



## Die mittelalterliche Eisengewinnung im Füssener Land (Ostallgäu und Außerfern): Neue Ergebnisse zum Abbau und zur Verhüttung der Eisenerze aus dem Wettersteinkalk

ROBERT SCHÖNER\*), HERBERT SCHOLZ\*\*) & HANS KRUMM\*\*\*)

21 Abbildungen, 3 Tabellen

Österreichische Karte 1 : 50.000  
Blätter 84, 85, 86

Bayern  
Tirol  
Lagerstätten  
Verhüttung  
Montangeschichte

### Inhalt

Zusammenfassung .....	193
Abstract .....	194
1. Einleitung .....	194
2. Methodik .....	195
3. Historisches zum Eisenerzabbau und zur Eisenverhüttung im Füssener Land und im Außerfern .....	196
4. Ergebnisse und Diskussion .....	197
4.1. Die Rohstoffe .....	197
4.1.1. Die Eisenerze im Wettersteinkalk .....	197
4.1.2. Kommen auch andere Eisenerze als Rohstoffe in Frage? .....	199
4.2. Die Eisenverhüttung .....	202
4.2.1. Die Schlackenplätze .....	202
4.2.2. Die Ausbildung der Verhüttungsprodukte .....	203
4.2.3. Die mineralogische Zusammensetzung der Verhüttungsprodukte .....	205
4.2.4. Die chemische Zusammensetzung der Verhüttungsprodukte .....	208
4.2.5. Das Alter der Schlackenhalde .....	211
5. Die wichtigsten Überlegungen zur Füssener Eisengewinnung .....	211
5.1. Überlegungen zum Erzabbau .....	211
5.2. Überlegungen zur Eisenverhüttung .....	213
6. Schlussfolgerungen .....	215
Dank .....	215
Literatur .....	215

### Zusammenfassung

Seit langem sind Spuren eines historischen Eisenerzabbaues im Wettersteinkalk (Trias) der Nördlichen Kalkalpen und einer frühen Eisenverhüttung im Füssener Land und in den benachbarten Gebieten Österreichs (Außerfern) bekannt. Inzwischen kennt man zahlreiche Schlackenhalde, die insgesamt mindestens 5000 t Schlacke enthalten dürften. Schriftliche Quellen über diese wahrscheinlich mittelalterliche Metallgewinnung sind allerdings sehr spärlich. Viele und gerade die besonders großen Schlackenplätze liegen mitten im Alpenvorland und damit relativ weit von den Erzvorkommen der Füssener Berge entfernt. Daher stellte sich die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen diesen relativ kleinen kalkalpinen Erzvorkommen und den Schlacken tatsächlich nachweisbar ist und ob nicht auch andere lokale Erze verhüttet worden sind. Um das herauszufinden, wurden Verhüttungsprodukte aus vier Halden und einige Erze aus den Füssener Bergen mit mineralogischen und geochemischen Methoden untersucht.

\*) Dipl.-Geol. ROBERT SCHÖNER, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften, Lehrstuhl für Allgemeine und Historische Geologie, Burgweg 11, D 07749 Jena.

\*\*) Privatdozent Dipl.-Geol. Dr. HERBERT SCHOLZ, Technische Universität München, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, Arcisstraße 21, D 81333 München.

\*\*\*) Univ.-Professor i.R. Dipl.-Geol. Dr. HANS KRUMM, Bornweidstraße 34, D 60388 Frankfurt am Main.

Die Untersuchungen ergeben, dass in den Halden drei Materialtypen unterschieden werden können: Fließschlacken, die am häufigsten auftreten, heterogene Schlacken mit Holzkohle- und Eiseneinschlüssen sowie ein schlackenähnliches, glasig-poröses Material, das durch die Reaktion der Schmelze und der sandig-lehmigen Ofenwand entstanden ist. Die Verhüttungsprodukte stammen aus der Eisenverhüttung in einem Rennfeuerprozess. Alle untersuchten Schlackenhalde enthalten geochemisch ähnliche, eisenreiche Schlacken mit teilweise hohen Calciumgehalten. Die MnO- und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte liegen deutlich unter 1 %. Nach der chemischen Zusammensetzung der Schlacken zu urteilen wurden mit hoher Wahrscheinlichkeit nur Erze aus dem Oberen Wettersteinkalk der nahegelegenen Füssener Berge verhüttet. Die meisten Schlackenhalde befinden sich wohl deshalb im Alpenvorland, weil dort die für die Verhüttung notwendigen Holzmengen zur Verfügung standen.

Der Abbau zielte auf die oxidischen Verwitterungserze einer primär sulfidisch-karbonatischen Eisenvererzung ab, die genetisch mit den nordalpinen Blei-Zink-Erzen in Zusammenhang steht. In den Verwitterungserzen konnte neben Goethit das Auftreten von Hämatit nachgewiesen werden. Bei den in der Literatur beschriebenen „Bergbauspuren“ („Pingen“, Stollen, u. a.) handelt es sich jedoch vielfach um natürlich entstandene Karsthohlräume und Dolinen. Der Erzabbau bestand fast ausschließlich in der Gewinnung der oberflächennahen Verwitterungserze, die sehr großflächig verbreitet, heute aber weitgehend abgesammelt sind. Die Erzgewinnung wurde vermutlich mit einfachsten Mitteln von „Eigenlöhnern“ im Nebenerwerb betrieben.

