenstände wurden mit einer wassergekühlten Trennscheibe geschnitten, mit dem Ziel, eine möglichst repräsentative Probe zu entnehmen, die anschliessend in Kunstharz eingebettet, geschliffen und poliert wurde. Es folgte die metallografische Untersuchung unter dem Auflichtmikroskop. Erster Schritt war eine makroskopische Begutachtung der ungeätzten Stücke, bei der beurteilt wurde, aus welchen Materialien die Probe besteht (Schlacke, Metall, Holzkohle und Korrosionsprodukte) und wie sie aussehen (Einschlüsse, Verformung, Mineralphasen der Schlacke), zweiter Schritt eine mikroskopische Untersuchung am mit *Nital geätzten Metall. Letztere macht das Metallgefüge sichtbar, seine Körner und Gefügebestandteile ebenso wie ihren Zustand (gegossen, gegläht oder verformt). Als letzter Schritt folgte die Härtemessung nach Vickers, die eine wichtige Materialeigenschaft enthüllt. Dabei betrug die Verweilzeit jeweils 32 Sekunden, aus drei Messungen wurde ein Mittelwert berechnet.

Sodann wurde die chemische Zusammensetzung des Metalls bestimmt; der ungefähre Gehalt an Kohlenstoff war bereits aus der mikroskopischen Untersuchung bekannt. Als Verfahren wurde die Laserablation mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (LA-ICP-MS) gewählt. Dabei trifft zunächst ein Laserstrahl auf das Metall und schlägt eine gewisse Materialmenge ab, die danach mittels Trägergas ins Plasma-Massenspektrometer überführt wird. Dort wird die Probe im heissen Plasma ionisiert, was es erlaubt, die Isotopen der verschiedenen Elemente nach Masse zu detektieren. Auf der Probe entsteht ein Krater von 200–300 µm Durchmesser. Pro Metallschicht wurden mindestens fünf Analysen ausgeführt und daraus ein Median errechnet (mehr zur Methode: Devos et al. 2000). In der Vergangenheit wurden die Elemente Aluminium, Vanadium, Chrom, Mangan, Phosphor, Nickel, Cobalt, Kupfer, Arsen und Silber gemessen. Heute kommen Titan, Molybdän, Zinn, Antimon und Wolfram dazu. Die Methode ist sehr nachweisstark (zwischen einigen mg/kg und wenigen hundert mg/kg), was essentiell ist angesichts der oft geringen Gehalte, die in Rennfeuersteinen zu erwarten sind.

In einem weiteren Schritt wurde die chemische Zusammensetzung der anhaftenden oder im Metall eingeschlossenen Schlacke am Rasterelektronenmikroskop mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalysen (REM/EDX) untersucht. Dazu wurde die Probe mit Kohlenstoff bedampft, um sie leitfähig zu machen. Die Untersuchungen fanden bei einer Spannung von 15 oder 20 kV statt, die Messzeit betrug 60 Sekunden. Die Nachweisgrenze des Gerätes liegt bei 0,1 Massen%, wurde aber wegen zu hoher Standardabweichung bei kleinen Gehalten auf 0,5 Massen% angehoben. Es wurden nur Datensätze verwendet, deren Summe zwischen 95 und 105 Massen% (in der Folge nur mit % angegeben) beträgt. Na₂O wurde bei der Auswertung weggelassen, da es eine untergeordnete Rolle spielt. Alle nicht dargestellten Elemente haben Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze. Diese Methode ist heute in weiten Teilen Europas zur Charakterisierung von Schlackeneinschlüssen geläufig (dazu zuletzt Dillmann/L'Héritier 2007) und kann Auskunft geben über den Prozess, in dem das Metall entstanden ist, im besten Fall zudem über seine Herkunft.

1. Boécourt-Les Bouliès: Abfälle und Produkte der Eisenerzverhüttung

1.1 Eisenschwamm mit Schlacke, BOE 989/2A BO, N3, Ofen 2 Schlackenmulde

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Eisenreiche Schlacke bzw. Eisenschwammfragment, Länge max. 4,3 cm, Gewicht 18 g (Abb. Kat. 1.1.a). Im Anschliff zeigt sich in den Randzonen korrodiertes Metall, welches von Schlackebrocken, aber auch Schlacke und Holzkohlestücken umgeben ist (Abb. Kat. 1.1.b). Die Schlacke hat ein Gefüge aus vorwiegend glasiger Matrix mit kleinsten Metalleinschlüssen und vereinzelt Leisten. Örtlich enthalten die Korrosionsprodukte Partien mit selektiver Korrosion, in denen sich Sekundär-Zementitnadeln und Steadit erhalten haben. Im ungeätzten Metall hebt sich reliefartig ein Netz von steaditreichen Korngrenzen ab.

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Die Schlacke enthält wenige Hercynit-Spinelle, aber zahlreichen Leisten mit sehr geringen Eisenanteilen (Abb. Kat. 1.1.c, chemische Zusammensetzung in Abb. Kat. 1.1.e). Es handelt sich dabei um Korund (Al₂O₃) und Mullit. Die Schlacke ist eisenärmer als die Verhüttungsschlacke aus Boécourt bzw. angereichert in den anderen Bestandteilen. Die Verhältnisse SiO₂/Al₂O₃ und CaO/K₂O sind gleich wie in der Verhüttungsschlacke.

Mikroskopische Beobachtung: Im mit Nital geätzten Metall tritt ein Gefüge aus Ferrit und wenig Perlit hervor, das zu runden Körnern entartet ist (Abb. Kat. 1.1.d). Entlang der Korngrenzen ist Ferrit mit Steaditeinlagerungen mit Schwefeleinschlüssen zu erkennen. An verschiedenen Stellen ist das Metall aufgekohlt. Dies zeigt sich in perlitischen Regionen mit Steaditeinlagerungen, was eutektoide Stahl entspricht, aber auch in Form von übereutektoide Stahl mit einem Gefüge von Sekundärzementit und Perlit (C-Gehalt bis 1,6%).

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Die Analysen enthüllen, dass es sich um einen phosphorreichen Stahl handelt (Abb. Kat. 1.1.f). In den kohlenstoffarmen Partien schwankt der P-Gehalt um 0,3%. Bedeutend höher ist er in den kohlenstoffreichen Gebieten (C-Gehalt von 0,8–1,6%). Hier schwankt er von P 0,7% im eutektoide Stahl bis 1,2% im übereutektoide Stahl. Parallel zum Phosphorgehalt nimmt der Vanadium- und Arsengehalt zu. Die Veränderung der Zusammensetzung ist eine Folge der Aufkohlung.

Fazit: Der untersuchte Stahl ist sehr heterogen, einerseits durch den teilweise hohen Kohlenstoffgehalt, andererseits durch Ausscheidung des Phosphoreutektikums Steadit entlang der Korngrenzen. Während der kohlenstoffarme Stahl wegen des Phosphors eine mittlere Härte hat, sind der Steadit und die Stellen mit übereutektoide Stahl sehr hart. Die Anlagerung der Schlackebröcklein an das Metall ist vielleicht als Hinweis auf eine erste Bearbeitung zu werten. Örtlich ist das Metall von einer Schlacke umgeben, die sich bei höheren Temperaturen (ab 1380 °C) gebildet hat als die sonst übliche Verhüttungsschlacke mit fayalitischer-hercynitischem Gefüge.

1.2 Metallarmer Eisenschwamm, BOE 989/3A BO, M4

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

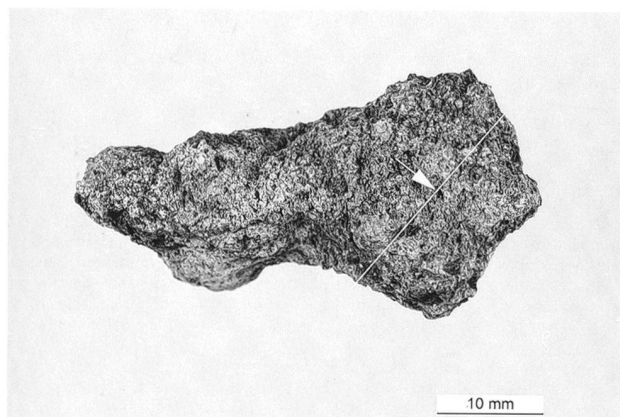
Morphologische und makroskopische Beschreibung: Eisenreiche Schlacke, Länge 5 cm, Gewicht 45 g (Abb. Kat. 1.2.a). Im Anschliff überwiegt Metall, das von Schlacke umgeben ist und Schlackeneinschlüsse enthält (Abb. Kat. 1.2.b). Dies ist jedoch die Ausnahme, denn der nicht beprobte Rest des Objekts ist teilweise vollständig korrodiert. Das Metall enthält zahlreiche unverformte Hohlräume. Die Schlacke hat ein Gefüge aus vorwiegend glasiger Matrix, in der örtlich Spinelle (Hercynit) und Leisten sowie idiomorphe Kristalle auftreten (Abb. Kat. 1.2.c).

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Die Analysen der Minerale enthüllen ein Gefüge aus Korund (Al₂O₃) und Hercynit, in dem Stellen mit nur Korund in glasiger Matrix überwiegen (Abb. Kat. 1.2.e). Bei der chemischen Analyse zeigt sich, dass die Schlacke weniger FeO enthält als die Verhüttungsschlacke und dementsprechend bei allen anderen Elementen angereichert ist. Die Verhältnisse SiO₂/Al₂O₃ und CaO/K₂O sind kleiner als jene in der Verhüttungsschlacke, besonders augenfällig beim Zweiten, das hier 1 beträgt, in der Verhüttungsschlacke aber 2,5. An der Schlackenbildung muss deshalb ein Material beteiligt gewesen sein, das etwas Al₂O₃ und vor allem K₂O einbrachte – etwa die Ofenwand, die zwar sehr sandig ist, aber auch viel mehr K₂O als CaO enthält.

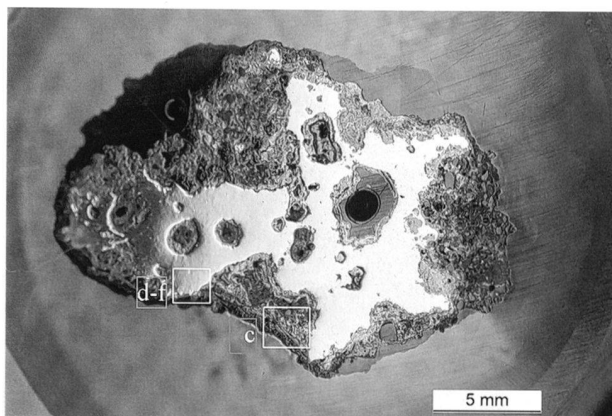
Mikroskopische Beobachtung: Nach dem Ätzen mit Nital zeigt das Metall vorwiegend Stahl mit Widmannstättenschem Gefüge oder grobe Ferritkörner, die Tertiär-Zementitnadeln enthalten (Abb. Kat. 1.2.d). Im Stahl kann der Kohlenstoffgehalt bis 0,8% ansteigen.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Es handelt sich um ein phosphorreiches Metall (Abb. Kat. 1.2.f). Die Gebiete aus Eisen (Median 1) enthalten mehr Phosphor (0,4%) und Arsen (0,08%) als die Gebiete aus Stahl (Median 2), in denen der Kohlenstoffgehalt zwischen 0,1 und 0,8% variiert.

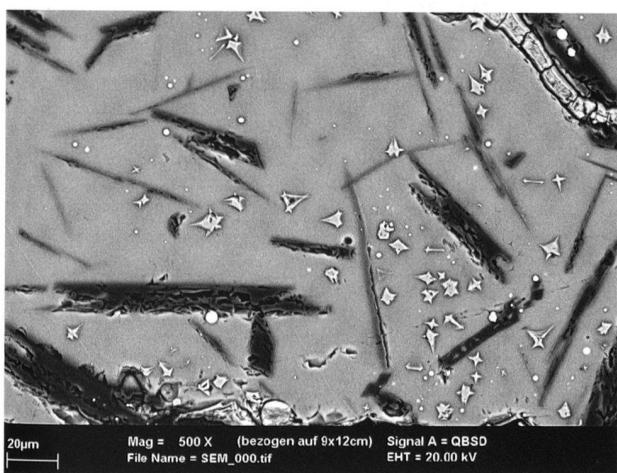
Fazit: Es handelt sich um ein schlackenreiches Eisenschwammfragment, das auszubeuten sich nicht gelohnt hat. Die Anwesenheit von Korund deutet, dass sich die Schlacke bei Temperaturen um 1400 °C bildete. An der Schlackenbildung war auch Ofenwand beteiligt.



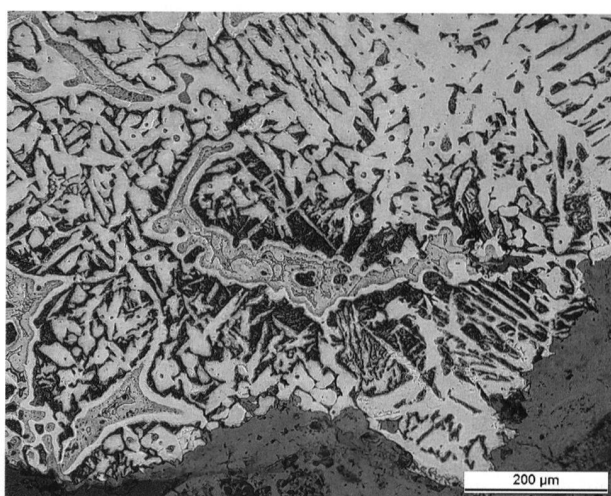
a



b



c



d

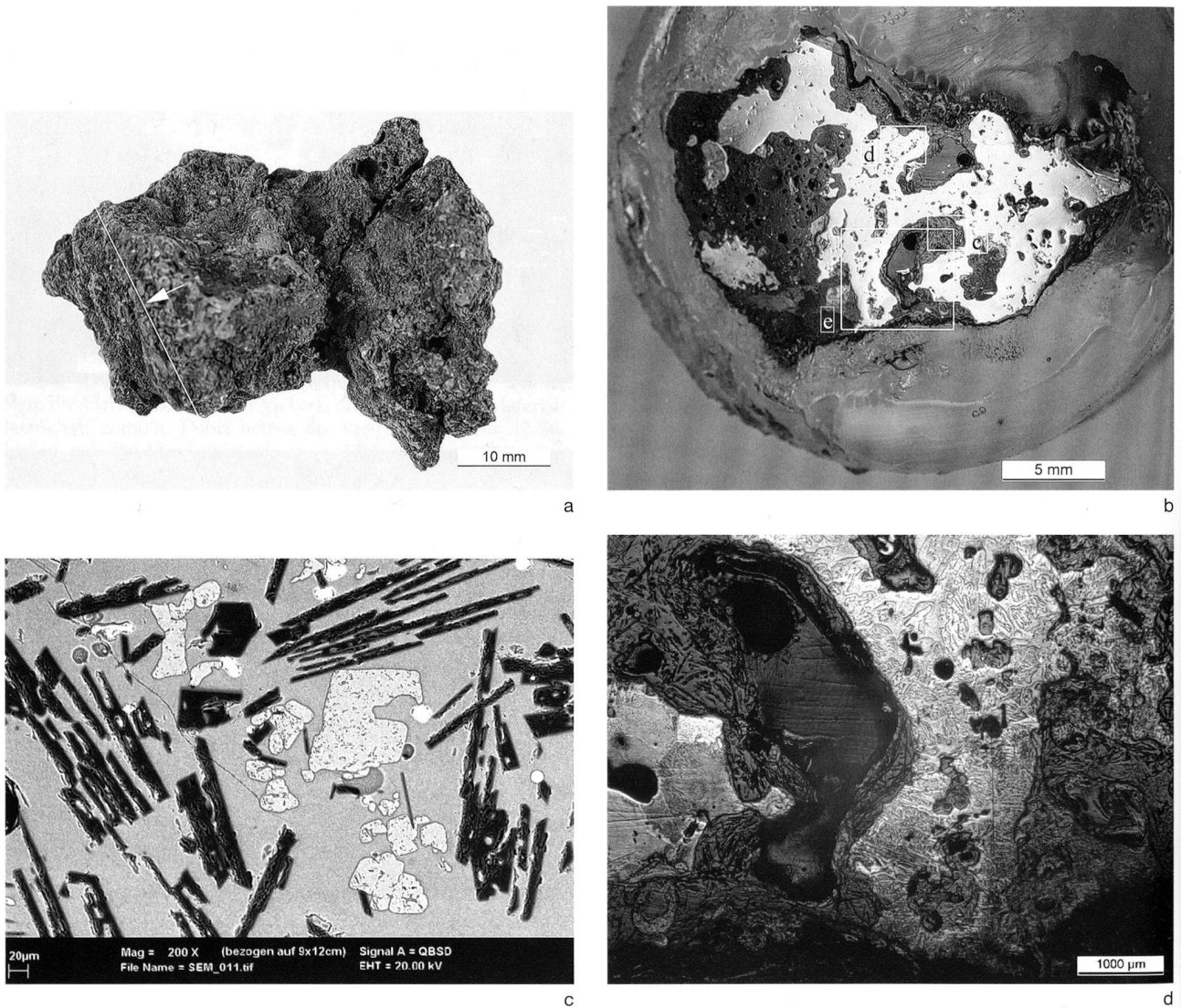
Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Spinell	2.9	51	2.6	<	<	<	3.0	0.8	0.6	34	0.1	-
Leiste	<	93	<	<	<	<	1.0	<	<	0.7	-	-
Leiste	<	95	<	<	<	0.4	1.0	<	<	0.7	-	-
Leiste	<	69	24	<	<	1.0	0.9	<	<	6.8	0.3	-
Leiste	<	76	15	0.6	1.3	0.9	0.8	<	<	8.0	0.2	2.3
Leisten in Glas	0.7	31	39	2.6	4.4	2.0	<	<	<	18	1.2	1.7
Spinelle in Glas	0.7	28	39	1.5	3.8	1.8	<	<	<	24	1.4	2.5
Leisten in Glas	1.0	32	39	2.8	5.7	2.2	<	<	0.7	15	1.2	2.0
Leisten in Glas	1.4	30	40	2.8	9.3	2.2	<	<	<	12	1.3	3.4
Spinelle und Leisten in Glas	0.9	34	37	2.3	3.4	1.9	<	<	<	19	1.1	1.5
Mittelwert	1.0	31	39	2.4	5.3	2.1	<	<	<	17	1.3	2.2

e

mg/kg	Ni/Co	Al	P	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median 1, Stahl C 0.2 %	1.7	<	3000	50	<	<	240	430	140	400	30	<	7	10	5
Median 2, Stahl > 0.8 Massen%	2.1	<	12000	120	40	10	260	540	170	760	40	<	20	30	4
% RSD 1	4	-	15	24	-	-	8	8	8	21	8	-	29	25	12
% RSD 2	8	-	24	12	9	25	3	10	2	10	15	-	19	14	18
NWG		21	198	20	30	8	3	10	21	51	3	4	3	2	2

f

Abb. Kat. 1.1. Eisenschwamm aus Boécourt-Les Boulies. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschlag, bestehend aus Metall (weiss) und Korrosionsprodukten; c REM-Aufnahme, BSD-mode. Leisten und Spinelle in glasiger Matrix. Leichte Elemente sind dunkel (z.B. Al), schwere hell (z.B. Fe); d Ferrit und Perlit (dunkel) mit Steaditeinlagerung; e chemische Zusammensetzung der Schlacke und einzelner Minerale (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Leiste	<	93	<	<	<	<	1.2	<	<	<	-	-
eckiges Korn	<	95	<	<	<	<	1.1	<	<	0.6	-	-
Spinell	3.7	53	<	<	<	0.8	2.8	0.7	0.6	31	-	-
Spinelle und Leisten	1.1	47	32	2	2.8	2.0	1.0	<	0.6	16	0.7	1.4
Einschluss, Glas	0.6	35	44	3.0	3.3	2.9	<	<	0.6	11	1.3	1.1
Leisten in Glas	0.6	46	36	3.3	2.8	2.5	<	<	<	10	0.8	0.8
Leisten in Glas	0.9	35	46	5.2	3.7	3.0	<	<	0.7	7.7	1.3	0.7
Leisten in Glas	0.7	36	38	3.5	2.6	2.5	<	<	<	11	1.0	0.7
Mittelwert	0.8	40	39	3.4	3.0	2.6	<	<	0.6	11	1.0	1.0

mg/kg	Ni/Co	Al	P	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median 1, Eisen	2.4	<	3900	60	<	<	220	530	190	800	30	<	<	20	4
Median 2, Stahl	2.4	<	2000	40	<	<	190	450	160	460	20	<	<	10	4
%RSD 1	3	-	3	9	-	-	10	7	4	5	20	-	-	14	4
%RSD 2	7	-	17	36	-	-	2	9	7	10	12	-	-	20	15
NWG		20	178	24	30	8	2	11	18	51	4	2	3	2	2