Die Altersbestimmungen mit <sup>14</sup>C-Datierungen an Holzkohlestücken aus den Schlacken ergeben, dass die vier untersuchten Halden zu verschiedenen Zeiten zwischen dem 7. und dem 13. Jahrhundert entstanden sind. Für römische oder keltische Eisenverhüttung gibt es bisher keine Belege. Die Eisengewinnung scheint größtenteils im Mittelalter über einen Zeitraum von mindestens 600 Jahren betrieben worden zu sein. Der lange Zeitraum, die vielen kleinen, weit verbreiteten Schlackenplätze und die Art der Erzgewinnung sprechen für eine Eisenproduktion in überwiegend kleinem Umfang, die wohl im Wesentlichen zur Deckung des Eigenbedarfes diente.

## Medieval Mining on Iron Ores from Triassic Reef Limestones in the Füssen Region (Germany) and its Austrian Vicinity (Auserfern)

### Abstract

Traces of historical mining on iron ores occurring within Alpine Triassic reef limestones (Wettersteinkalk) and an early iron production have been known for a long time in the region of Füssen and its Austrian vicinity (Auserfern). Several slag dump sites have been found containing together at least 5000 t of slags. However, there are only very few documents on this most likely medieval metal production. Many and especially the largest slag concentrations are situated within the Alpine foreland and are therefore relatively distant from the ore occurrences within the Alpine Wettersteinkalk of the mountains near Füssen. To find out if these relatively small Alpine ore occurrences have been the only ones to be mined or if additionally other local iron ores from outside the Alpine mountains could have been used, slag samples from four different dump sites together with some iron ores from the Füssen Mountains were collected and investigated using mineralogical and geochemical methods.

Three different types of furnace products can be distinguished on the dump sites: prevalent running slags, heterogeneous slags containing some charcoal as well as inclusions of metallic iron, and a slag-like, glassy-porous material deriving from the reaction of melt and the wall of the furnace. The smelting products had been produced in a bloomery process. All investigated slag dump sites contain geochemically similar, iron rich slags with partly high Ca-contents. The MnO- and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-concentrations are well below 1 %. According to geochemical data only the Alpine iron ores within the Wettersteinkalk seem to have been used for iron production. Most slag dump sites are located in the Alpine foreland most likely due to the deficiency of significant amounts of timber close to the ore occurrences within that time.

The mining focussed on ferric iron ores formed during weathering of primary iron sulphides and carbonates that are genetically linked to the North Alpine lead-zinc-ores. The weathering ores are composed of mainly goethite together with some hematite. The traces of "mining" described in several publications often turn out to be natural karst cavities and sink holes. "Mining" did only mean collecting the widespread ferric iron ores from the surface in most cases. The ores have been gathered effectively over time, but probably not by professional miners.

Pieces of charcoal found within slags have been dated using the <sup>14</sup>C-Method. The results indicate different ages for the four dump sites which had been in use between the 7<sup>th</sup> and the 13<sup>th</sup> century. However, there is no evidence for an earlier Roman or Celtic iron smelting so far. Thus most of the iron production seems to be medieval and has continued over at least 600 years. The long time period, the many and widespread dump sites and the manner of iron ore gathering indicate a small scale iron production, mostly for the purpose of own needs.

## 1. Einleitung

In der weiteren Umgebung von Füssen im Ostallgäu sind historische Schlacken zu finden, über deren Entstehung und genaues Alter es bisher noch keine gesicherten Erkenntnisse gab. Einzelne Schlacken werden auf Wiesen, Äckern und in manchen Bachläufen gefunden oder kommen gelegentlich bei Baumaßnahmen zum Vorschein. An zahlreichen Stellen stößt man auch auf größere Schlackenkonzentrationen, bei denen es sich in einigen Fällen um weitgehend ungestörte ehemalige Halden handeln dürfte. Eine vergleichbare Häufung historischer Schlackenfunde ist am Alpennordrand sonst nicht bekannt. Schriftliche Quellen berichten von einem historischen Eisenerzabbau in den Nördlichen Kalkalpen südlich von Füssen, der mit den Schlacken in Verbindung gebracht und als Bestätigung für deren frühen Ursprung gesehen wird (siehe Kap. 3).

Vor allem in den letzten Jahren wurden zahlreiche neue Schlackenfundplätze im Ostallgäu und im Auserfern entdeckt und erstmals systematisch kartiert (Abb. 1). Diese Arbeiten stellen eine Fortsetzung älterer Schlackenkartierungen aus den 80er Jahren von Peter NASEMANN (Hohenschwangau) dar. Dabei stellte sich heraus, dass nur gelegentlich Schlacken nahe der Erzvorkommen in den Nördlichen Kalkalpen zu finden sind. Zwar liegen einige Schlackenfundplätze tatsächlich innerhalb des Gebirges zwischen Reutte und Füssen und häufen sich hier entlang des

Lechs. Besonders viele und große Fundstellen gibt es aber im Alpenvorland, zwischen dem Foggensee und Lechbruck, teilweise mehr als 10 km vom Kalkalpen-Nordrand entfernt.

Angeichts dieser auffälligen Verteilung historischer Schlackenfunde drängen sich eine Reihe von Fragen auf: Stammen alle Schlacken tatsächlich aus der Verhüttung von Eisenerzen? Ist der vermutete Zusammenhang zwischen den Eisenerzen aus dem Oberen Wettersteinkalk der Nördlichen Kalkalpen und den Schlacken wirklich nachweisbar oder könnten möglicherweise auch andere lokale Erze verhüttet worden sein? Was lässt sich anhand der Verhüttungsprodukte über die Verhüttungsmethoden aussagen? In welchem Zeitraum sind die Schlacken entstanden? Da keine dieser Fragen mit den spärlichen und in mancher Hinsicht auch unzuverlässigen schriftlichen Quellen allein schlüssig zu beantworten ist, kamen hier naturwissenschaftliche Methoden zur Anwendung. Die Hinweise und Vermutungen, die sich in unterschiedlichen historischen Quellen finden, wurden mit den Geländebefunden verglichen und mit geologischen, mineralogischen und geochemischen Untersuchungen kritisch überprüft.

Die hier vorgestellten Untersuchungen sind das Ergebnis einer Diplomarbeit, die am Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie der Technischen Universität München von R. SCHÖNER durchgeführt wurden. Diese Arbeit wurde von Priv.-Doz. Dr. Herbert SCHOLZ ver-

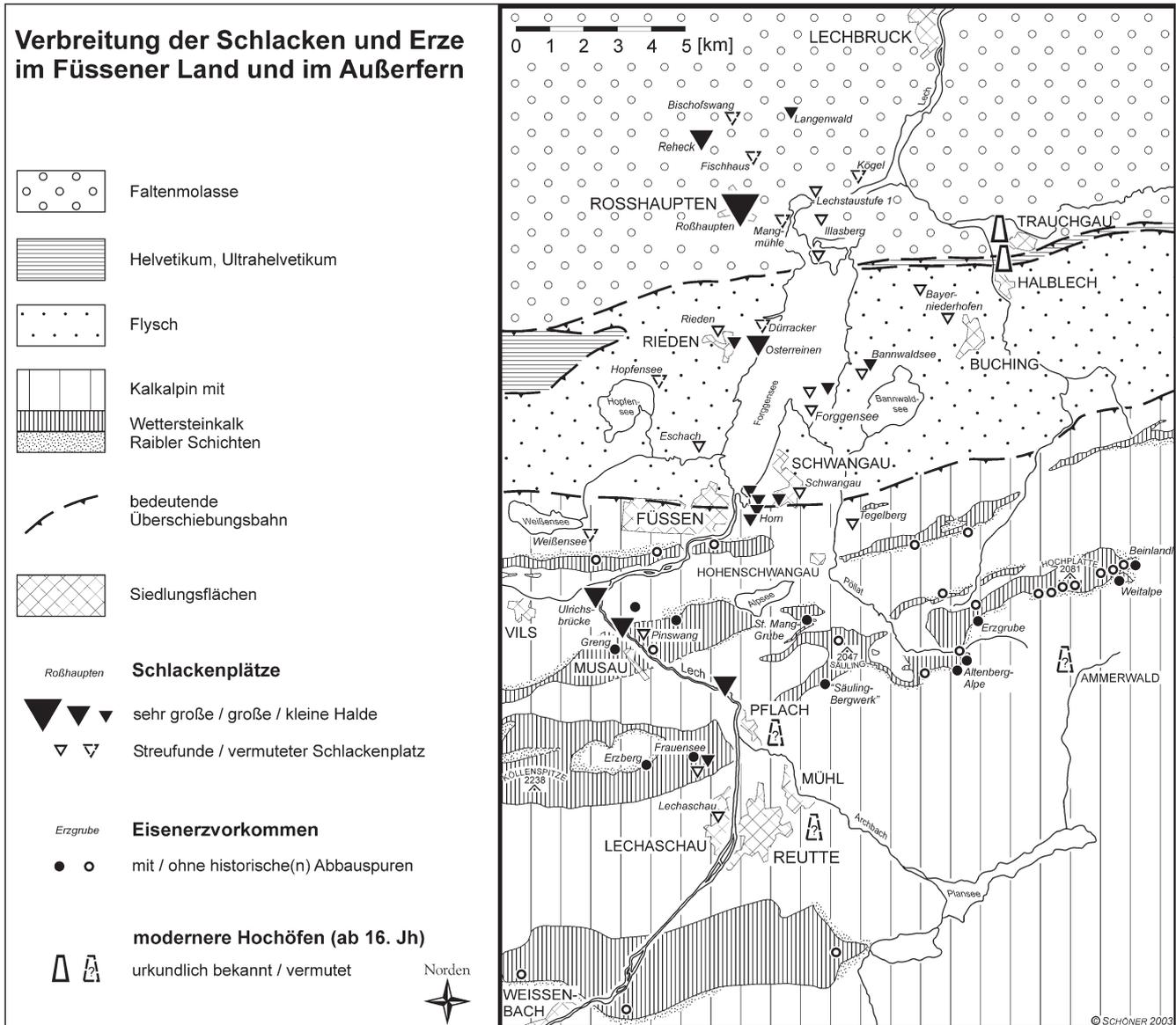


Abb. 1. Stark vereinfachte, schematische geologische Karte des Füssener Landes und des Außerfern, mit den bekannten Eisenerzvorkommen im obersten Wettersteinkalk und historischen Abbauspuren sowie allen bisher bekannten Fundplätzen historischer Eisenverhüttungsschlacken und den urkundlich erwähnten, nachmittelalterlichen Hochofenstandorten. Nach Schöner et al. (2000), verändert; unter Verwendung von HAAS (1987), KUHNERT (1967), SCHMIDT-THOMÉ (1960), SCHNEIDER & WALDVOGEL (1964), TAUPITZ (1954a), WALDVOGEL (1964) und ZACHER (1964).

geben und zusammen mit Prof. Dr. H. KRUMM von der Universität Frankfurt betreut. Erste Ergebnisse dieser Arbeit sind bereits von SCHÖNER et al. (2000) veröffentlicht worden.