Abb. Kat. 1.2. Eisenreiche Schlacke aus Boécourt-Les Boulies. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschliff, bestehend aus Metall (weiss) und Schlacke (grau); c REM-Aufnahme, BSD-mode. Helle Hercynit-Kristalle, dunkle Korund-Leisten und idiomorphe Kristalle (eckig) in glasiger Matrix. Schwere Elemente (z.B. Fe) erscheinen hell, leichte (z.B. Al) dunkel; d links grobkörniger Ferrit, rechts Stahl mit Widmannstädtenschem Gefüge. Grau Schlacke und Korrosionsprodukte; e chemische Zusammensetzung der Schlacke und einzelner Minerale (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).

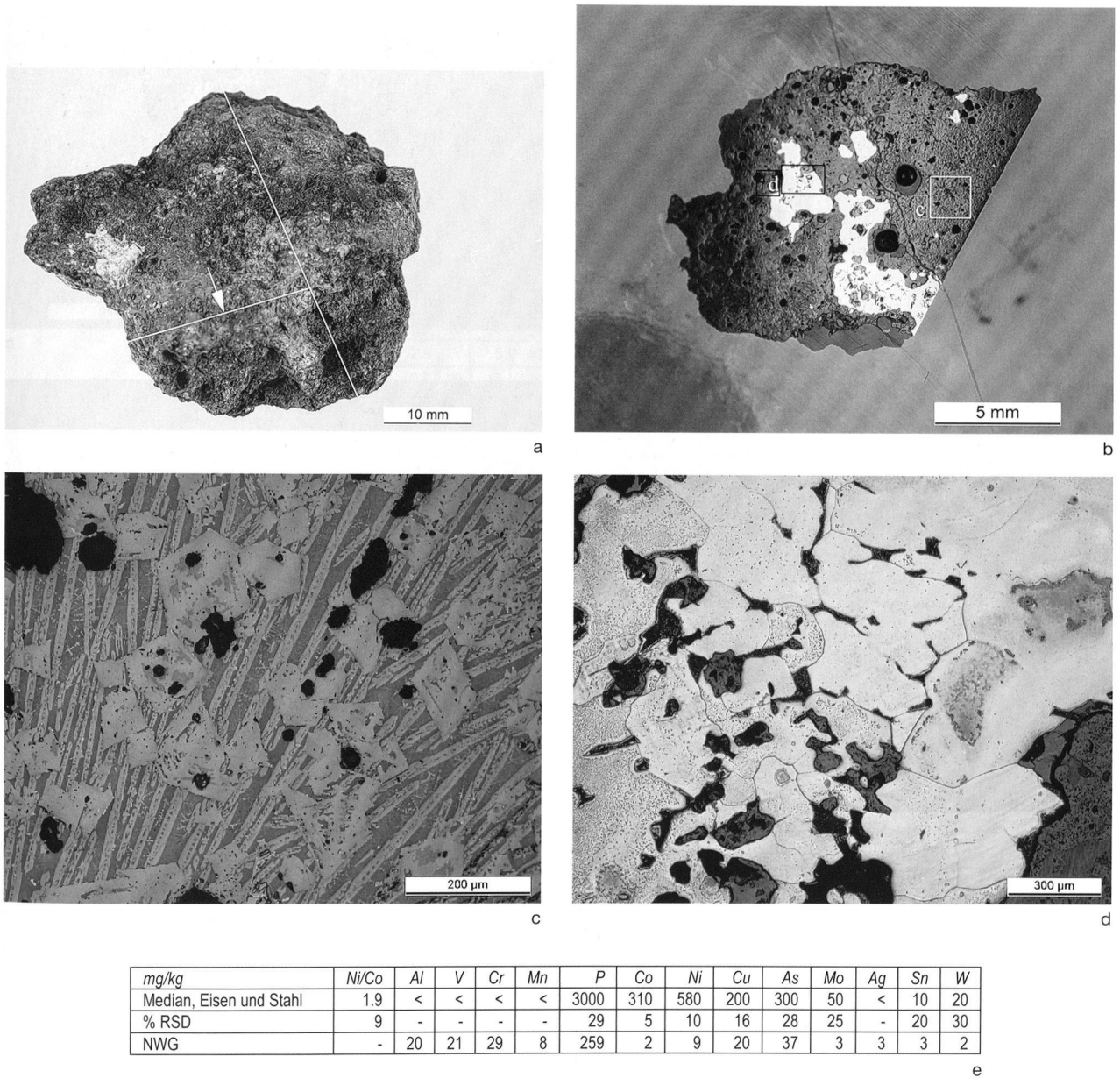


Abb. Kat. 1.3. Eisenreiche Schlacke aus Boécourt-Les Boulies. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschlag, bestehend aus Metall (weiss) und Schlacke (grau); c Hercynit-spinelle auf Fayalitleisten in Glas; d Ferrit, stellenweise mit Korngrenzementit; e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).

1.3 Eisenreiche Schlacke, BOE 989/3B BO, M4

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS-Analysen.
Morphologische und makroskopische Beschreibung: Eisenreiche Schlacke, max. Durchmesser 4,4 cm, Gewicht 39 g (Abb. Kat. 1.3.a). Der Anschlag enthüllt, dass wenig Metall in der Schlacke vorhanden ist (Abb. Kat. 1.3.b). Das ganze Objekt besteht nur zu ca. 5% aus Metall, der Rest ist Schlacke. Letztere hat ein Gefüge aus eckigen Spinellen (Hercynit) auf Fayalitleisten in glasiger Matrix (Abb. Kat. 1.3.c).
Mikroskopische Beobachtung: Nach dem Ätzen mit Nital wird im Metall ein ferritisches Gefüge mit örtlich Korngrenzementit erkennbar (Abb. Kat. 1.3.d). Dies entspricht einem Stahl mit einem C-Gehalt unter 0,1%.
Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Stahl und Eisen bestehen aus einem phosphorreichen Metall (Abb. Kat. 1.3.e).
Fazit: Das Objekt entspricht mit seinem Gefügebestandteilen (Fayalit, Hercynit) der durchschnittlichen Verhüttungsschlacke von Boécourt. Das Stück ist so metallarm, dass es für eine Weiterverarbeitung ungeeignet war.

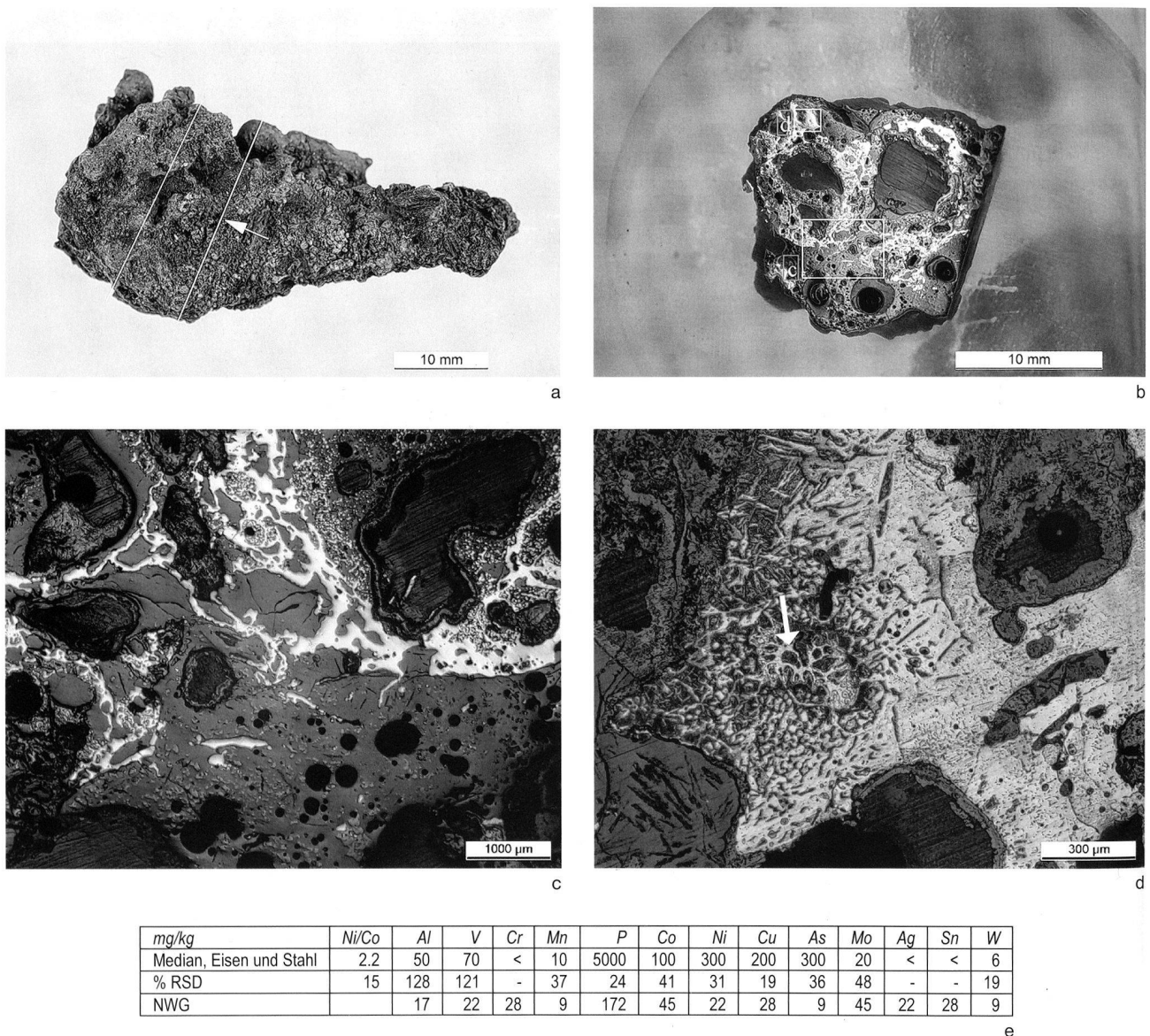


Abb. Kat. 1.4. Eisenschwamm aus Boécourt-Les Boulies. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschlag, darin sind Metallfäden sichtbar, weiss, in grauer Schlacke; c Metallfäden in Schlacke; d dunkel Perlit mit Steaditeinlagerung (hell, Pfeil), weiss Ferrit; e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).

1.4 Metallarmer Eisenschwamm, BOE 989/4A BO, N3, Kontaktzone Ofen 1 – Ofen 2

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS-Analysen.
Morphologische und makroskopische Beschreibung: Eisenarmer Eisenschwamm, Länge 5 cm, Gewicht 16 g (Abb. Kat. 1.4.a). Im Anschlag dominiert Metall (Abb. Kat. 1.4.b). Dies entspricht dem Objekt als Ganzem. Insgesamt findet man darin ca. 70% Metall und 30% Schlacke. Letztere hat ein Gefüge aus hauptsächlich glasiger Matrix mit eckigen Spinellen (Hercynit). Das Metall zieht sich in Fäden und Schlieren durch die Schlacke (Abb. Kat. 1.4,c).

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital macht ein vorwiegend ferritisches Gefüge des Metalls sichtbar. Örtlich treten Aufkohlungen bis 0,6% Kohlenstoff auf (Abb. Kat. 1.4,d). Es handelt sich also um Eisen, das örtlich zu untereutektoidem Stahl aufgekühlt ist. In diesen aufgekühlten Regionen finden sich Eisenphosphide.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Es handelt sich um ein phosphorreiches Metall (P-Gehalt 0,5%, Abb. Kat. 1.4,e). Der Vanadium-Gehalt ist bemerkenswert, weil er sich in einem Eisen bzw. weichen Stahl (C-Gehalt bis 0,2%) findet.

Fazit: Es handelt sich um ein metallarmes Eisenschwammfragment, das nicht weiter verarbeitet werden konnte. Das Metall hatte sich mit der

Schlacke gebildet, die in diesem Fall nur glasige Matrix und Hercynit-Spinelle enthält. Im Metall treten Phosphorseigerungen in Form des Phosphor-eutektikums Steadit auf. Es hat sich vorwiegend Eisen gebildet.

Objekttyp	Katalog	Ni/Co	Cr	V	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Ag	Herkunft
Eisenschwamm	2.1	3.0	<	120	40	1100	460	1400	70	600	n.d.	DEV-CTT
Eisenschwamm	2.2	2.6	20	10	10	500	600	1540	50	1400	n.d.	DEV-CTT
Eisenschwamm	2.3	2.3	<	<	10	700	900	2200	100	1500	n.d.	DEV-CTT
Eisenschwamm	2.4	2.5	<	40	40	2600	460	1180	140	2200	n.d.	DEV-CTT
Schmiedeabfall	2.5	2.4	<	5	5	1500	630	1500	100	2300	n.d.	DEV-CTT
Schmiedeabfall	2.6	2.8	<	5	5	2600	700	1990	150	1400	<	DEV-CTT
Schmiedeabfall	2.7	2.6	<	<	10	1100	680	1760	110	600	n.d.	DEV-CTT
Fertigobjekt	2.8a	2.8	5	5	20	300	330	930	400	300	<	Cu-Gruppe
Fertigobjekt	2.8b	3.2	20	5	5	1100	500	1600	90	1000	<	DEV-CTT
Fertigobjekt	2.9a	2.3	<	<	5	620	470	1080	100	530	<	DEV-CTT
Fertigobjekt	2.9b	3.3	<	<	5	200	1200	4100	300	4900	<	jurassisch
Fertigobjekt	2.10	2.5	20	<	5	760	540	1300	300	1000	<	DEV-CTT
Fertigobjekt	2.11	2.6	10	5	5	1000	400	1000	100	1600	n.d.	DEV-CTT
Eisenschwamm	2.12	2.9	<	5	40	1000	200	600	500	500	n.d.	Cu-Gruppe
Halbfabrikat	2.13a	2.5	20	5	5	800	300	620	370	400	0.8	Cu-Gruppe
Halbfabrikat	2.13b	2.7	10	<	<	900	200	500	400	350	<	Cu-Gruppe
Fertigobjekt	2.14	2.8	<	<	10	1000	620	1770	400	1400	3	Cu-Gruppe
Fertigobjekt	2.15	2.7	5	<	<	900	650	1800	600	2500	0.3	Cu-Gruppe
Eisenschwamm	2.16	3.0	20	<	10	3000	1200	3700	200	5000	n.d.	jurassisch
Fertigobjekt	2.17	17	20	<	<	300	40	680	100	190	<	extern
Fertigobjekt	2.18a	0.3	<	<	10	400	60	20	1300	300	<	extern
Fertigobjekt	2.18b	1.8	5	<	100	500	40	70	400	70	<	extern

Abb. Kat.2.1-18. Chemische Zusammensetzung des Metalls in Kat. 2.1-18 aus Develier-Courtételle (LA-ICP-MS).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Glas	2.6	18	52	<	8.3	17	0.9	0.7	2.9	2.9	2.1
	2.1	15	58	<	9.3	15	0.7	1.4	1.9	4.0	1.6
	2.5	16	51	<	7.8	14	0.9	0.7	1.1	3.1	1.8
	2.8	17	53	<	8.6	16	0.9	0.8	1.4	3.2	1.9
	3.1	20	54	<	5.5	16	1.0	1.3	1.9	2.7	2.9
	2.6	17	53	<	7.9	16	0.9	1.0	1.8	3.2	2.0
Mittelwert	2.6	18	52	<	8.3	17	0.9	0.7	2.9	2.9	2.1

Abb. Kat.2.1. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Glas	2.4	14	49	<	4.5	22	<	<	6.6	3.6	4.9
	3.2	14	44	<	5.0	26	0.7	0.8	4.8	3.0	5.2
	3.2	15	48	<	4.7	29	0.8	0.6	4.6	3.1	6.1
	3.0	15	46	<	4.5	28	0.9	0.7	5.5	3.0	6.2
	5.5	17	49	<	9.2	20	<	1.11	2.2	3.0	2.2
Mittelwert	3.5	15	47	<	5.6	25	0.8	0.8	4.7	3.1	4.9

Abb. Kat. 2.2. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

2. Develier-Courtételle: Schlacken und Schlackeneinschlüsse (REM/EDX-Analysen)

2.1 bearbeitetes Fragment eines Eisenschwammes, DEV 995/51159 PR (Senn 2005, Kat. 71)

Stahl (C-Gehalt 0,6%) mit Eisenphosphid-Einschlüssen, chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die tiefen Verhältnisse SiO₂/Al₂O₃ und CaO/K₂O in der Schlacke belegen, dass sich Verhüttungsschlacke an der Schlackenbildung beteiligt hat (Abb. Kat. 2.1). Das Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ um 4 ist erklärbar durch einen verstärkten Einfluss von sandig-lehmigem Material auf die Schlackenbildung, wie es für das Ausheizen typisch ist.