### 2. Methodik

Alle bisher schon bekannten Schlackenplätze wurden systematisch erfasst und ihr Aufbau sowie das Fundmaterial dokumentiert. Vier größere, repräsentative Schlacken-vorkommen wurden intensiver beprobt und untersucht: die Fundstellen Roßhaupten, Osterreinen, Ulrichsbrücke und Frauensee (Abb. 1). Jeweils fünf bis zehn typische Proben pro Fundplatz (insgesamt 37 Proben) wurden für mineralogische und geochemische Untersuchungen mit Hilfe einer Scheibenschwingmühle mit Achateinsatz pulverisiert. Von 25 Proben wurden Dünnschliffe und/oder polierte Anschliffe hergestellt.

Die Ermittlung des Phasenbestandes erfolgte anhand von Durch- und Auflichtmikroskopie sowie mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (XRD) an den PHILIPS-Diffrakto-

metern PW 1800 (TU München) und PW 1860 (Fa. ER-LUS). Ergänzend konnten einige Proben mit dem Raster-elektronenmikroskop (JEOL JMS-35C) mit EDX-Einrichtung an der TU München untersucht werden.

Die pauschalchemische Zusammensetzung wurde an einem ICP-OES-Spektrometer (Thermo Jarrel Ash IRIS/AP) im Labor des Elektroschmelzwerkes Kempten bestimmt (s. dazu HASSLER et al., 1999). Die Aufbereitung erfolgte über einen HF-HNO<sub>3</sub>-Aufschluss, die Kalibrierung mittels Zwei-Punkt-Eichung mit Hilfe von aus handelsüblichen Standardlösungen hergestellten Mischstandards.

Das Mess- und Auswertverfahren wurde mit der Software ThermoSPEC/CID 2.0 durch zahlreiche Vorversuche an das Probenmaterial angepasst (vgl. SCHÖNER, 2000).

Die in dieser Arbeit angegebenen Elementkonzentrationen sind die Mittelwerte aus drei (Spurenelemente) bzw. zwei mal drei (Hauptelemente) Einzelmessungen. Die relativen Fehler (1σ) liegen bei Haupt- und Spurenelementen im Bereich von ca. 1 bis 10 %. Zur Kontrolle dienten Mehrfachmessungen an Doppelaufschlüssen der selben Pro-

ben, die jeweils gute Übereinstimmungen zeigten. Zusätzlich stellten Dr. A. ULBIG und I. RENNSCHMIDT-ULBIG von der Firma ERLUS (Neufahrn) eine Reihe von Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) zur Verfügung, mit denen die Bestimmung der Siliziumgehalte möglich war. Die Analyse der Hauptelemente erfolgte an Schmelztabletten, die der Spurenelemente an Pulverpresstabletten. Für die Eichung wurden ca. 50 internationale Standards verwendet. Die RFA-Analysen zeigen meist gute Übereinstimmung mit den ICP-OES-Analysen. Systematische Abweichungen bei einigen Elementen, vor allem bei Proben mit hohen Eisengehalten, sind in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die Kalibration der RFA in der Firma ERLUS auf die Analyse von tonigen Sedimenten abgestimmt ist und nicht auf die eisenreichen Schlacken optimiert werden konnte. Eine Reihe von weiteren, bisher unveröffentlichten RFA-Analysen an Schlacken vom Fundort Tegelberg und Erzen von der Lokalität Erzgrube war schon zu einem früheren Zeitpunkt von H. Krumm an der Universität Frankfurt in Auftrag gegeben worden.

Das Alter der vier Schlackenhalde wurde mit Hilfe von  $^{14}\text{C}$ -Datierungen an Holzkohlestücken ermittelt, die den Schlacken teilweise anhaften. Um sicherzugehen, dass das Material wirklich aus dem Verhüttungsprozess stammt, wurden möglichst nur Holzkohlenreste aus den Schlacken selbst herausgelöst und zu einer Mischprobe für jede Schlackenhalde zusammengefügt. Die konventionellen Datierungen wurden am Leibniz-Zentrum für Altersbestimmung und Isotopenforschung der Universität Kiel (Dr. H. ERLIKEUSER) und am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung durchgeführt, eine AMS-Datierung wurde an der ETH Zürich (Dr. G. BONANI) in Auftrag gegeben.