2.2 Fragment eines Eisenschwammes, CTT 994/58349 TI (Senn 2005, Kat. 90)

Stahl (C-Gehalt um 0,3%) mit Aufkohlungen, örtlich Eisenphosphide, zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Das tiefe Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ in der Schlacke belegt, dass sich Verhüttungsschlacke an der Schlackenbildung beteiligt hat (Abb. Kat. 2.2). Der Einfluss der Holzkohlenasche auf die Schlackenbildung ist stärker als in Kat. 2.1. Holzkohlenasche enthält ein Vielfaches an CaO im Vergleich zu K₂O.

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Wüstit in Glas	0.7	8.2	24	<	1.9	5.3	<	<	63	2.9	2.8
	0.7	8.0	24	<	1.8	5.3	<	<	58	3.0	2.9
	0.7	7.8	23	<	1.7	5.3	<	<	59	2.9	3.1
	<	7.0	21	0.8	1.6	4.8	<	<	62	3.0	3.0
	<	7.8	22	0.6	1.8	5.3	<	<	59	2.9	3.0
Mittelwert	0.7	7.8	23	0.8	1.7	5.2	<	<	60	2.9	3.0

Abb. Kat. 2.3. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Wüstit auf Fayalit in Glas	0.8	9.1	24	3.7	<	1.3	4.7	<	<	59	2.6	3.7
	0.6	8.4	20	3.7	<	1.1	3.9	<	<	63	2.4	3.7
	0.9	7.0	25	4.0	0.6	1.4	5.1	0.6	<	55	3.6	3.7
	0.8	7.4	26	4.0	<	1.6	5.1	<	0.6	55	3.5	3.2
	1.0	6.4	18	5.6	<	1.0	2.5	<	<	65	2.9	2.6
Mittelwert	0.8	7.7	23	4.2	<	1.3	4.3	<	<	59	3.0	3.3

Abb. Kat. 2.4. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Glas	2.2	19	51	<	<	4.4	14	0.9	<	12	2.6	3.2
feinster Wüstit in Glas	1.3	10	30	2.7	<	2.0	7.1	0.6	<	47	3.0	3.6
Wüstit auf niedrigem Fayalit	1.3	8	31	3.0	<	2.0	6.7	<	<	50	3.6	3.4
Wüstit auf niedrigem Fayalit	1.2	11	32	3.2	0.7	2.1	7.5	0.6	<	47	3.0	3.6
niedriger Fayalit	1.5	10	31	2.4	<	2.0	7.9	<	<	49	3.2	4.1
Mittelwert (ohne Glas)	1.3	9.6	31	2.8	<	2.0	7.3	0.6	<	48	3.2	3.7

Abb. Kat. 2.5. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

2.3 Eisen mit Ausheizschlacke, CTT 994/58350 TI (Senn 2005, Kat. 89)

Eisen, zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Der Wüstit spricht hier für eine Schlacke, die während des Ausheizens entstand. Das tiefe Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ entspricht demjenigen in Verhüttungsschlacke (Abb. Kat. 2.3).

2.4 Eisenschwamm bearbeitet, DEV 994/56605 PR (Senn 2005, Kat. 74)

Eisen, chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlacken-Einschlüsse enthalten ein für Ausheizschlacke typisches Gefüge. Ihre chemische Zusammensetzung entspricht aber der Verhüttungsschlacke (Abb. Kat. 2.4).

2.5 Schmiedeabfall, abgeschrotetes Schaft-Ende, CTT 994/2123 TI (Senn 2005, Kat. 87)

Stahl (C-Gehalt um 0,1%), chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlacken-Einschlüsse enthalten ein Gefüge, wie es für Ausheizschlacke typisch ist. Ihre chemische Zusammensetzung entspricht aber Verhüttungsschlacke (Abb. Kat. 2.5).

2.6 Schmiedeabfall, abgeschrotet, DEV 995/1016 PR (Senn 2005, Kat. 83)

Stahl (C-Gehalt 0,1%), chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die chemische Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse legt es nahe, sie als Schmiedeschlacke zu interpretieren, an deren Bildung neben oxidiertem Metall (FeO, P₂O₅) ein sandig-lehmiges Material (SiO₂, Al₂O₃) beteiligt war, mit entsprechend hohem Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ (Abb. Kat. 2.6).

2.7 Schmiedeschlacke mit Metall, DEV 995/51156 PR (Senn 2005, Kat. 80)

Eisen, chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18), umgeben von wüstitreicher Schlacke, die beim Ausheizen bzw. Schmieden entstand (Abb. Kat. 2.7). Entweder als Schmiedeabfall oder als Metallstück zu deuten, das beim Kompaktieren des Eisenschwammes, nach Austreiben der Schlacke, in die Schlacke fiel.

2.8 Messer, DEV 995/908 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 375)

Legendamast, Stahl (C-Gehalt 0,2-0,6%). Der kohlenstoffarme Stahl gehört chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle (Abb. Kat. 2.1-18), der kohlenstoffreiche wurde trotz seines tiefen Arsen-Gehaltes zur Kupfer-Gruppe dazu gezählt. Die Schlackeneinschlüsse enthalten Ausheiz- und Schmiedeschlacke sowie ein Gemisch aus oxidiertem Metall (Fe₂O₃, P₂O₅) mit Sand (SiO₂; oberste zwei Zeilen; Abb. Kat. 2.8). Letztere zeigen, dass Sand als Antioxidans beim Schmieden/Schweissen verwendet wurde.

2.9 Skramasax, DEV 995/1095 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 415)

Legendamast, Stahl (C-Gehalt 0,1-0,4%). Der kohlenstoffarme Stahl gehört chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle (Abb. Kat. 2.1-18), der kohlenstoffreichere ist wegen der hohen Nickel- und Arsengehalte ein Ausreisser. Die Schlackeneinschlüsse lassen sich in drei Kategorien einteilen (Abb. Kat. 2.9): die drei obersten haben einen Bezug zur Verhüttung, wobei sich der erste aus Ausheizschlacke und viel Holzkohlenasche gebildet hat (der Hauptbestandteil ist CaO), die zwei folgenden enthalten TiO₂, was sie neben dem tiefen Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ (2,9-3,4) mit Verhüttungsschlacke verbindet, die restlichen sind aus Ausheiz- und Schmiedeschlacke entstanden. Ein Einschluss zeigt einen starken Einfluss eines sandigen Materials bei seiner Bildung (SiO₂/Al₂O₃ 8,5).

2.10 Spitzmeissel, DEV 995/1096 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 357)

Stahl (C-Gehalt um 0,3%), chemisch Teil der Gruppe Develier-Courtételle (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlackeneinschlüsse haben sich während dem Schmieden gebildet, unter zusätzlichem Einfluss eines sandigen Materials auf die Schlackenbildung (Abb. Kat. 2.10).

2.11 Flachmeissel, CTT 994/2124 TI (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 511)

In Sandwich-Technik gefertigt, aussen Stahl mit C-Gehalt von 0,5%, innen Stahl mit C-Gehalt von 0,1%, chemisch zur Gruppe Develier-Courtételle gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlackeneinschlüsse sind vom Ausheizen bzw. Schmieden beeinflusst (Abb. Kat. 2.11).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /K ₂ O	CaO/K ₂ O
Gefüge unkenntlich	1.1	6.7	40	3.7	0.9	3.8	9.2	<	<	37	6.0	2.4
gefederter Fayalit	1.7	8.1	49	2.6	0.6	4.8	12.2	<	<	24	6.1	2.6
leistenförmiger Fayalit	0.7	4.3	26	6.1	1.0	1.8	4.5	<	<	60	6.1	2.5
randlicher Wüstit auf Fayalit in Glas	<	3.6	27	5.3	<	2.0	3.6	<	<	58	7.6	1.8
grober Wüstit auf gefedertem Fayalit	0.9	3.7	23	5.3	<	1.9	2.9	<	<	62	6.4	1.5
grober Wüstit auf feinem Fayalit	0.8	2.5	19	3.7	0.6	1.3	2.1	<	<	74	7.4	1.7
Mittelwert	1.0	4.8	31	4.5	0.8	2.6	5.7	<	<	52	6.6	2.1

Abb. Kat. 2.6. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
grober Wüstit in Glas	0.8	4.2	19	0.7	1.4	6.7	<	<	71	4.5	4.8
	0.6	4.9	24	0.7	1.7	8.6	<	<	63	5.0	5.1
	0.6	4.7	22	<	1.4	8.4	<	<	67	4.7	5.9
	0.9	4.4	21	0.7	1.6	7.9	<	<	68	4.9	5.1
	0.9	4.0	18	0.7	1.2	6.5	<	<	66	4.6	5.3
	0.7	5.0	24	0.9	1.5	8.7	<	<	58	4.7	5.8
Mittelwert	0.8	4.5	21	0.7	1.5	7.8	<	<	66	4.7	5.3

Abb. Kat. 2.7. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Wüstit in Glas	<	0.7	28	1.0	<	<	<	<	72	41	-
Wüstit in Glas	<	<	27	1.4	<	<	<	<	71	-	-
Wüstit in Glas	<	2.6	10	2.7	1.0	2.5	<	<	83	3.9	2.5
Wüstit auf Fayalit in Glas	1.1	3.2	27	3.3	1.8	5.1	<	<	62	8.5	2.9
tafeliger Fayalit in Glas	0.9	4.3	28	6.8	1.7	9.8	<	<	54	6.5	5.7
Glas?	1.5	9.5	44	2.8	3.4	12.6	<	<	31	4.6	3.7
tafeliger Fayalit in Glas	<	7.6	29	3.7	2.3	5.1	<	<	49	3.8	2.2
Mittelwert (ohne 1 und 2)	1.2	5.4	28	3.8	2.0	7.0	<	<	56	5.5	3.4

Abb. Kat. 2.8. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
unbestimmt	0.7	6.0	22	14	<	20	<	<	32	3.7	-
Wüstit in Glas	<	7.6	22	3.2	0.6	<	0.7	<	69	2.9	-
	<	6.8	23	3.9	0.6	2.6	0.6	<	65	3.4	4.7
	<	4.8	28	1.3	2.0	7.6	<	<	59	5.7	3.8
Fayalit in Glas	0.8	4.0	33	1.5	2.1	9.6	<	<	47	8.5	4.6
Wüstit in Glas	0.9	4.3	15	3.3	1.3	3.8	<	<	70	3.6	3.0
	0.7	6.4	27	3.7	2.6	6.9	<	<	52	4.2	2.6
	0.6	4.2	28	2.8	1.7	4.4	<	<	62	6.7	2.6
Mittelwert (ohne 1)	0.7	5.4	25	2.8	1.5	5.8	<	<	61	5.0	3.5

Abb. Kat. 2.9. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Fayalit in Glas	1.2	4.4	36	2.6	3.0	8.0	<	<	46	8.3	2.7
Glas	1.7	7.2	55	1.8	3.9	10	<	<	21	7.6	2.7
Glas	1.5	7.4	57	0.8	4.2	11	<	<	15	7.6	2.7
Glas	1.5	6.9	52	1.2	3.8	11	<	<	19	7.5	2.9
Fayalit in Glas	1.1	4.2	34	2.1	2.5	7.4	<	<	46	8.1	3.0
Fayalit in Glas	0.9	3.9	34	1.4	2.5	7.1	<	<	46	8.9	2.8
Fayalit in Glas	1.1	4.0	34	1.7	2.6	7.1	<	<	46	8.5	2.7
Mittelwert	1.3	5.4	43	1.7	3.2	8.9	<	<	34	8.1	2.8

Abb. Kat. 2.10. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
unbestimmt	1.3	6.9	34	2.5	2.1	12	<	<	43	4.9	5.5
unbestimmt	1.4	6.6	33	3.3	1.7	11	<	<	44	5.0	6.8
Fayalit, Wüstit in Glas	1.3	6.5	32	3.5	1.3	11	<	<	46	5.0	8.0
unbestimmt	1.5	7.6	36	2.2	1.5	12	<	<	36	4.7	8.3
Glas	2.3	10	46	1.2	2.1	18	<	<	17	4.4	8.6
Mittelwert	1.5	7.6	36	2.5	1.7	13	<	<	37	4.8	7.5

Abb. Kat. 2.11. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Spinelle auf Fayalit in Glas	<	24	21	0.8	0.7	1.5	0.7	<	53	0.8	2.2
Spinelle auf Fayalit in Glas	<	27	18	<	0.6	0.8	1.0	<	55	0.6	1.2
fayalitbetont	<	14	28	<	0.8	1.4	1.2	<	58	2.0	1.8
Spinelle auf Fayalit in Glas	<	25	22	<	0.8	1.5	0.8	<	53	0.9	2.0
Spinelle auf Fayalit in Glas	<	28	20	<	0.6	1.0	1.0	<	53	0.7	1.6
Fayalit in Glas	<	9.5	31	0.8	1.3	2.0	1.2	<	57	3.3	1.5
Spinelle auf Fayalit in Glas	<	29	21	0.6	0.9	1.4	0.9	<	51	0.7	1.7
Mittelwert	<	22	23	0.7	0.8	1.4	1.0	<	54	1.3	1.7

Abb. Kat. 2.12. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Hercynit	<	46	1.0	<	2.7	<	<	1.1	<	47	0.02	-
Hercynit	1.6	52	0.9	<	2.4	<	<	<	<	42	0.02	-
Hercynit	1.3	48	1.0	<	1.9	<	<	<	<	46	0.02	-
Hercynit, Rhönit? und Fayalit	0.6	8.8	25	5.7	<	1.3	2.5	<	<	57	2.8	1.9
Glas?	1.2	20	50	<	<	3.6	8.1	0.8	<	14	2.5	2.2
Hercynit, Rhönit?, Wüstit und Fayalit	0.6	20	20	3.6	0.6	1.2	2.9	<	<	53	1.0	2.4
Hercynit, Wüstit und Fayalit	0.8	19	20	1.7	<	1.2	3.2	<	<	56	1.0	2.7
Hercynit, Wüstit und Fayalit	<	7.6	25	4.9	<	1.4	2.6	<	<	59	3.3	1.9
Hercynit, Rhönit? und Fayalit	<	7.3	26	6.5	<	1.7	4.3	<	<	56	3.5	2.6
Wüstit und Fayalit	<	10	30	1.9	<	1.9	4.9	<	<	52	3.1	2.6
Hercynit, randlicher Wüstit und Fayalit	<	10	31	1.9	<	2.2	4.8	<	<	52	3.0	2.2
Wüstit auf Fayalit	0.7	9.3	29	4.9	<	1.9	5.6	<	<	52	3.1	3.0
Hercynit, Rhönit? und Fayalit	0.8	15	26	2.9	<	1.9	5.1	<	<	53	1.8	2.7
Mittelwert	0.8	13	28	3.7	<	1.8	4.4	<	<	50	2.4	2.5

Abb. Kat. 2.13. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

2.12 Verhüttungsschlacke mit Eisen, DEV 994/52581 PR (Senn 2005, Kat. 52)

Die Schlacke weist das für Verhüttungsschlacke typische Gefüge aus Hercynit und Fayalit in glasieriger Matrix auf. Ebenso typisch sind das tiefe Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ und CaO/K₂O und deren geringe Gehalte (Abb. Kat. 2.12). Die Schlacke umhüllt Eisen, das zur Cu-Gruppe gehört (Abb. Kat. 2.1-18).

2.13 Halbfabrikat, DEV 995/901 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 86)

Eisen und Stahl, chemisch zur Cu-Gruppe gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlackeneinschlüsse enthalten das für Verhüttungsschlacken typische Gefüge aus Hercynit und Fayalit und möglicherweise Rhönit. Zusätzlich erscheint Wüstit, der sich vielleicht erst nachträglich, beim Ausheizen bildete. Die tiefen Verhältnisse SiO₂/Al₂O₃ und CaO/K₂O entsprechen in ihrer Zusammensetzung reiner Verhüttungsschlacke (Abb. Kat. 2.13).

2.14 Spitzmeissel, DEV 995/762 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 172)

Lagen- und Streifendamast, hergestellt aus Stahl (C-Gehalt um 0,2%), chemisch zur Cu-Gruppe gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlackeneinschlüsse haben eine ähnliche Zusammensetzung wie Schmiedeschlacken mit starkem Einfluss eines sandigen Materials sowie, mit einer Ausnahme, von Holzkohlenasche, in der der CaO-Gehalt problemlos ein Vielfaches des K₂O-Gehalts betragen kann (Abb. Kat. 2.14). Es ist möglich, dass hier ein Gemisch aus Sand und Asche als Antioxidans beim Schweißen benutzt wurde.

2.15 Skramasax, DEV 995/1054 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 350)

Legendamast aus Stahl (C-Gehalt zwischen 0,3 und 0,6%), chemisch zur Cu-Gruppe gehörig (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlackeneinschlüsse haben eine den Schmiedeschlacken vergleichbare Zusammensetzung (Abb. Kat. 2.15).

2.16 Ausheizschlacke mit Eisen, DEV 994/52602 PR (Senn 2005, Kat. 56)

Eisen, chemisch ein Ausreisser in der Gruppe Develier-Courtételle (Abb. Kat. 2.1-18), aber wegen der Schlackenzusammensetzung dem jurassischen Verhüttungsbezirk zuzuweisen (Abb. Kat. 2.16): Die Einschlüsse mit einem Verhältnis SiO₂/Al₂O₃ unter 3 stimmen mit jenen in jurassischer Verhüttungsschlacke überein, wobei etwas mehr CaO vorhanden ist als in den meisten Vergleichsbeispielen. Auffällig ist das Vorhandensein von Wüstit neben Fayalit und Hercynit. Möglicherweise ist dies eine Modifikation, die mit dem Ausheizen zusammenhängt. Die Zusammensetzung der weiteren Schlackeneinschlüsse entwickelt sich durch Beteiligung eines sandig-lehmigen Materials immer mehr in Richtung Schmiedeschlacken.

2.17 Spitzmeissel, DEV 995/1069 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 356)

Stahl (C-Gehalt 0,8-1%), gehärtet, Ausreisser bzw. importierter Eisengegenstand (Abb. Kat. 2.1-18). Die Schlacke in den Einschlüssen lässt sich ohne Bezug zum Ausgangserz nicht näher interpretieren (Kat. Kat. 2.17).

2.18 Messer, DEV 995/814 PR (Eschenlohr et al. 2007, Kat. 175)

Messer aus kohlenstoffarmem Stahl mit angesetzter Stahlschneide. Beide Zusammensetzungen sind Ausreisser bezüglich der Metallgruppe Develier-Courtételle: Das Messer ist ein Importgegenstand (Abb. Kat. 2.1-18). Die Einschlüsse in der Schneide (erste drei Analysen) deuten auf ein manganhaltiges Erz (Abb. Kat. 2.18). Ohne Kenntnis der chemischen Zusammensetzung einer Erzquelle bzw. zu einer Verhüttungsschlacke lässt sich nicht ableiten, in welchem Verarbeitungsschritt sich die Schlackeneinschlüsse bildeten. Wahrscheinlich handelt es sich aber bei Körper und Schneide um zwei verschiedene Ausgangserze (mit/ohne Mangan, K₂O>CaO/CaO>K₂O).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
unbestimmt	1.3	3.9	26	16	1.0	22	<	<	31	6.7	23
unbestimmt	1.2	3.9	27	3.8	1.1	13	<	<	53	7.0	12
Glas	1.2	3.6	44	1.3	1.1	31	<	<	7.8	12	29
Wüstit in Glas	<	2.4	19	1.8	1.4	1.8	<	<	66	8.1	1.3
unbestimmt	0.9	4.5	34	1.2	1.4	8.0	<	<	60	7.5	5.6
unbestimmt	0.9	6.7	56	<	2.8	12	0.6	<	17	8.4	4.4
Mittelwert	1.1	4.2	34	4.8	1.4	15	<	<	var	8.3	13

Abb. Kat. 2.14. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
unbestimmt	0.8	5.2	29	2.2	1.9	3.5	<	<	61	5.6	1.9
unbestimmt	0.7	4.7	27	6.5	1.8	3.3	<	<	56	5.7	1.9
Fayalit in Glas	1.0	6.4	35	1.9	2.6	4.9	<	<	46	5.4	1.9
unbestimmt	0.6	5.1	28	5.9	2.2	5.8	<	<	51	5.5	2.6
Fayalit in Glas	0.8	6.3	35	1.9	2.6	4.9	<	<	47	5.6	1.9
unbestimmt	<	5.2	28	4.2	2.5	3.2	<	<	54	5.4	1.3
unbestimmt	0.9	6.8	37	2.6	2.7	5.1	<	<	45	5.5	1.9
Mittelwert	0.8	5.7	31	3.6	2.3	4.4	<	<	51	5.5	1.9

Abb. Kat. 2.15. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Spinell	2.3	49	<	<	<	<	<	<	<	46	-	-
Wüstit auf Fayalit in Glas	0.8	8.5	30	1.6	<	1.7	9.4	0.6	0.7	48	3.5	5.5
Wüstit in Glas	1.1	7.5	27	1.8	<	1.6	8.2	0.7	<	55	3.5	5.1
unbestimmt	0.8	7.7	30	7.1	<	3.3	9.8	<	<	40	3.9	3.0
Wüstit auf Fayalit in Glas	0.8	8.4	31	2.0	<	1.6	10	<	<	44	3.7	6.7
Wüstit auf Fayalit in Glas	0.6	6.1	25	3.9	0.8	2.2	7.2	<	<	56	4.1	3.3
Wüstit auf Fayalit in Glas	0.6	9.5	27	1.5	<	1.8	8.7	<	<	54	2.8	4.8
grober Wüstit in Glas	<	1.9	8	1.0	<	<	1.9	<	<	83	4.2	-
Wüstit auf Fayalit in Glas	<	4.3	22	2.9	0.7	1.6	5.4	<	<	64	5.0	3.4
grober Wüstit in Glas	0.6	7.0	25	1.9	0.8	1.4	7.8	<	<	59	3.5	5.6
Wüstit und Spinelle auf Fayalit in Glas	0.9	11	21	1.1	<	1.1	6.5	<	<	60	1.8	5.7
Wüstit und Spinelle auf Fayalit in Glas	0.8	9.7	23	1.1	<	1.3	7.7	<	<	57	2.4	5.8
Wüstit und Spinelle auf Fayalit in Glas	0.6	8.6	17	1.2	<	<	4.1	<	<	62	2.0	-
Mittelwert	0.8	7.5	24	2.2	<	1.8	7.3	<	<	57	3.4	4.9

Abb. Kat. 2.16. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
unbestimmt	2.4	7.8	50	<	3.9	15	<	<	20	6.4	3.9
Glas	2.5	8.9	65	<	4.7	18	0.7	<	4.2	7.3	3.8
Glas	2.6	10	59	<	4.6	20	0.7	<	2.5	5.9	4.5
Glas	2.5	8.7	58	<	4.7	21	0.6	<	3.0	6.7	4.5
Glas	2.3	8.5	51	<	4.1	24	0.7	<	3.6	6.0	5.8
Mittelwert	2.4	8.8	57	<	4.4	20	0.7	<	6.6	6.5	4.5

Abb. Kat. 2.17. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Glas	<	9.8	72	<	6.2	3.3	0.94	1.7	9	7.3	0.5
Fayalit in Glas	<	3.5	29	<	2.6	2.6	<	1.1	41	8.4	1.0
Fayalit in Glas	<	3.5	34	<	1.5	1.1	<	1.0	65	9.8	0.7
Würmchen in Glas	0.9	3.8	30	1.2	1.5	1.6	<	<	64	7.8	1.0
Wüstit in Glas	<	1.5	14	<	0.7	0.6	<	<	88	9.3	1.0
Fayalit in Glas	0.6	3.5	28	1.6	1.7	1.8	<	<	67	8.2	1.0
Fayalit in Glas	1.8	2.6	33	0.7	0.8	1.5	<	<	66	13	2.0
Fayalit in Glas	<	4.1	25	3.4	1.5	2.7	<	<	68	5.9	1.8
Mittelwert Schneide	<	5.6	var	<	3.4	2.3	<	1.2	var	8.5	0.8
Mittelwert Körper	1.1	3.1	26	1.7	1.2	1.6	<	<	70	8.8	1.4

Abb. Kat. 2.18. Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen).

3. Chevenez-Lai Coiratte: Abfälle und Fertigobjekte

3.1 Metallarmer Eisenschwamm, CHE 002/6646 CO, Sc 102, ano 82, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Abfall mit unregelmässiger Oberfläche und länglicher Form, stark von Korrosion angegriffen, Länge 4,7 cm, Gewicht 34 g (Abb. Kat. 3.1.a). Der Anschlag enthält ein Gemisch aus Schlacke und Metall neben Korrosionsprodukten und Holzkohle (Abb. Kat. 3.1.b). Die Schlacke weist örtlich ein Gefüge aus wenigen hellgrauen Spinellen und Metall in überwiegend glasiger Matrix auf. In der REM-Untersuchung überwiegt ebenfalls glasige Matrix mit skelettierten Leisten und Rhomben von idiomorpher Form (Abb. Kat. 3.1.c).

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Die Leisten haben eine chemische Zusammensetzung, die sie in die Familie der Feldspate einreicht (Abb. Kat. 3.1.c). Kronz analysierte in verschiedenen Schlacken Feldspat mit ähnlicher Zusammensetzung (Kronz 1997, 249). Die idiomorphen Kristalle sind ähnlich zusammengesetzt wie Mullit. Dieses Mineral wurde von Kronz in verglasten, lehmig-sandiger Ofenwand festgestellt (Kronz 1997, 110). Die hier vorgestellte Variante unterscheidet sich vor allem dadurch, dass sie Vanadium enthält.

Das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ist ähnlich wie in der Verhüttungsschlacke aus Chevenez, das Verhältnis $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ indessen ist leicht erhöht: es beträgt 2,9-3,9 gegenüber 2-2,2 in den Verhüttungsschlacken. Wegen des eher geringen Eisengehalts des Objekts ist es wahrscheinlich, dass es sich um eine Hochtemperaturvariante der Verhüttungsschlacke handelt wie in Boécourt (s. Teil 1), mit einer Anreicherung durch Asche, deren Hauptbestandteile CaO und K_2O sind.

Mikroskopische Beobachtung: Nach dem Ätzen mit Nital wird im Metall ein Gefüge aus rekristallisiertem Ferrit mit wenig Korngrenzenzementit sichtbar (Abb. Kat. 3.1.d). Es handelt sich um einen untereutektoiden Stahl (C-Gehalt 0,1%).

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Der Stahl ist phosphorreich, bei sehr niedrigen Gehalten an allen restlichen Elementen (Abb. Kat. 3.1.f).

Fazit: Es handelt sich um einen unbearbeiteten, metallarmen Eisenschwamm aus kohlenstoffarmem, phosphorreichem Stahl.

3.2 Bearbeiteter Eisenschwamm, CHE 002/6666 CO, Sc 102, un 8, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Abfall mit länglicher Form und unregelmässiger Oberfläche, Länge 4,5 cm, Breite 2,3 cm, Dicke max. 1,9 cm, Gewicht 24 g, stark von Korrosion angegriffen, nicht konserviert (Abb. Kat. 3.2.a). Der Anschlag hat eine annähernd rechteckige Form (Abb. Kat. 3.2.b). Die Schlacke haftet lokal an das Metall an und bildet einen grossen Einschluss im Metall. Sie besteht aus einem Gefüge aus Dendriten und Nadeln in glasiger Matrix.

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Das Gefüge ist typisch für Verhüttungsschlacke: Hercynit in dendritischer und eckiger Form sowie Nadeln, möglicherweise Rhönit, in glasiger Matrix (Abb. Kat. 3.2.c). Die chemische Zusammensetzung unterscheidet sich von der Verhüttungsschlacke von Chevenez durch ihre höheren Al_2O_3 , SiO_2 und P_2O_5 -Gehalte. Die Verhältnisse sind jedoch gleich (Abb. Kat. 3.2.c).

Mikroskopische Beobachtung: Das mit Nital geätzte Metall hat ein Gefüge aus grobkörnigem Ferrit mit Neumannschen Bändern (Abb. Kat. 3.2.d). Es wurde kalt bearbeitet.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Das untersuchte Eisen ist sehr phosphorreich (P-Gehalt 0,5%) und enthält mittlere Gehalte von Co, Ni, Cu und As (Abb. Kat. 3.2.f).

Fazit: Der Eisenschwamm besteht aus phosphorreichem Eisen; seine rechteckige Form im Anschlag und das Gefüge lassen erkennen, dass er kalt verformt wurde.

3.3 Gusslauf, CHE 002/6722-1 CO, Sc 19, N152/E29, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Das Abfallstück hat plane Aussenseiten und eine unregelmässige Gesamtform, Länge 2,6 cm, Dicke 0,9 cm, Gewicht 8 g, nicht konserviert (Abb. Kat. 3.3.a). Im Anschlag ist Metall mit einer grossen Anzahl rundlicher Poren zu erkennen (Abb. Kat. 3.3.b). Die Oberflächen sind selektiv korrodiert und bewahren die typisch dendritische Form des Ledeburits am Übergang Metall-Korrosionsprodukte (Abb. Kat. 3.3.c).

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital macht das für weisses Gusseisen typische Gefüge sichtbar: dendritischer Ledeburit, der Inseln von lamellarem Perlit umschliesst (Abb. Kat. 3.3.d). Der Kohlenstoffgehalt wird auf Gehalte zwischen 2,5 und 3% geschätzt.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Das Gusseisen weist einen mittleren P-Gehalt auf (0,04%) und ist sonst arm an Spurenelementen (Abb. Kat. 3.3.e).

Fazit: Es handelt sich um ein Stück nicht schmiedbares weisses Gusseisen.

3.4 Gusslauf, CHE 002/6686 CO, Sc 19, ano 6, R1

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS-Analysen. *Morphologische und makroskopische Beschreibung:* Abfallstück in Form eines Tropfens, Länge 5,4 cm, Gewicht 27 g, konserviert (Abb. Kat. 3.4.a). Im Anschlag enthält das Metall zahlreiche runde Poren, deren Ränder oft korrodiert sind oder die mit Korrosionsprodukten ausgefüllt sind (Abb. Kat. 3.4.b,c). Das Metall weist ein Relief auf, das die Verteilung des Ledeburits markiert.

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital enthüllt ein Gefüge aus Ledeburit und globularem Perlit (Abb. Kat. 3.4.d). Es handelt sich um weisses Gusseisen, das einen Glühvorgang durchlaufen hat.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Das weisse Gusseisen ist phosphorreich (P-Gehalt 0,8%) und enthält mittlere Gehalte von Cobalt, Nickel und Arsen (Abb. Kat. 3.4.e).

Fazit: Gusslauf aus weissem, nicht schmiedbarem Gusseisen.

3.5 Eisenschwamm - CHE 002/6722-3 CO - Sc 19, N152/E29, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Eckiges Abfallstück, Länge 2,7 cm, Gewicht 35 g (Abb. Kat. 3.5.a), eine Seite im Anschlag angeschliffen (Abb. Kat. 3.5.b), möglicherweise durch Schrotten, nicht konserviert. Der Anschlag enthält vorwiegend Metall mit wenig Schlacke entlang der Oberfläche und in Einschlüssen, die Schlacke hat eine glasige Matrix. Das Metall weist ein charakteristisches Relief aus einem Ledeburit-Netz auf (Abb. Kat. 3.5.c).

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ des Objekts lässt sich mit den Ausheizschlacken aus Chevenez vergleichen (Abb. Kat. 3.5,e). Ein sehr CaO-reiches Material, wahrscheinlich Holzkohlenasche mit hohem Verhältnis von $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$, beeinflusst seine Zusammensetzung.

Mikroskopische Beobachtung: Nach dem Ätzen mit Nital ist im Metall ein Gefüge aus Ledeburit und Perlit mit Sekundärzementitnadeln zu sehen (Abb. Kat. 3.5,d). Der C-Gehalt variiert zwischen 2 und 2,2%.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Der Stahl ist arsen- (0,3%) und nickelreich (0,2%), während sich im Ledeburit Phosphor und Arsen zusätzlich angereichert haben (P-Gehalt 0,6%, As-Gehalt 0,5%; Abb. Kat. 3.5,f).

Fazit: Die Phosphorverteilung ist typisch für verhüttetes Metall, wenn man mit Stücken aus Boécourt vergleicht (Teil 1), während die wenige Schlacke bereits vom Ausheizen beeinflusst ist. Trotzdem stellt sich die Frage, ob das Metall nicht während des Ausheizens zu Gusseisen aufgekohlt wurde.

3.6 Ausheizabfall, CHE 002/6665 CO, Sc 102, un 8, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Abfall mit einer unregelmässigen Oberfläche und einer länglichen Form, Länge 4,2 cm, Gewicht 32 g, nicht konserviert (Abb. Kat. 3.6.a). Die Korrosion führte dazu, dass das Stück in mehrere Teile zerfiel. Im Anschlag bedeckt Schlacke den oberen Teil des Metalls und dringt in der Mitte ins Metall ein (Abb. Kat. 3.6.b). Die Schlacke hat ein Gefüge aus groben Wüstidendriten und schliesst oxidierte Hammerschlag-Lamellen ein (Abb. Kat. 3.6,c). Es ist wahrscheinlich, dass sie sich während einer oxidierenden Phase der Warmbearbeitung des Metalls bildete. Im Metall fehlen Schlackeneinschlüsse fast völlig.

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Die Anwesenheit von Wüstit und das Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ordnet die Schlacke in den Kontext der Ausheizschlacken vor Ort ein (Abb. Kat. 3.6,e). Nur der etwas erhöhte P_2O_5 -Gehalt unterscheidet sie (P_2O_5 0,5% in den Ausheizschlacken).

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital enthüllt ein Widmannstättisches Gefüge im Metall. Örtlich ist die Oberfläche bis zu eutektoidem Stahl aufgekohlt (Abb. Kat. 3.6,d). Es handelt sich um einen kohlenstoffarmen, untereutektoiden Stahl (C-Gehalt um 0,2%).

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Der Stahl ist phosphorreich (P-Gehalt 0,1%) und weist bei allen anderen Elementen tiefe Gehalte auf (Abb. Kat. 3.6,f).

Fazit: Es handelt sich um ein Stück phosphorreichen Eisenschwamm aus kohlenstoffarmem Stahl, das während des Ausheizens oxidierenden (Schlackebildung) und reduzierenden (Aufkohlung einer Oberseite) Bedingungen ausgesetzt war.

3.7 Schmiedeabfall, CHE 002/6722-2 CO, Sc 19, N152/E29, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS- und REM/EDX-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Abfall mit planen Aussenseiten und einer schräg zu einer Schneide geformten Seite, Länge 3,2 cm, Gewicht 22 g, nicht konserviert (Abb. Kat. 3.7.a). Im Anschlag enthält das Metall wenige Schlackeneinschlüsse, sie sind etwas zahlreicher

zur abgeschrägten Schneide hin (Abb. Kat. 3.7,b). Die Schlacke zeigt ein Gefüge aus glasiger Matrix und selten aus Wüstit in glasiger Matrix. Das Metall enthält unverformte Hohlräume und intergranulare Risse zur Oberfläche hin.

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Die Schlackeneinschlüsse haben dasselbe Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ wie die örtliche Ausheischlacke (Abb. Kat. 3.7,e). Auch das Vorhandensein von Wüstit ordnet sie eher dem Ausheizen und Schmieden zu. In den Einschlüssen mit glasiger Matrix haben sich auf Kosten des FeO-Gehaltes alle anderen Bestandteile angereichert.

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital zeigt vorwiegend einen kohlenstoffarmen untereutektoiden Stahl mit einem Widmannstättenschen Gefüge (C-Gehalt 0,2–0,3%, Abb. Kat. 3.7,c). Um einen Hohlraum ist eine Aufkohlung entstanden, das Metall enthält hier bis 0,8% C. In der Metallmitte befindet sich eine Zone mit grobkörnigem Ferrit, der Tertiär-Zementitadeln enthält (Abb. Kat. 3.7,d), während die Schneide feinkörnigen Ferrit mit Korngrenzenzementit aufweist.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Eisen und Stahl sind arsen- (0,7%) und molybdänreich (0,3%; Abb. Kat. 3.7,f). Der Phosphorgehalt im Metall schwankt sehr stark von 0,07 bis 0,4%. Die höchsten Gehalte weist der grobkörnige Ferrit auf.