Einige der Stellen in den Füssener Bergen, die in der Literatur als historische Bergbaugebiete Erwähnung finden, wurden im Gelände überprüft und kritisch auf eindeutige Abbauspuren, deren Art und Ausmaß sowie auf ihr mögliches Alter hin begutachtet. Um den Zusammenhang zwischen den Erzen aus dem Oberen Wettersteinkalk und den Schlacken zu überprüfen, wurden stichprobenartig drei Erzproben vom Frauensee in der selben Weise wie die Schlacken mineralogisch und chemisch untersucht. Eine Erzprobe war direkt in der Schlackenhalde am Frauensee gefunden worden, die beiden anderen stammen aus dem in der Nähe anstehenden Wettersteinkalk. Zahlreiche polierte Großanschliffe vererzter Wettersteinkalkproben dienten dazu, die Genese der abgebauten Erze zu bestimmen.

### 3. Historisches zum Eisenerzabbau und zur Eisenverhüttung im Füssener Land und im Außerfern

In schriftlichen Quellen ist immer wieder von einem historischen Erzabbau in den Füssener Bergen die Rede. Als Hinweise auf eine frühe Erzgewinnung dienen beispielsweise Flurnamen wie „Erzberg“, „Altes Eisen“ oder „Erzgrube“. Über die Anfänge des Erzabbaues findet man allerdings keine sicheren Daten. So gibt es zwar zahlreiche Mutmaßungen über einen römischen oder sogar keltischen Bergbau, jedoch keine Belege dafür (BAUER, 1957; CZYSZ et al., 1995; KOHLER, 1984, 1996; RUMP, 1977; SCHOLZ, 1995). Anlass zu diesen Vermutungen waren meist Schlackenfunde, die man z.B. in der Nähe der römischen Siedlung bei Hohenschwangau oder bei mutmaßlich keltischen Bauwerken bei Roßhaupten gemacht hat. Zudem liegen viele Schlackenfundstellen nahe der sogenannten „Via Claudia Augusta“, einer mindestens seit der Römerzeit benützten Handelsstraße, die über Füssen und Roßhaupten führt (CZYSZ et al., 1995).

Immerhin finden sich zahlreiche Hinweise auf einen Eisenerzabbau im Mittelalter. Nach einer Legende soll der Heilige Magnus, der um 750 gelebt hat, am Säuling auf

eine „Eisenerzader“ gestoßen sein und daraufhin den Erzabbau angeregt haben (WALZ, 1989). SRBIK (1929) spricht von einem Bergbau am Säuling, der bereits im Jahre 629 aktiv war, gibt aber keine Quelle für diese Behauptung an. Der „Eisenzins“, eine Zahlung des Welfen RUDOLF an das Kloster St. Gallen im 10. und 11. Jahrhundert (KELLER, 1930), spricht ebenso für eine gewisse Bedeutung der Eisengewinnung in dieser Zeit wie der Bericht von MUTSCHLECHNER (1955) über einen Verhüttungsplatz aus dem Jahr 1016 in Ehenbichl südwestlich von Reutte. Eine Primärquelle ist aus dem Jahr 1189 überliefert, in dem erstmals dem Kloster Steingaden vom Kaiser FRIEDRICH I (Barbarossa) die Rechte zum Erzabbau verliehen worden sind (in LORI, 1764). Nach ROTTENKOLBER (1951) bezogen sich diese auch auf die Eisengruben am Säuling. Im 14. und 15. Jahrhundert sollen zahlreiche Schmelzhütten in der Umgebung des Säulings existiert haben, z.B. bei Musau nördlich von Reutte und bei Horn in Schwangau (ETTELT, 1971; ROTTENKOLBER, 1951; AMMAN, 1978). Füssen besaß damals offensichtlich das Monopol des Eisenhandels, da nach BAUMANN (1883) der Stahl, der aus dem in Lechaschau abgebauten Erz gewonnen wurde, nur auf dem Füssener Markt verkauft werden durfte.

Deutlich später, etwa um das Jahr 1600, wurde angeblich von der Tiroler Seite im Gebiet der Hochplatte Eisenerz abgebaut (LORI, 1764). Mit dem Erz versorgte man eine Eisenhütte bei Ehrwald und möglicherweise auch eine Schmelzhütte bei Ammerwald, deren Errichtung jedenfalls im Jahr 1606 beantragt wurde (MUTSCHLECHNER, 1955). Noch im 19. Jahrhundert wollte man die Füssener Eisenerzvorkommen ausbeuten. Immer wieder wird von Abbauserkundungen berichtet, z.B. bei den Erzgruben in den Hohenschwangauer Alpen, die aber alle wegen geringer Ergiebigkeit nach kurzer Zeit eingestellt wurden (ALBRECHT, 1856; SCHMITZ, 1842; SCHNETZER, 1938). Das große Hüttenwerk des Grafen DÜRKHEIM-MONTMARTIN in Halblech verhüttete nach HOFMANN (1985) vor allem Erze aus Württemberg, nachdem der Abbau lokaler Erze bei Füssen und aus dem Almajur- und Krabachtal unrentabel war (ALBRECHT, 1856). Ein letztes Mal wurden nach MUTSCHLECHNER (1955) sogar noch nach dem 1. Weltkrieg versuchsweise Erze auf der Hochplatte abgebaut.