Fazit: Schmiedeabfall aus kohlenstoffarmem, untereutektoidem Stahl mit hohem Arsen- und Molybdän-Gehalt. Die Aufkohlungen und Schwankungen im Phosphor-Gehalt erschwerten eine Verarbeitung. Als Folge davon entstanden Risse entlang der Korngrenzen, die zum Aufgeben des Objekts während der Bearbeitung führten.

3.8 Schmiedeabfall (Recycling), CHE 002/6658 CO, Sc 102, un 2, Schicht 2

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, LA-ICP-MS-Analyse und REM/EDX-Analyse.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Dreieckiger Abfall mit einer planen Oberfläche, die abgeschrotet wurde, Länge 3 cm, Gewicht 27 g, nicht konserviert (Abb. Kat. 3.8,a). Im Anschlag ist sichtbar, dass das Metall um einen zentralen Hohlraum, umgeben von wüstitreicher Schlacke, aufgerollt wurde (Abb. Kat. 3.8,b). Die gerade Oberseite ist abgeschrotet. Zahlreiche Schlackeneinschlüsse verlaufen in Schmiederichtung um den Einschluss herum. Die Schlacke besteht aus glasiger Matrix oder sehr feinen Wüstitendriten in glasiger Matrix.

Chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX): Des hohen Verhältnisses $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ wegen mag man versucht sein, das Objekt als vom Schmieden herrührend interpretieren (Abb. Kat. 3.8,e). Um eine solche Vermutung zu bestätigen, müsste man die Zusammensetzung mit einem bekannten Erz in Beziehung setzen können. Die Schlackeneinschlüsse stimmen indessen nicht mit der untersuchten Schlacke von Chevènez (Abb. 19) überein, sondern unterscheiden sich durch ihr höheres Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ und einen höheren Phosphorgehalt von jenen. Deshalb stammen sie aus einem unbekanntem Verhüttungssystem und lassen sich nicht näher beurteilen.

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital macht sichtbar, dass das Objekt vorwiegend aus Ferrit mit Phantomgefüge besteht (Abb. Kat. 3.8,c), ein für phosphorreiches Eisen typisches Gefüge. Ein Drittel des Metalls besteht aus kohlenstoffarmem, untereutektoidem Stahl mit Widmannstättenschem Gefüge (Abb. Kat. 3.8,d). Alle Oberflächen ausser der abgeschroteten sind teilweise aufgekühlt bis zu eutektoidem Stahl (C-Gehalt 0,8%).

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Das Eisen ist phosphor- (0,1%) und arsenreich (0,2%; Abb. Kat. 3.8,f). In den aufgekühlten Zonen wird nachvollziehbar, wie die Metallzusammensetzung durch das Aufkohlen jeweils verändert wird: Der Stahl verarmt bezüglich Phosphor und reichert sich dafür beim Arsen um ein Zweifaches und um ein Vierfaches bei Nickel, Cobalt und Kupfer an.

Fazit: Es handelt sich um einen Schmiedeabfall aus phosphor- und arsenreichem Eisen. Er wurde durch Aufrollen geschmiedet und in der Mitte unsauber verschlossen. Diese Art des Schmiedens ist typisch für das Recycling von Altmittel.

3.9 Ahle, CHE 002/6509 CO, Sc 23, un 11, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, Härtemessung nach Vickers, LA-ICP-MS-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Doppelspitze, unteres Ende fehlend, Länge 5 cm, Gewicht 3 g, konserviert (Abb. Kat. 3.9,a). Der ganze untere Teil wurde in Kunstharz eingebettet und an der Rückseite der Ahle angeschliffen. Das Gerät ist mehrlagig und entlang der zentralen Schweissnaht von Korrosion angegriffen (Abb. Kat. 3.9,b). Zahlreiche kleine, längs gestreckte Schlackeneinschlüsse markieren die Schweissnähte.

Mikroskopische Beobachtung: Nach der Ätzung mit Nital tritt die Mehrlagigkeit noch stärker hervor. In der Mitte befindet sich ein kohlenstoffreicher Stahl (C-Gehalt um 0,6%), der links und rechts von kohlenstoffärmeren Lagen eingefasst ist (Abb. Kat. 3.9,c). In Abb. Kat. 3.9,d sind fünf Lagen erhalten: Links ist eine Lage mit feinkörnigem, ferritischem Gefüge mit einer Härte von HV1 215, der sich nach rechts eine Lage mit Ferrit und wenig Korngrenzen-Zementit anschliesst. Daran schliesst die mittlere

Lage aus Perlit mit Ferrit entlang der Korngrenzen mit einer Härte von HV1 225 an, und ganz rechts ist Ferrit mit wenig Perlit mit einem Widmannstättenschen Gefüge und einer Härte von HV1 190 zu sehen.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Die Analysen ergaben, dass die kohlenstoffreiche Mitte und die kohlenstoffarmen Aussenschichten (Median 1) eine sehr ähnliche Zusammensetzung haben (Abb. Kat. 3.9,e). Der Stahl (Median 2) ist etwas arsenreicher (As-Gehalt 0,1%) als die Aussenschichten. Wahrscheinlich gehören Stahl und Eisen derselben Metallgruppe an. Die Zusammensetzung lässt sich der kupferreichen Metall-Gruppe von Develier-Courtételle zuordnen.

Fazit: Qualitätsreiches Werkzeug mit Stahlspitze, abgebrochen, in Sandwich-Technik gefertigt: innen Stahl und aussen Stahl mit wenig Kohlenstoff oder Eisen. Allerdings bestehen kaum Härteunterschiede zwischen den Materialien. Es handelt sich um ein jurassisches Produkt aus der Cu-Gruppe der Metallgruppe Develier-Courtételle.

3.10 Messer, CHE 002/6529 CO, Sc 102, un 11, Schicht 3a

Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, Härtemessung nach Vickers, LA-ICP-MS-Analysen.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Messerspitze, Länge 3,9 cm, Gewicht 4 g, konserviert (Abb. Kat. 3.10,a). Die Radiographie zeigt, dass grosse Teile metallisch erhalten sind. Das Metall im Anschlag enthält zahlreiche, teils grosse Schlackeneinschlüsse (Abb. Kat. 3.10,b,d). Sowohl Schlackeneinschlüsse als auch Metall sind von Korrosion angegriffen. Auf der einen Seite der Schneide ist ein Phantomgefüge sichtbar.

Mikroskopische Beobachtung: Das Ätzen mit Nital macht im Metall ein rekristallisiertes, grobkörniges Ferritgefüge mit Ätzkratern und einer Härte HV1 230 sichtbar. Ätzkrater und grosse Härte sind typisch für phosphorreiches Eisen. In der Mitte des Messers liegt die zentrale Schweissnaht (Abb. Kat. 3.10,c). Die Schneide ist seitlich aufgekühlt (Abb. Kat. 3.10,d). In jenem Bereich liegt die Härte bei HV1 325–HV1 570; die Schneide wurde also gehärtet.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Das Eisen ist sehr phosphorreich (P-Gehalt 0,7%; Abb. Kat. 3.10,e).

Fazit: Das Messer besteht aus zwei Lagen phosphorreichem Eisen. Die Schneide ist zusätzlich aufgekühlt und gehärtet. Die Fertigung ist zweckdienlich, es handelt sich um ein gutes Produkt. Es wurde in Chevènez aus lokalem Metall gefertigt.

3.11 Messer, CHE 002/6518 CO, Sc 102, un 6, Schicht 3a

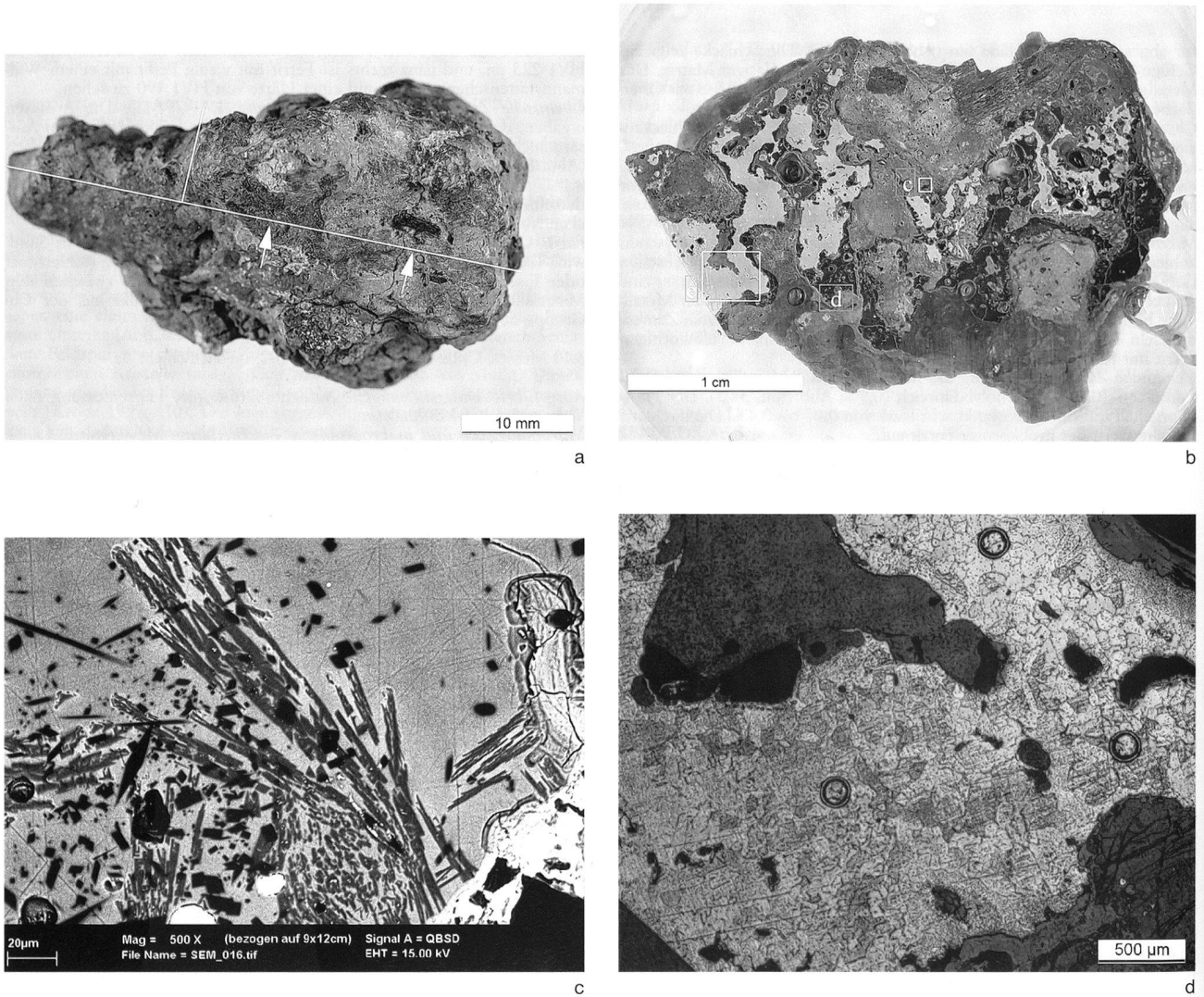
Ausgeführte Untersuchungen: Auflichtmikroskopie, Härtemessung nach Vickers, LA-ICP-MS-Analyse.

Morphologische und makroskopische Beschreibung: Messer mit fehlender Spitze, Länge 9,4 cm, Gewicht 14 g, konserviert (Abb. Kat. 3.11,a). Die Radiographie zeigt, dass das Stück aus drei Teilen verschweisst ist. Zur Spitze hin ist das Metall vollständig korrodiert. Im Anschlag zeichnen sich im Querschnitt zahlreiche Schlackenzeilen aus gelängten Schlackeneinschlüssen ab, welche Schweissnähte markieren (Abb. Kat. 3.11,b). Im Gefüge der Schlacke ist v.a. Wüstit in glasiger Matrix zu erkennen.

Mikroskopische Beobachtung: Das mit Nital geätzte Metall besteht in grossen Teilen des Messers aus rekristallisiertem Ferrit (Abb. Kat. 3.11,c) mit einer Härte HV1 105. Auf der rechten Seite besteht eine Deckschicht aus Ferrit mit Perlit bzw. untereutektoidem Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt um 0,4% und einer Härte von HV1 230. Die angeschweisste Schneide weist ein perlitisches Gefüge auf und besteht aus eutektoidem Stahl mit einer Härte von HV1 450 (Abb. Kat. 3.11,d); sie wurde also gehärtet bzw. abgeschreckt und angelassen. Der Messerkörper hat eine zentrale Schweissnaht und ist aus mindestens sechs Lagen aufgebaut. Der Drittel zur Schneide hin ist unterteilt, einerseits durch einen Korrosionsangriff, andererseits durch schräg laufende Lagen.

Chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS): Die Analysen ergaben, dass das Metall in drei der untersuchten Schichten (Median 2–4) eine sehr ähnliche Zusammensetzung hat (Abb. Kat. 3.11,e). Nur Median 1 unterscheidet sich durch seinen höheren Cobalt- und Mangan-Gehalt. Er charakterisiert den eutektoiden Stahl aus der Schneide, während die Mediane 2–4 aus verschiedenen Schichten des Messerkörpers stammen. Ihre Zusammensetzung ist so ähnlich, dass sie alle demselben Metalltyp angehören müssen.

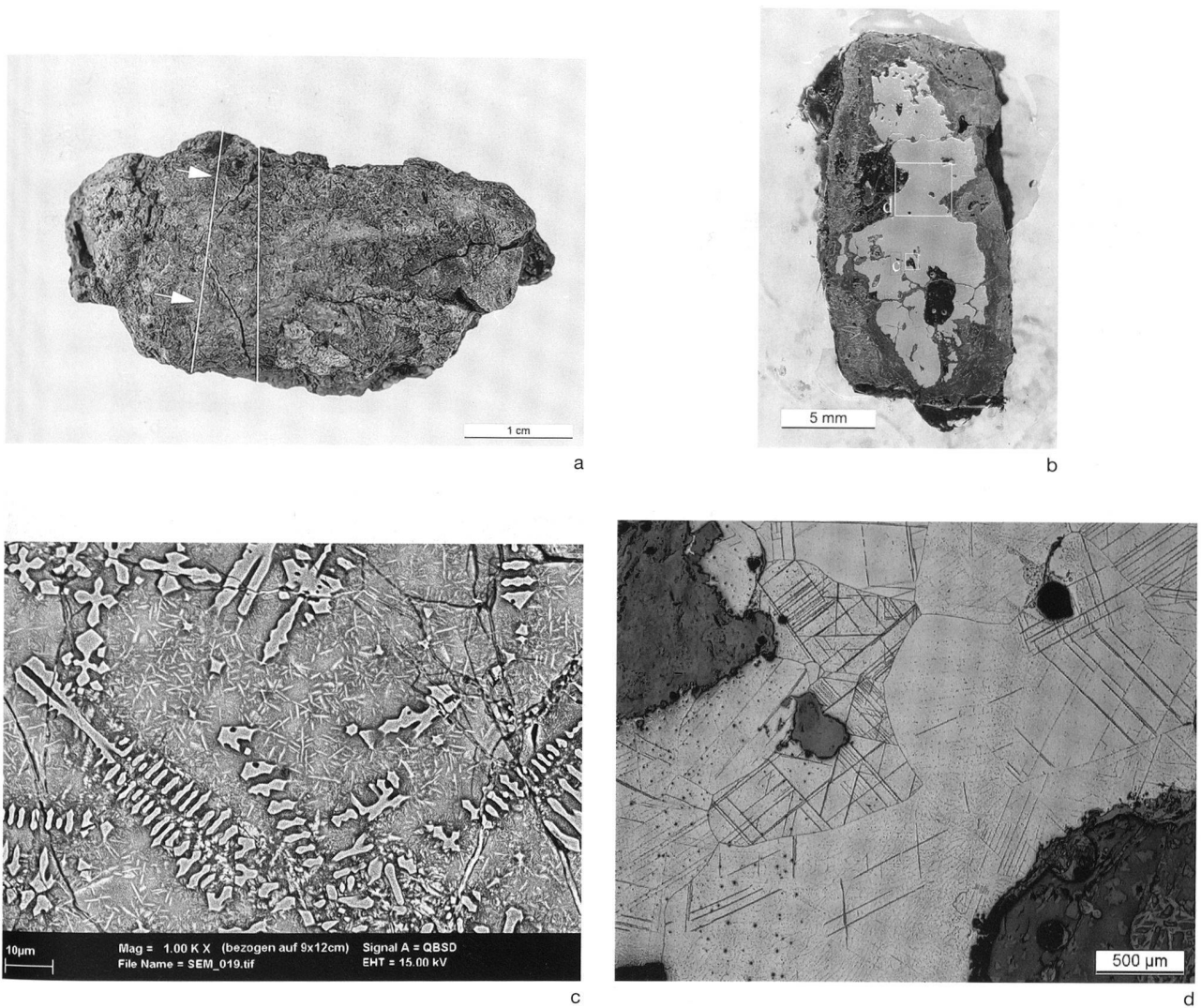
Fazit: Das Messer hat eine komplexe Fertigung in Lagendamast-Technik mit angesetzter gehärteter Stahlschneide. Es handelt sich um ein hervorragendes Produkt. Es wurde wie andere solche Messer in den jurassischen Verhüttungsbezirk importiert.



Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	V ₂ O ₅	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Fayalit in glasiger Matrix	<	17	35	<	1.6	4.7	1.2	<	<	42	2.1	3.0
unbestimmt	<	21	44	<	1.4	4	1.1	<	0.7	26	2.1	2.9
Rhomben in glasiger Matrix	<	22	48	<	1.8	4.9	1.3	<	<	21	2.2	2.8
glasige Matrix	<	20	48	<	1.5	4.4	1.4	<	<	23	2.4	3.0
Leisten in Matrix	0.6	20	47	<	1.7	6	1.4	<	<	26	2.4	3.6
Leisten und Rhomben in glasiger Matrix	<	29	52	<	1.6	6.3	1.6	<	0.6	12	1.8	3.9
Mittelwert	<	21	46	<	1.6	5.0	1.3	<	<	var	2.2	3.2
Leiste	<	30	54	<	1.3	15	<	<	<	1.4	1.8	11
Leiste	<	31	51	<	1.3	15	<	<	<	2	1.6	12
Rhombe	<	73	28	<	<	<	<	<	3.7	1.3	0.4	-
Rhombe	<	67	29	<	<	<	0.7	<	2.5	1.3	0.4	-

mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median	1.4	<	<	40	<	<	1500	30	40	30	<	<	<	<	<	5
% RSD	9	-	-	69	-	-	14	25	21	15	-	-	-	-	-	17
NWG		31	77	27	157	10	200	5	15	28	54	6	3	4	2	3

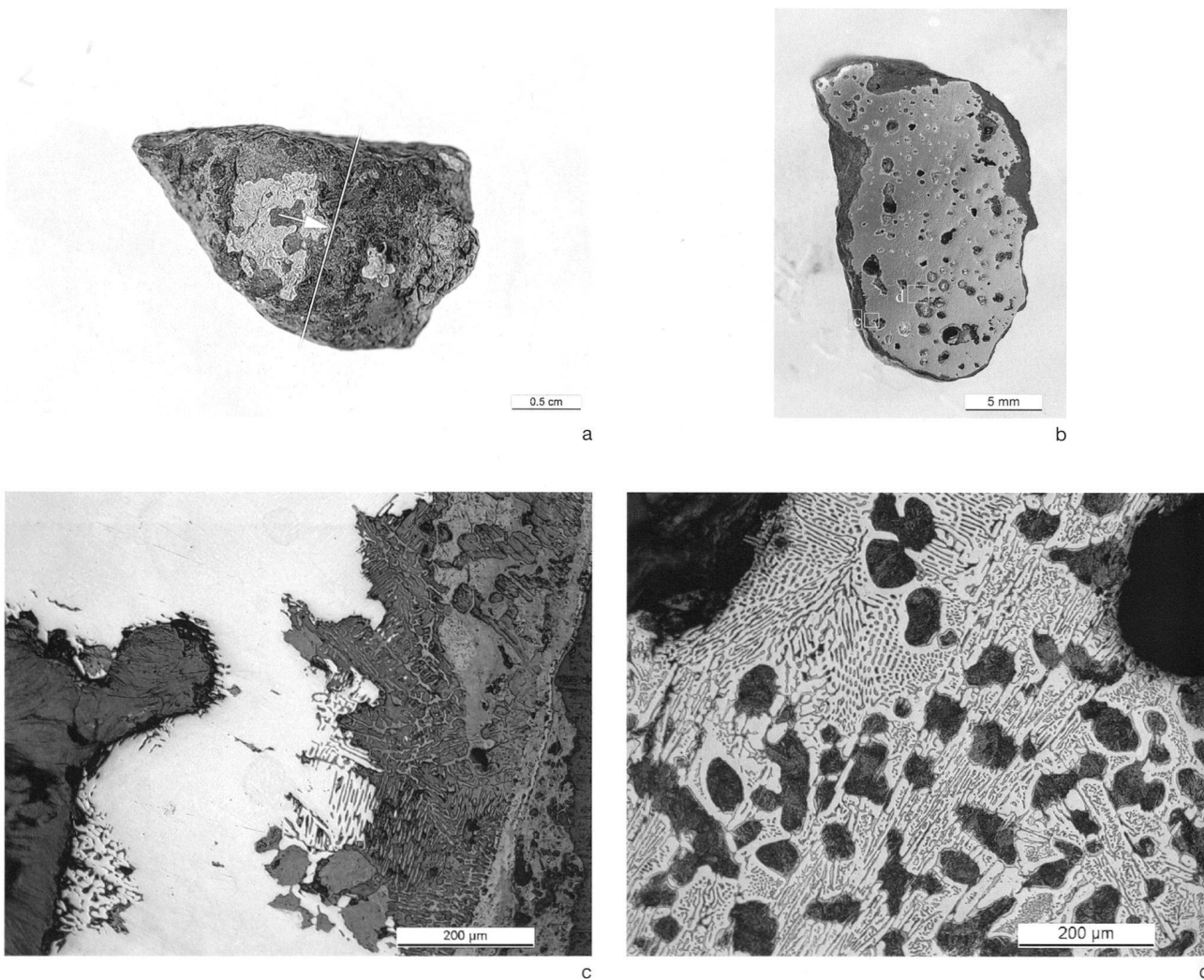
Abb. Kat. 3.1. Eisenreiche Schlacke aus Chevenez-Lai Coiratte. a Probenentnahmestelle; b Anschliff, hell Metall, schwarz Schlacke, grau Korrosionsprodukte; c REM-Bild, BSD-mode. Leisten (dunkelgrau) und idiomorphe Kristalle (schwarz) in glasiger Matrix; weiss Metall. Regionen mit schweren Elementen (z.B. Fe) erscheinen hell, solche mit leichten dunkel (z.B. Al); d Ferrit mit wenig Korngrenzenzementit; e chemische Zusammensetzung der Schlacke und einzelner Minerale (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	V ₂ O ₅	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Spinelle in glasiger Matrix	<	23	39	<	0.8	1.7	1.4	<	<	35	1.7	2.1
	<	17	44	1.3	1.1	1.8	1.6	<	<	36	2.7	1.8
Spinelle und Nadeln in glasiger Matrix	<	20	41	0.7	0.8	1.8	1.8	<	<	38	2.0	2.2
	<	16	46	0.9	1.1	1.9	1.7	<	<	35	2.9	1.8
	<	18	45	1.2	1.0	2.1	1.6	<	<	36	2.5	2.2
Mittelwert	<	19	43	1.0	1.0	1.9	1.6	<	<	36	2.4	2.0
Spinell	0.7	54	<	<	<	<	<	<	2.3	40	-	-
Spinell	<	55	<	<	<	<	<	<	1.2	42	-	-
Spinell	<	56	0.7	<	<	<	1.0	<	<	43	-	-

mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median	1.7	<	<	<	<	<	5000	390	690	230	560	40	<	20	30	10
% RSD	3	-	-	-	-	-	11	2	3	2	8	4	-	9	7	12
NWG		11	31	10	70	6	131	3	250	20	23	5	2	2	2	1

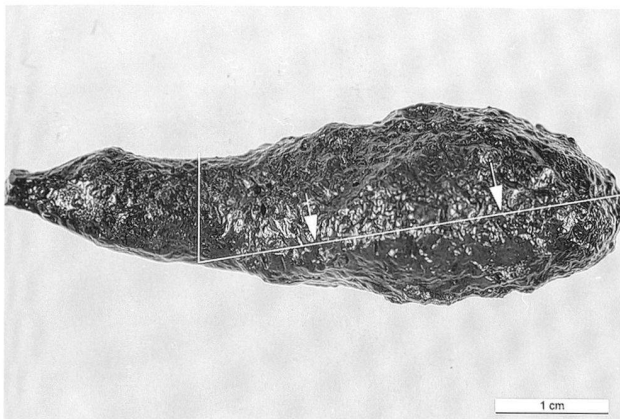
Abb. Kat. 3.2. Eisenschwamm aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisation der Probenentnahmestelle; b Anschliff, hell Metall, dunkelgrau Schlacke, hellgrau Korrosionsprodukte; c REM-Bild, BSD-mode. Dendriten (Hercynit) und feine Nadeln (unbestimmt) in glasiger Matrix; d Ferrit mit Neumannschen Bändern, umgeben von Schlacke und Korrosionsprodukten; e chemische Zusammensetzung der Schlacke und einzelner Minerale (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



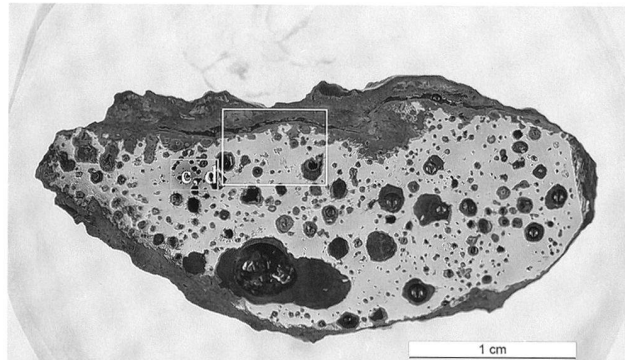
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median	1.1	<	<	<	<	<	400	50	60	30	30	<	<	10	<	<
% RSD	15	-	-	-	-	-	39	10	5	9	35	-	-	26	-	-
NWG		13	42	8	53	6	111	3	8	17	21	4	2	2	3	1

e

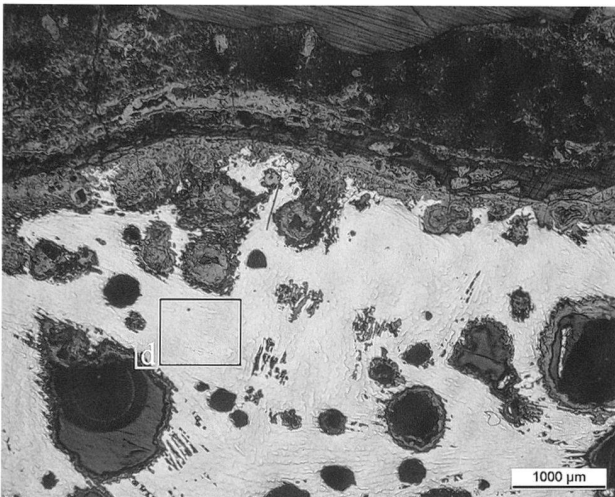
Abb. Kat. 3.3. Gusslauf aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisation der Probenentnahmestelle; b Anschlag, hell Metall; c Metall mit selektiver Korrosion (grau) des Ledeburits am Übergang Metall-Korrosionsprodukte; d weisses Gusseisen: Ledeburit (weiss) und Perlit (dunkel); e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



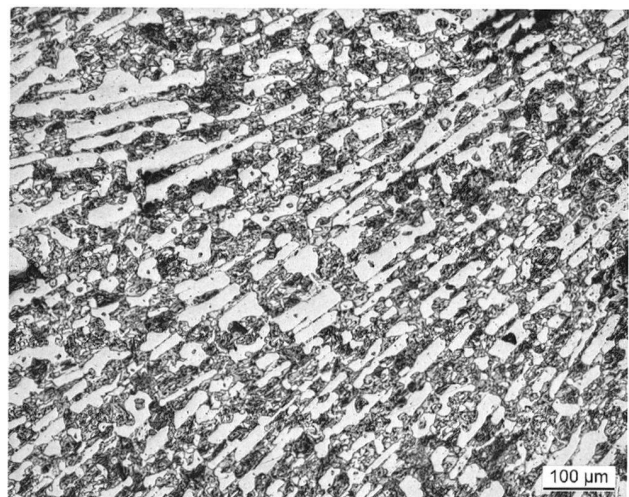
a



b



c

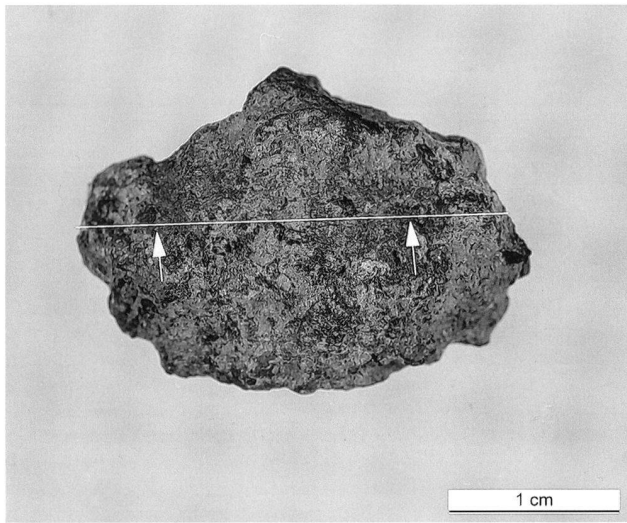


d

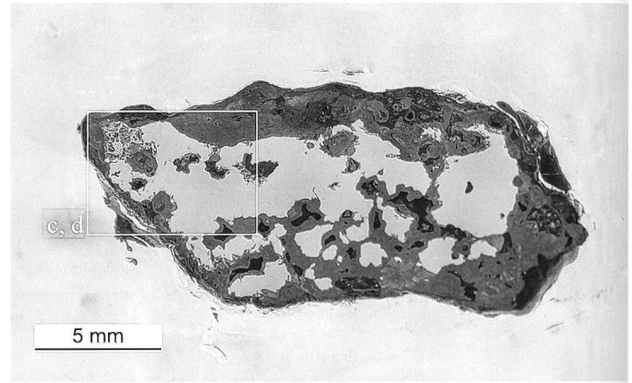
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median	1.4	<	<	<	<	<	8000	530	750	180	780	50	<	6	20	5
% RSD	6	-	-	-	-	-	10	2	7	3	10	14	-	20	12	11
NWG		53	93	35	220	14	223	6	21	35	61	8	3	4	2	3

e

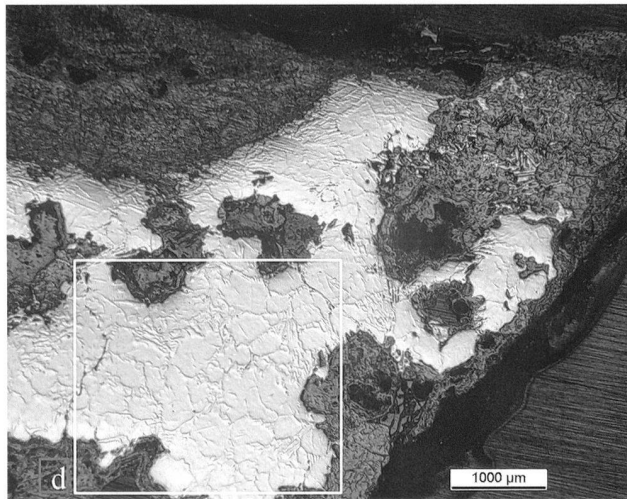
Abb. Kat. 3.4. Gusslauf aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschlag, hell Metall; c Metall mit Relief, das dem Ledeburit folgt, und Poren, deren Ränder von Korrosion angegriffen sind. Rechteck Abb. Kat. 3.4d; d weisses Gusseisen, Ledeburit (weiss) und Perlit (dunkel); e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



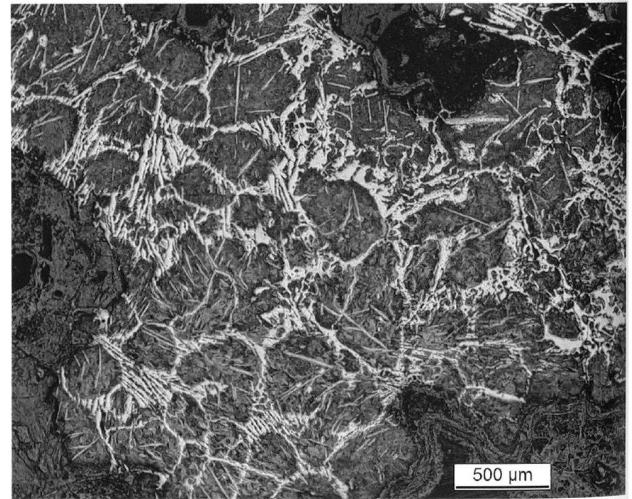
a



b



c



d

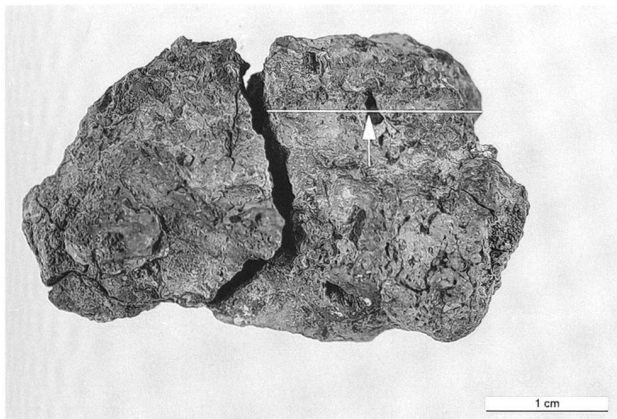
Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
glasige Matrix	1.1	13	54	<	1.9	23	0.8	<	5.3	4.0	12
	1.3	13	51	0.6	1.8	25	<	<	6.3	3.9	14
	1.6	12	60	<	1.7	25	0.8	<	0.9	4.8	15
	1.5	12	58	<	1.8	24	0.8	<	0.8	4.7	14
	1.4	13	56	<	1.8	24	0.8	<	3.3	4.1	14

e

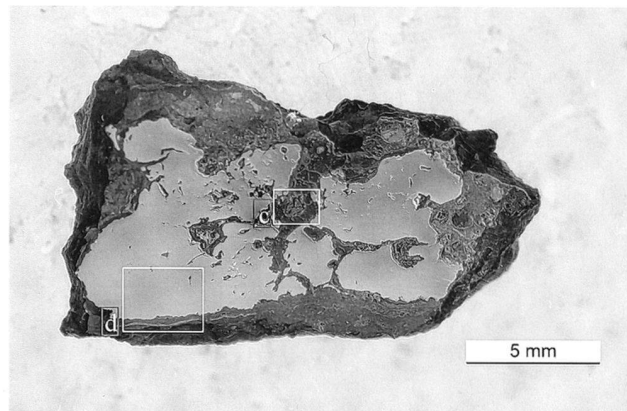
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	P	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median 1, Ledeburit	6.9	<	<	300	<	6000	80	355	2460	60	5000	600	<	<	40	<
Median 2, Stahl	6.9	<	<	100	<	1300	50	340	2400	60	3300	330	<	<	20	<
% RSD 1	0.5	-	-	16	-	26	7	0.2	0.3	8	15	13	-	-	13	-
% RSD 2	2	-	-	27	-	18	11	3	5	9	7	2	-	-	14	-
NWG		51	70	22	148	154	13	6	18	34	47	5	4	3	3	2

f

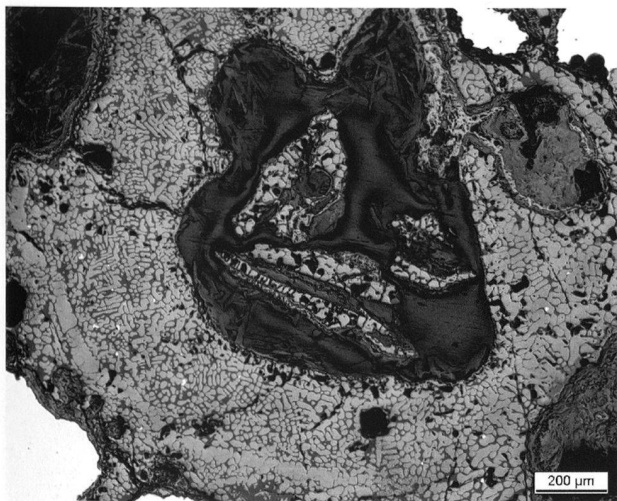
Abb. Kat. 3.5. Eisenschwamm aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschliff, hell Metall, dunkel Korrosionsprodukte; c Ledeburit-Netz, als Netz im Metall zu erkennen. Die Oberfläche ist korrodiert (grau), das Rechteck markiert Abb. Kat. 3.5d; d weisses Gusseisen mit einem Gefüge aus Ledeburit (weiss), Perlit (dunkel) und Sekundärzementitnadeln (weiss); e chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