Die Form und die hohe Dichte der Schlacken ließen schon früh den Verdacht aufkommen, dass sie nicht aus einem Hochofenprozess (z.B. PRESSLINGER, 2000), sondern aus einem historischen Rennfeuerverfahren stammen (vgl. Abb. 2). Bereits GÜMBEL (1861) und SCHNETZER (1937) vermuten, dass Eisenerze in einfachen „Windöfen“ (= Rennöfen) verhüttet wurden. Die Eisenverhüttung mit dem Rennfeuerverfahren war in Mitteleuropa seit der Hallstattzeit bis ins hohe Mittelalter hinein weit verbreitet und wurde bis ins 20. Jahrhundert noch in Teilen Afrikas betrieben (TYLECOTE, 1992; PLEINER, 2000; JOHANNSEN, 1953). In den Rennöfen, von denen unterschiedlichste Bautypen mit verschiedenen Funktionsweisen bekannt sind, wurden Reicherze bei Temperaturen zwischen ca. 1000°C und maximal 1300°C reduziert und in Form einer sogenannten „Luppe“ gewonnen (RIEDERER, 1987; PLEINER, 2000). Als Brennmaterial und Reduktionsmittel diente Holzkohle, die zusammen mit dem Erz in den Ofen gefüllt wurde. Die Reduktion der Eisenerze zu metallischem Eisen läuft beim Rennfeuerprozess im festen bzw. halbfesten Zustand ab (z.B. COUDURIER et al., 1985). Das dreiwertige Eisen des Erzes wird dabei durch die Einwirkung des Kohlenstoffs der Holzkohle (C, CO) zunächst zu Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), weiter zu Wüstit ( $\text{FeO}$ ) und schließlich zu metallischem Eisen reduziert. Die Luppe, ein schwammiges Gemenge aus Schlacke und kohlenstoffarmem Weicheisen, musste nach Ende des Verhüttungsprozesses aus dem Ofen entnommen und ausgeschmiedet werden (TREPTOW et al., 1900). Manche Ofentypen, bei denen sich die Schlacke in einer

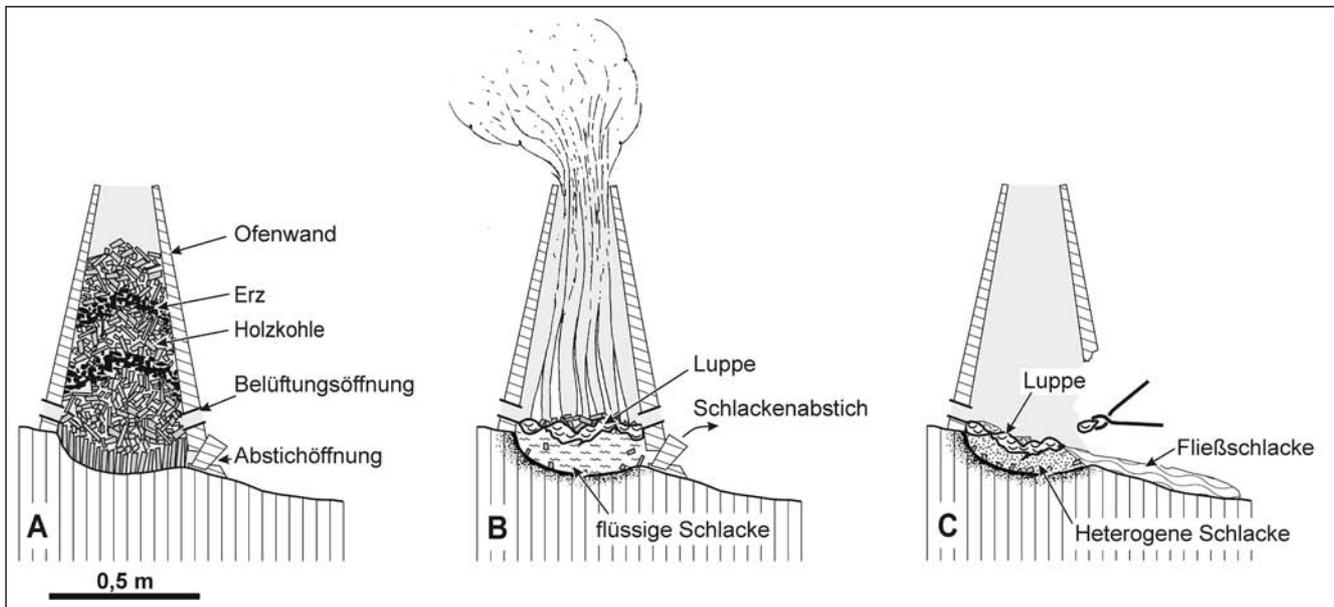


Abb. 2.

Schematische Darstellung eines Rennofens, wie er möglicherweise zur Verhüttung der Eisenerze verwendet wurde. Aufgrund bisher fehlender archäologischer Untersuchungen ist über das genaue Aussehen nichts bekannt.

Nach GASSMANN (1999 und 1998) verändert unter Verwendung von PLEINER (2000) und BIELENIN (1976).

- A) Schnitt durch einen Ofen vor Inbetriebnahme, Höhe ca. 1 bis 1,5 m, Durchmesser ca. 0,5 m. Im Ofen sind Holzkohle und Erz abwechselnd aufgeschichtet. Der Boden des Ofens ist mit Spaltholz ausgefüllt.
- B) Schnitt durch einen Ofen am Ende des Abbrennprozesses. Unterhalb der Belüftungsöffnungen hat sich auf der Spaltholzfüllung metallisches Eisen angereichert („Luppe“). Anstelle des teilweise verkohlten Spaltholzes sammelt sich die flüssige Schlacke, die durch die sogenannte Abstichöffnung abgelaufen wird.
- C) Schnitt durch einen Ofen nach dem Schlackenabstich. Die Fließschlacken sind außerhalb des Ofens erstarrt. Im Ofen hat sich eine heterogene Schlacke gebildet. Die Ofenwand muss aufgebrochen werden, um die metallreiche Luppe in heißem Zustand zu entnehmen.

Ofengrube sammelte, konnten nur ein einziges Mal verwendet werden. Die zurückbleibenden Schlackenklötze sind besonders charakteristisch für die frühgeschichtliche Eisenverhüttung (PLEINER, 2000; BIELENIN, 1976; KEMPA, 1998). Bei fortschrittlicheren Ofentypen wurde die Schlacke abgestochen und erstarrte außerhalb des Ofens (AGRICOLA, 1556; TYLECOTE, 1992). Rennöfen mit Schlackenabstich konnten über längere Zeit immer wieder betrieben werden. Meist gegen Ende des Mittelalters, aber regional zu verschiedenen Zeiten, wurden die Rennöfen durch Stück- und Flossöfen ersetzt (SPERL, 1993; NEUMANN, 1954), in denen bei wesentlich höheren Temperaturen flüssiges Roheisen produziert wurde.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1. Die Rohstoffe

Zweifellos liegen die Eisenerze aus dem Oberen Wettersteinkalk in den Hohenschwangauer und Tannheimer Bergen den Ostallgäuer Schlackenhalde am nächsten, und auch in alten Quellen werden sie als Rohstoffe für die Eisenverhüttung vermutet (z.B. SCHMITZ, 1842, 1843). Diese Gründe rechtfertigen eine detailliertere Betrachtung dieser Erze.

#### 4.1.1. Die Eisenerze im Wettersteinkalk

Primäre Genese und diagenetische Veränderungen von Erzen sind ausschlaggebend für ihre Verteilung im Gestein und damit auch für die Methoden, mit denen diese Rohstoffe abgebaut werden können. Somit sind Überlegungen zur Erzgenese für die Betrachtung der historischen Eisengewinnung von großer Bedeutung. Die Goethit-Hämatit-Erze (Abb. 3) der Tannheimer Berge und der Hohenschwangauer und westlichen Ammergauer Alpen entstanden durch Verwitterung von v.a. Pyrit und Ankerit (s. unten). Sie sind an die obersten Partien des Wetterstein-

kalkes gebunden (Abb. 1). Der Wettersteinkalk, der alle markanten Gipfel dieser Region aufbaut, ist hier nach ENDERS (1974) im tieferen Karn (Cordevol) abgelagert worden; ladinische Anteile scheinen zu fehlen. Die älteren Abschnitte sind in einer Riff- und Riffschuttfazies ausgebildet, die im Hangenden an vielen Stellen in eine Lagunenfazies übergeht. Die hangenden Sandsteine oder sandigen Tonsteine der gleichfalls karnischen Raibler Schichten wittern stark zurück und sind im Gelände leicht durch rostbraune Verwitterungsfarben und saure Verwitterungsböden zu erkennen. Die Hauptmasse der Eisenerze konzentriert sich in den obersten Metern des Wettersteinkalkes.

Der Genese des vererzten Oberen Wettersteinkalkes sind bereits eine ganze Reihe von Arbeiten gewidmet worden, die allerdings die für die Eisenverhüttung wichtigen Oxidationsprozesse kaum berücksichtigen (SCHNEIDERHÖHN, 1952; CLAR, 1954; PETRASCHECK, 1957; SCHNEIDER, 1953 a,b; TAUPITZ, 1954 a,b; SCHNEIDER & WALDVOGEL, 1964; WALDVOGEL, 1964). In weiten Teilen der Füssener Berge kennzeichnet den Oberen Wettersteinkalk eine spezielle Ausbildung, die SCHNEIDER (1953 b) als „Sonderfazies“ bezeichnet. Die Sonderfazies unterscheidet sich von der sonst typischen Ausbildung des Wettersteinkalkes durch das Auftreten von Gesteinen, die gewöhnlich nicht in einer Riffumgebung vorkommen: grobklastische Breccien, Quarz-Feldspat-führende Kalke, dolomitische Ooide und grüne Mergel (SCHNEIDER & WALDVOGEL, 1964). An diese Sonderfazies ist eine Vererzung aus Ankerit (bzw. eisenreichem Dolomit), Pyrit und Markasit sowie selten Pyrrhotin, Sphalerit und Fluorit gebunden. Als Gangart treten Calcit und Baryt auf. Ankerit kommt in Ooidform und in diagenetisch gebildeten, diffusen Nestern im Kalk vor. Die Sulfide können fein verteilt sein oder als Derberze bis zu mehreren Zentimeter Größe erreichen. Beim Auffahren des Falkenstein-Tunnels zwischen Füssen und Reutte wurde an der Grenze vom Wettersteinkalk zu den Raibler Schichten



Abb. 3.  
Vererzter Oberer Wettersteinkalk.  
Das poröse, zellige, bräunlich verwitternde Erz sitzt relativ locker in einem unregelmäßigen Karsthohlraum des Wettersteinkalkes. Der Wettersteinkalk wird von pyritvererzten Klüften durchzogen (z.B. rechts unten). Die Goethit-Hämatit-Erze entstanden im Wesentlichen in situ durch Oxidation von Pyrit (und Ankerit), wie auch die Reste des Pyrites im Kern des Oxid-erzes zeigen (rechts oberhalb der Münze).

eine ca. 4 m mächtige, massiv vererzte Zone mit Fe-Sulfiden angetroffen (ESSLINGER, 1999).