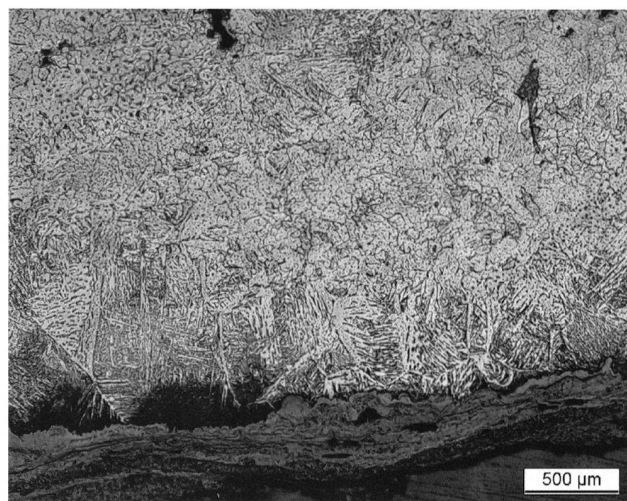
a



b



c



d

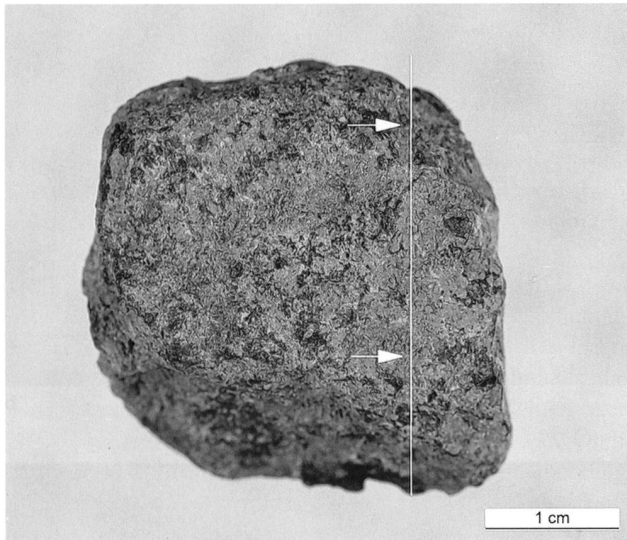
Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Wüstit in glasiger Matrix	<	4.1	12	0.7	0.8	1.7	<	<	83	2.9	2.0
	<	4.6	13	0.7	0.7	1.5	<	<	83	2.9	2.4
	<	5.8	23	1.2	1.3	2.7	<	<	65	4.0	2.1
	<	5.7	18	0.7	1.2	2.5	<	<	67	3.2	2.1
	<	5.0	18	0.9	1.1	2.7	<	<	69	3.7	2.4
Mittelwert	<	5.0	17	0.8	1.0	2.2	<	<	73	3.3	2.2

e

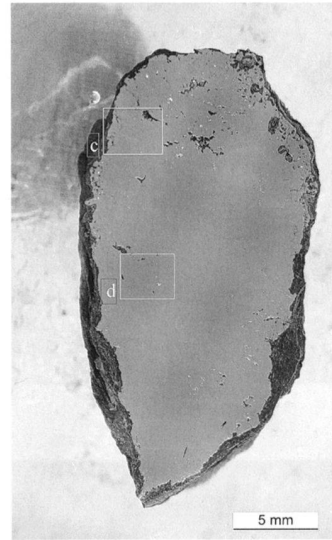
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median	2.1	<	<	80	<	<	1200	120	250	60	240	30	<	<	<	<
% RSD	7	-	-	18	-	-	15	5	8	14	16	2	-	-	-	-
NWG		57	97	31	202	13	192	7	21	40	70	8	4	4	2	4

f

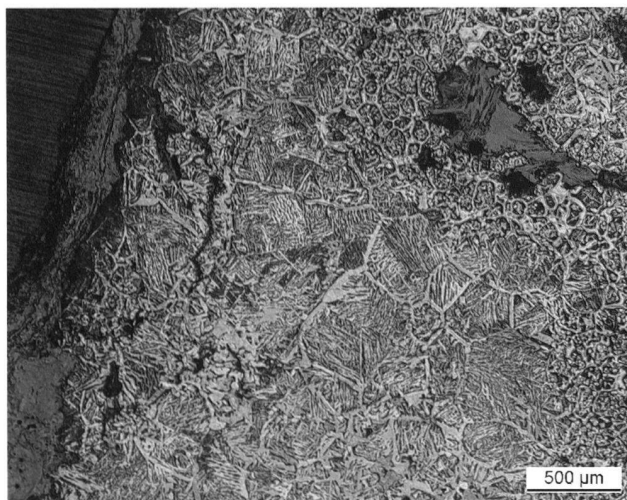
Abb. Kat. 3.6. Ausheizabfall aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschliff, hellgrau Metall, dunkelgrau Schlacke und Korrosionsprodukte; c Schlackeneinschluss mit einem Gefüge aus Wüstit in Form von Dendriten und Lamellen; d untereutektoider Stahl mit einem Widmannstättenschen Gefüge, lokal aufgekohlte Oberfläche; e chemische Zusammensetzung der Schlacke (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



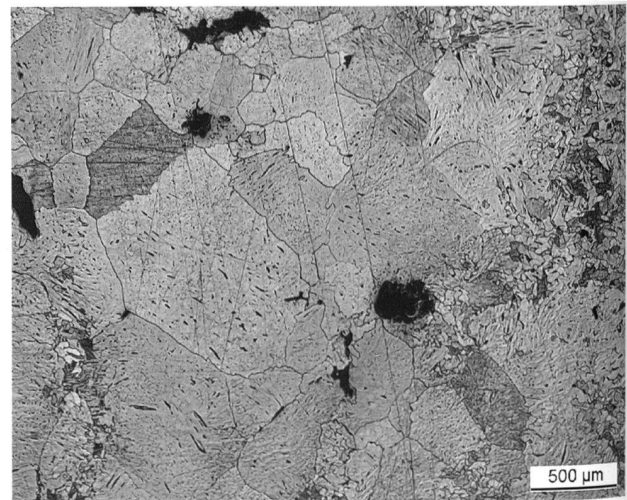
a



b



c



d

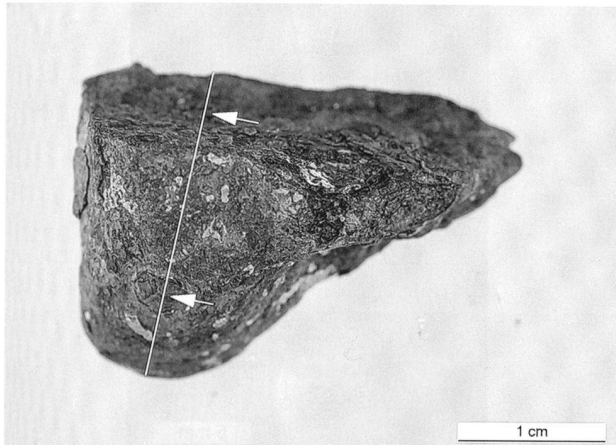
Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Wüstit in glasiger Matrix	0.6	7.0	28	3.2	2.0	5.5	<	<	56	4.0	2.8
	0.6	8.1	33	2.6	2.0	5.9	0.6	<	50	4.1	2.9
glasige Matrix	1.3	15	63	<	3.6	13	1.0	<	6.5	4.2	3.4
	1.3	14	60	<	3.6	14	0.9	<	8.5	4.2	3.9
	1.3	16	63	<	3.9	10	0.9	<	3.6	3.9	2.7
	1.3	14	56	<	5.1	15	0.7	<	6.9	4.0	2.9
Mittelwert	1.1	13	var	<	3.7	11	0.7	<	var	4.1	3.1

e

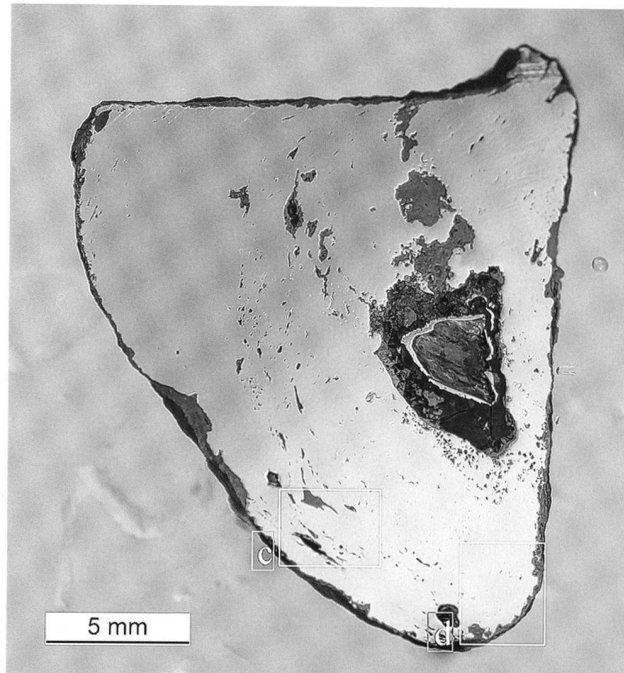
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median, Eisen und Stahl	4.3	<	<	<	<	<	1000	220	940	160	7000	2900	<	<	20	<
% RSD	5	-	-	-	-	-	91	5	5	10	26	14	-	-	31	-
NWG		63	106	34	238	15	223	9	28	42	1	9	4	6	3	4

f

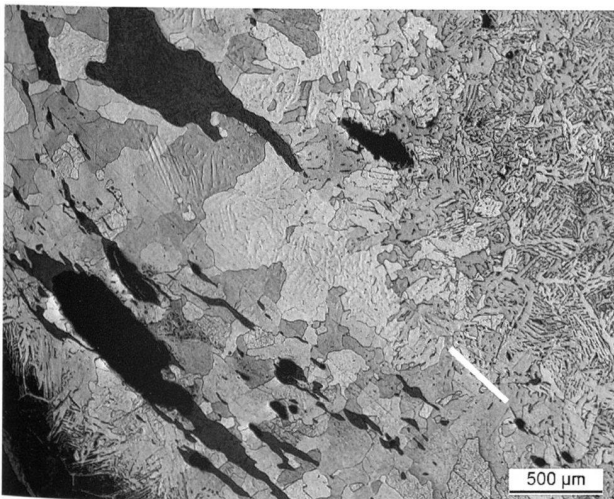
Abb. Kat. 3.7. Schmiedeaabfall aus Chevezey-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschliff, hell Metall, markiert die folgenden Abbildungen; c untereutektoider Stahl mit einem Widmannstättenischen Gefüge; d grobkörniger Ferrit mit Tertiär-Zementitnadeln; e chemische Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



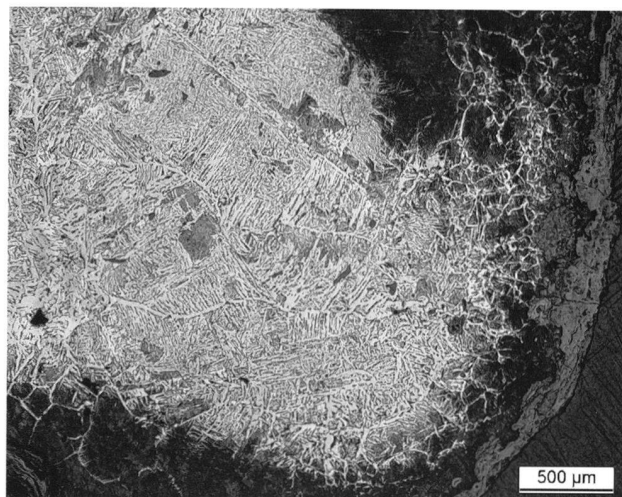
a



b



c



d

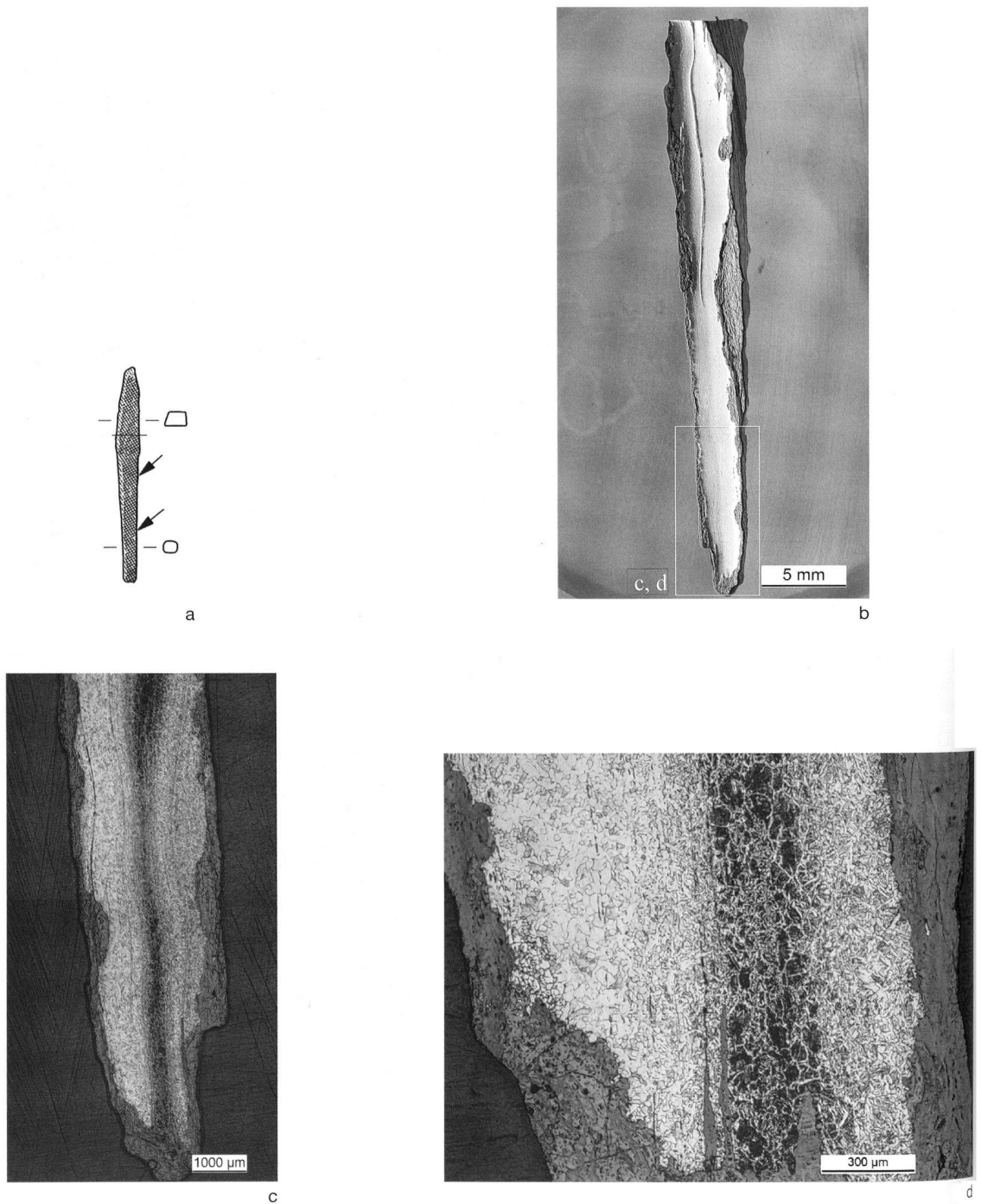
Massen%	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO/K ₂ O
Wüstit in glasiger Matrix	1	4.3	33	<	2.1	4.5	<	<	58	7.6	2.1
	0.8	4.9	32	0.9	2.2	4.5	<	<	60	6.5	2.1
	0.9	4.6	33	0.8	2.4	4.5	<	<	58	7.1	1.9
	<	1.4	11	0.9	0.7	1.3	<	<	91	7.8	2.0
Matrix	1.0	5.7	35	1.1	2.8	7.0	<	<	53	6.2	2.5
	1	6.2	39	1.4	3.7	6.7	0.7	<	37	6.4	1.8
Mittelwert	0.9	4.5	var	1.0	2.3	4.7	<	<	var	6.9	2.1

e

mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median 1, aufgekohlte Partie	2.2	<	<	<	<	<	210	900	1600	150	3600	40	<	<	6	<
Median 2, Eisen	1.6	<	<	<	<	<	1300	250	390	40	1800	20	<	<	4	<
% RSD 1	11	-	-	-	-	-	8	23	21	39	17	19	-	-	6	-
% RSD 2	6	-	-	-	-	-	7	13	11	13	22	12	-	-	18	-
NWG.		37	74	25	168	11	206	5	16	26	57	5	3	4	2	3

f

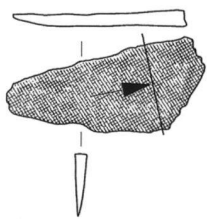
Abb. Kat. 3.8. Schmiedeabfall aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschlag, hell Metall; mit Ort der Detailaufnahmen; c Ferrit mit Phantomgefüge in der Mitte, unten aufgekohlte Oberfläche, rechts Widmannstädtensches Gefüge; d Widmannstädtensches Gefüge und aufgekohlte Oberfläche (Perlit); e chemische Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse (REM/EDX-Analysen); f chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen).



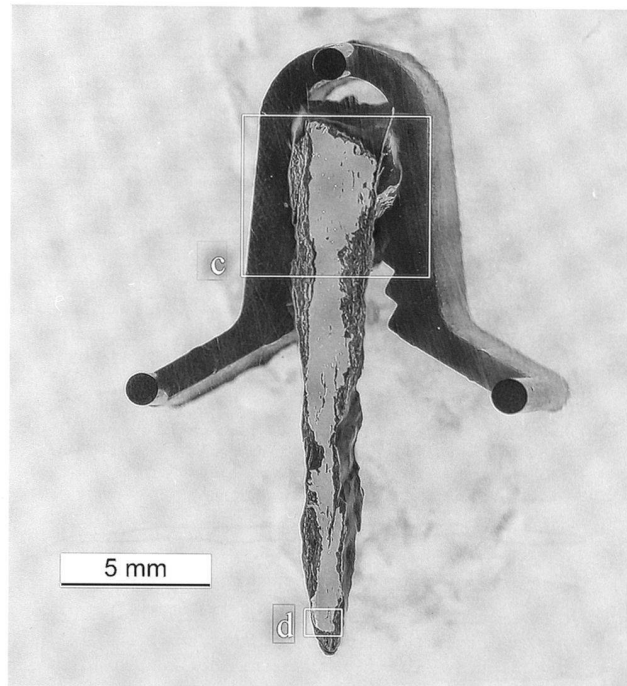
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median 1, Eisen	2.9	50	<	<	<	<	600	300	900	330	700	150	<	20	30	4
Median 2, Stahl	3.1	50	<	<	<	<	500	260	800	350	1100	160	<	20	50	3
% RSD 1	3	48	-	-	-	-	40	6	9	7	11	6	-	25	26	25
% RSD 2	4	42	-	-	-	-	29	13	18	11	24	7	-	3	18	13
NWG		20	39	10	14	6	118	4	267	22	24	7	2	1	2	1

e

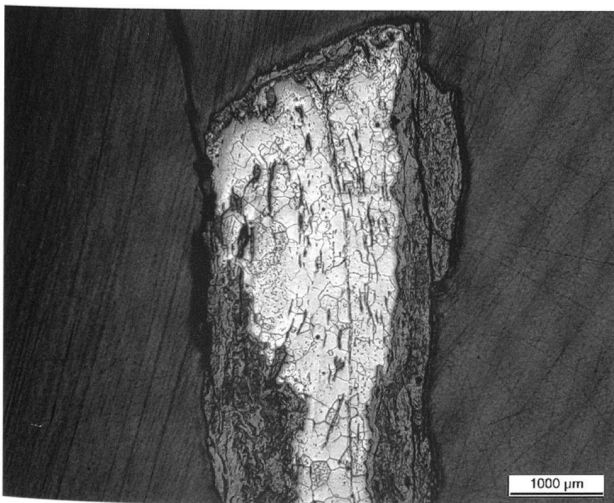
Abb. 3.9. Ahle aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschliff. Übersicht ungeätzt; weiss Metall; c kohlenstoffarme Schichten umgeben die kohlenstoffreiche Mittelschicht; d kleine Ferritkörner links, in der Mitte Perlit mit Ferrit entlang der Korngrenzen, rechts Widmannstättenches Gefüge; e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen). Zeichnung Office de la culture, Section d'archéologie et paléontologie Porrentruy (a).



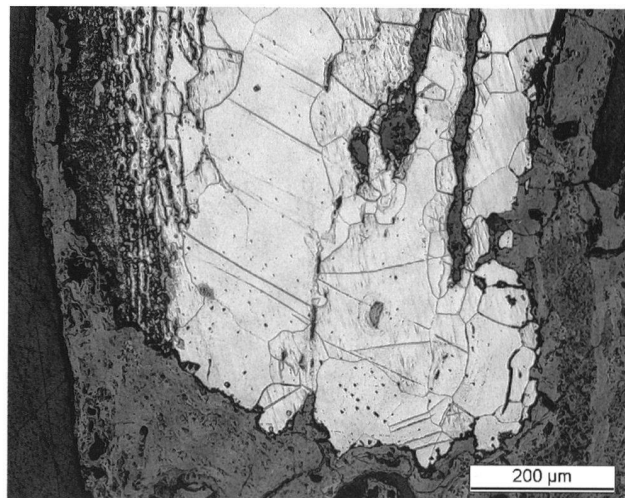
a



b



c

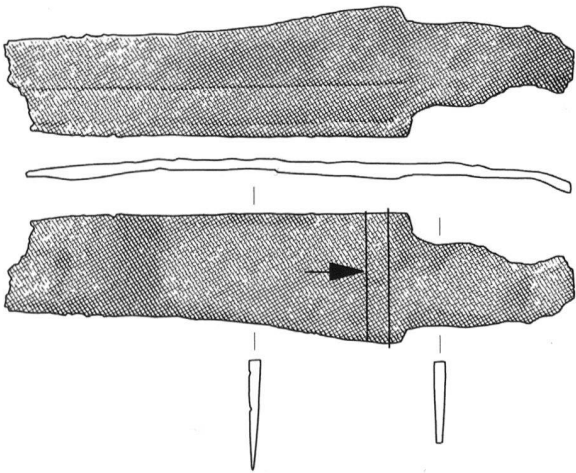


d

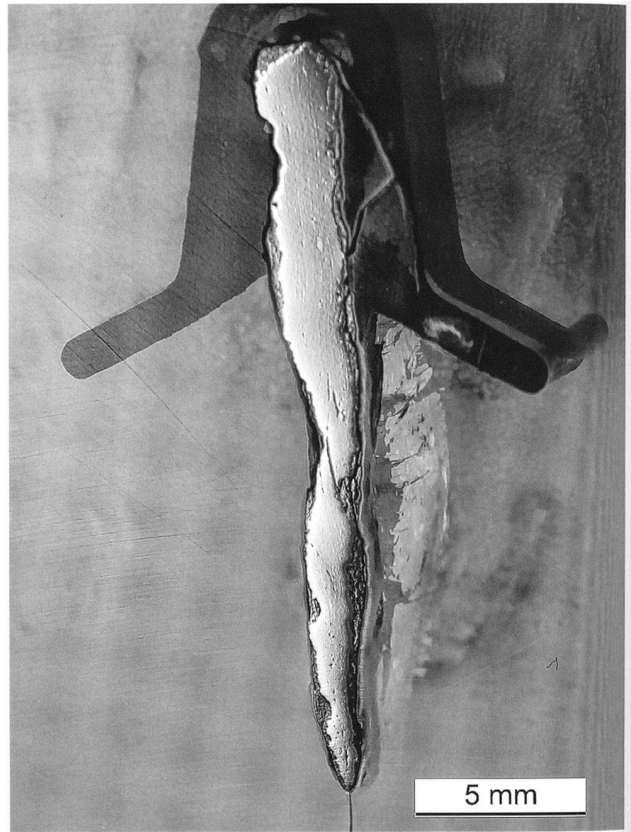
mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median	2.2	<	<	<	<	7	7000	180	390	50	130	20	<	7	3	7
% RSD	9	-	-	-	-	67	15	8	6	17	6	11	-	14	14	21
NWG	-	20	41	11	14	6	107	3	195	21	24	6	3	2	2	1

e

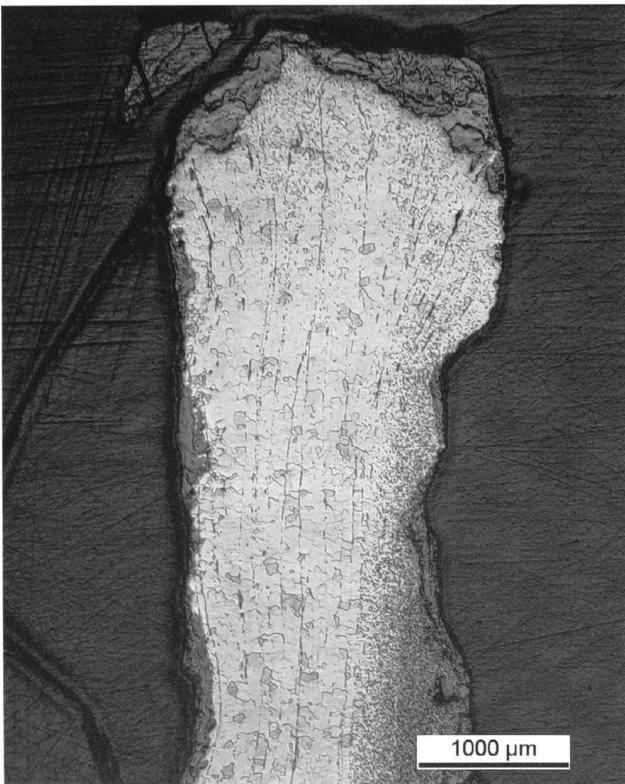
Abb. 3.10. Messer aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisierung der Probenentnahmestelle; b Anschliff, hell Metall; c Messerrücken aus Ferrit mit Mittelschweissnaht; d Schneide mit grobem Ferrit mit Neumannschen Bändern und Ätzkratern, links aufgekohlte Partie, alles umgeben von Korrosionsprodukten; e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen). Zeichnung Office de la culture, Section d'archéologie et paléontologie Porrentruy (a).



a



b



c



d

mg/kg	Ni/Co	Al	Ti	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	W
Median 1, Stahl Schneide	0.6	<	<	<	<	50	<	900	500	40	40	<	<	6	<	<
Median 2, Eisen	1.0	<	<	<	<	<	300	580	500	60	50	<	<	8	<	<
Median 3, Eisen	1.2	<	<	<	<	<	400	600	800	70	60	<	<	8	<	<
Median 4, Stahl	1.0	120	<	<	<	20	500	500	500	60	70	<	<	7	<	<
% RSD 1	15	-	-	-	-	51	-	16	19	26	38	-	-	13	-	-
% RSD 2	10	-	-	-	-	-	15	8	17	19	22	-	-	15	-	-
% RSD 3	19	-	-	-	-	-	34	29	45	27	49	-	-	9	-	-
% RSD 4	3	74	-	-	-	47	20	19	16	14	34	-	-	25	-	-
NWG		29	59	18	21	10	199	6	430	30	36	11	5	3	3	3

e

Abb. 3.11. Messer aus Chevenez-Lai Coiratte. a Lokalisation der Probenentnahmestelle; b Anschliff, weiss Metall; c Messerrücken, mit Nital geätzt, rekristallisierter Ferrit und rechts am Rand Ferrit mit Perlit; grau Korrosionsprodukte; d angesetzte Schneide aus eutektoidem Stahl; e chemische Zusammensetzung des Metalls (LA-ICP-MS-Analysen). Zeichnung Office de la culture, Section d'archéologie et paléontologie Porrentruy (a).

Anmerkungen

- Ein inhaltlich vergleichbarer, gekürzter Artikel ist auf Französisch in den Actes 2012 de la Société jurassienne d'Emulation, erschienen (Senn/Eschenlohr 2012).
- spezifische Informationen zu jedem Fundplatz s. die erwähnten Publikationen.
- Der Fundplatz wurde mit einer mehrere Meter mächtigen Autobahn-aushubdeponie überdeckt. Heute ist die ursprüngliche Topografie im Gelände nicht mehr erkennbar.
- Aus heutiger Sicht dürfte diese Schätzung um einiges zu hoch sein.
- Dies umso mehr, als von den 18 publizierten Individuen, die zu 50% oder mehr erhalten sind, 4 Stücke (22%) für eine Nachuntersuchung nicht verfügbar waren und 4 andere im Laufe der letzten zwanzig Jahre unter den gegebenen Erhaltungsbedingungen zersprungen sind.
- Die (relative) Dichte stellt hier das Verhältnis zwischen der volumenbezogenen Masse einer Kalotte und volumenbezogenen Masse einer Referenz, des Wassers, dar. Die Dichte von Wasser ist 1, ein Objekt, das eine Dichte unter 1 aufweist, schwimmt darauf, geht es unter, ist seine Dichte grösser als 1 ist. Die Berechnung der Dichte erfolgt, indem das Trockengewicht durch die Differenz zwischen Trocken- und Nassgewicht geteilt wird.
- Die Dichte dreier der fünf grössten Schlackenflüsse konnte nicht bestimmt werden: Kat. 403 wurde 1990 für Analyse Zwecke zerstört, Kat. 414 ist nicht verfügbar und Kat. 404 zurzeit unauffindbar.
- Die morpho-typologische Zuweisung erfolgte unabhängig von den gemessenen Dichten.
- Da eine vollständige, erneute Aufnahme der FlieSSschlacken nach den Kriterien, die heute angewendet werden, nicht mehr möglich ist, muss dahin gestellt bleiben, ob ein Teil der Mischformen \pm SGP und \pm SGD oder dem Typ gelb-intermediäre Schlacke zuzuweisen wäre.
- Das sind ca. 91% des Gesamtkorpus. Sechs Kalotten konnten nicht mehr gemessen werden, da sie zersprungen sind. Die schwerste Kalotte war für das Messen im verwendeten System zu gross, und dreizehn weitere waren in der für diese Untersuchung gegebenen Zeit nicht mehr verfügbar.
- Die Messungen der porösen Stücke finden sich im Katalog Evéquois et al. 2012. Die Objektgruppe war bereits archiviert, das verwendete System liess sich nicht erweitern. Die Probe der dichten Schlacken wurde von fünf auf zwanzig Stücke ergänzt.

Bibliografie

- CAJ Cahier d'archéologie jurassienne
- Anderson, T./Agustoni, C./Duvauchelle, A. et al. (2003) Des artisans à la campagne. Carrière de meules, forge et voie gallo-romaine à Châbles (FR). Archéologie Fribourgeoise/Freiburger Archäologie 19. Fribourg.
- Buchwald, V./Wivel, H. (1998) Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. Materials Characterization 40, 73-96.
- Buchwald, V.F. (2001) Ancient Iron and Slags in Greenland. Meddelelser om Grønland. Man and Society 26. Copenhagen.
- Deslex, C. (2013) Courtedoux-Creugenat. Un hameau du Haut Moyen Age en Ajoie. CAJ 33. Porrentruy.
- Devos, W./Senn-Luder, M./Moor, Ch./Salter, Ch. (2000) Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for Spatially resolved trace analysis of early-medieval iron finds. Fresenius, Journal of Analytical Chemistry 366, 873-880.
- Dillmann, P./L'Héritier, M. (2007) Slag inclusions analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. Journal of Archaeological Science 34, 1810-1823.
- Eschenlohr, L. (2001) Recherches archéologiques sur le district sidérurgique du Jura central suisse. CAR 88. Lausanne.
- Eschenlohr, L. (2012a) Un atelier de sidérurgistes: le bas fourneau de Lajoux, Envers des Combes (JU), fouilles 2006 à 2008. Actes de la société jurassienne d'émulation 2011, 123-152.
- Eschenlohr, L. (2012b) Beurteilung der Schlacken. In: U. Jecklin-Tischhauser/L. Frascoli/M. Janosa et al., Die Burg und die Herren von Marmels - Burgenforschung im bündnerischen Oberhalbstein. Schweizer Beiträge zur Kulturgeschichte und Archäologie des Mittelalters 40, 195-200. Basel.
- Eschenlohr, L. (im Druck) C. Schucany/I. Winet, Cham-Hagendorn (Kanton Zug). Schmiede - Heiligtum - Wassermühle - Schmiede. Ein Ort mit wechselvoller Geschichte römischer Zeit am Wasser. Antiqua. Basel.
- Eschenlohr, L./Friedli, V./Robert-Charrue Linder, C. et al. (2007) Develier-Courtételle, un habitat rural mérovingien. 2, Métallurgie du fer et mobilier métallique. CAJ 14. Porrentruy.
- Eschenlohr, L./Senn, M. (2012) L'ancienne industrie du fer dans le Jura: des ateliers du Haut Moyen Age. Approche complémentaire aux études de Boécourt-Les Boulies, Develier-Courtételle, Chevenez-Lai Coiratte et Courtedoux-Creugenat. Actes 2012 de la Société jurassienne d'Emulation, 161-204.
- Eschenlohr, L./Serneels, V. (1991) Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU, Suisse). CAJ 3. Porrentruy.
- Evéquois, E./Eschenlohr, L./Deslex, C. et al. (2012) Occupations du Haut Moyen Age à Chevenez: Inhumations et atelier métallurgique. Les sites de Lai Coiratte, Combe Varu et Combe En Vaillard. CAJ 27. Porrentruy.
- Kronz, A. (1997) Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen - Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken. Dissertation der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz. Friedland.
- Kronz, A. (2007) Archäometallurgische Untersuchungen an Eisenfunden und Schlacken der Schnippenburg und Erzen aus der Umgebung. In: S. Möllers, Die Schnippenburg bei Ostercappeln, Lkr. Osnabrück. Ein Zentralort mit Kultplatzfunktion im nordwestlichen Ausläufer der Mittelsgebirgszone? In: S. Möllers/W. Schlüter/S. Sievers (Hrsg.) Keltische Einflüsse im nördlichen Mitteleuropa während der mittleren und jüngeren vorrömischen Eisenzeit. Kolloquien zur Ur- und Frühgeschichte Band 9, 2-45. Bonn.

- Pelet, P.-L. (1973)* Une industrie méconnue. Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. Bibliothèque Historique Vaudoise 49. Lausanne.
- Pelet, P.-L. (1993)* Une industrie reconnue: Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. CAR 60. Lausanne.
- Schwab, R./Senn, M. (2008)* Recycling von Alteisen. Berliner Beiträge zur Archäometrie 21, 207-226.
- Senn Bischofberger, M. (2005)* Das Schmiedehandwerk im nordalpinen Raum von der Eisenzeit bis ins frühe Mittelalter. Internationale Archäologie: Naturwissenschaft und Technologie Bd. 5. Rahden/Westf.
- Senn, M./Schreyer S./Serneels, V. (in Vorb.)* An urban fine smithing quarter in the oppidum of Rheinau (canton Zurich, Switzerland). In: E. Pernicka/R. Schwab (eds.) Under the volcano. Proceedings of the International Symposium on the Metallurgy of the European Iron Age held in Mannheim, Germany, 20-22 April 2010. Forschungen zur Archäometrie und Altertumswissenschaft 5. Rahden/Westf.
- Serneels, V. (1993)* Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. CAR 61. Lausanne.
- Serneels, V. (2002)* Analyses chimiques des matières premières et des produits de l'opération de réduction dans le four basque d'Agorregi. In: M. Urteaga, La ferreria y los molinos de Agorregi II. [Arkeologia] 3. Arqueologia experimental, 93-119.
- Serneels, V./Perret, P. (2003)* Quantification of smithing activities based on the investigation of slag and other material remains. In: Archaeometallurgy in Europe. Proceedings of the International Conference Milan 24-25-26 September 2003, Vol. 1, 469-478. Milano.
- Slag Atlas (1995)* 2nd Edition. Ed. by Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh). Düsseldorf.