Die Lagerstättenbildung steht genetisch mit der nordalpinen Blei-Zink-Vererzung in Zusammenhang. Allerdings kommen im Ostallgäu und Außerfern fast ausschließlich Eisenerze vor. Während man als primären Anreicherungsprozess infolge der Arbeiten von SCHNEIDER (1953 a) und TAUPITZ (1954 a) synsedimentäre Erzausfällung in einem flachmarinen Milieu annimmt, gibt es zur Herkunft der Metalle verschiedene Annahmen. Während einige Autoren eine Metallionenzufuhr allein von einem nahegelegenen Festland für möglich halten (z.B. BRIGO et al., 1977), sahen z.B. HEGEMANN (1957) und SCHNEIDER (1964) Hinweise auf eine Metallanreicherung durch submarinen Vulkanismus. Ein Zusammenhang der Erzbildung mit dem triassischen Vulkanismus ist sehr wahrscheinlich, wenn auch bisher nicht sicher zu belegen (SCHROLL, 1983).

Bauwürdige Erze reicherten sich jedoch erst bei der Verwitterung der vererzten Kalke an. Durch Oxidation entstanden Goethit und Hämatit, die meist als unregelmäßige, zellige Krusten und Aggregate bis zu wenigen Dezimetern Größe in Lösungshohlräumen des Wettersteinkalkes zu finden sind (Abb. 3). Häufig sitzen diese Erze zusammen mit etwas ockerfarbenem Lehm relativ locker in den Hohlräumen. Die oxidischen Erze können in feinkörniger Ausbildung auch auf Klüften auftreten. In der Umgebung der

Vererzungen ist der Wettersteinkalk gewöhnlich besonders intensiv verkarstet.

Die Bildung der oxidischen Erze steht offensichtlich mit der Verkarstung des Wettersteinkalkes, die in mehreren Phasen erfolgte, in engem Zusammenhang. Schon vor der Sedimentation der Raibler Schichten kam es zu einer synsedimentären vadosen Überprägung des Wettersteinkalkes. Diese erste lokale Verkarstung führte zur Bildung von Lösungshohlräumen schon während der Ablagerung, die mit wandparallelen Palisadencalcit-Zementen („Großoolith-Strukturen“) und stellenweise primären Sulfiderzen ausgekleidet sind. An der Wende Trias/Jura ist für den westlichen kalkalpinen Ablagerungsraum eine weitere Sedimentationsunterbrechung zusammen mit lokaler Bodenbildung nachweisbar. Nach KOCKEL et al. (1931) führen Jurakalke bei Neuschwanstein Brauneisen und Bohnerz und belegen damit eine kurze Periode mit terrestrischen Bedingungen und möglicher Verkarstung. In den Tannheimer Bergen treten in diesem Niveau die roten Tonmergel der Schattwalder Schichten auf, die aufgrund ihrer Kaolinit- und Corrensit-Gehalte vermutlich als Abtragungsprodukte festländischer Verwitterungsböden zu deuten sind (KÖHLER & ZACHER, 1982). Dabei ist nicht auszuschließen, dass auch der Wettersteinkalk mit meteorischen Wässern in Kontakt stand. Eine erneute Periode der Karbonatlösung ist im Zuge einer erheblichen tektonischen Beanspruchung des Gesteins nachzuweisen, die mit dem Beginn der alpinen Deckenüberschiebungen in der mittleren Kreide zusammenhängen dürfte. In Proben von der Lokalität Frauensee können mindestens zwei zeitlich versetzte Lösungs- und Zementationsphasen unterschieden werden. Die Lösungshohlräume bildeten sich in aller Regel entlang von Klufsystemen. Gleichzeitig kam es zu einer Sammelkristallisation der primären, synsedimentären Erze, offenbar aber nicht zu einer Metallionenzufuhr (SCHNEIDER, 1953 a; MAUCHER, 1957). Spätestens seit der mittleren Kreide muss der Wettersteinkalk lokal abgetragen worden sein, da große Mengen von Wettersteinkalk-Fragmenten in den Brandfleckschichten der kalkalpinen Mittel- und Oberkreide zu finden sind (ZWICKER, 1999). Seit dieser Zeit muss mit einer subaerischen Exposition der kalkalpinen Deckenfronten und damit auch mit der für die Lagerstättenbildung entscheidenden Verkarstung des Wettersteinkalkes und Oxidation der Erze gerechnet werden.

Die Goethit-Hämatit-Erze lagerten sich in den Karsttaschen zusammen mit gelbbraunem bis rötlichem Lehm ab, der nach MAUCHER (1954) von einer lateritisch-bauxitischen Verwitterungsdecke eingespült worden sein dürfte. Dass die Oxidation der Sulfiderze im Wesentlichen in situ stattgefunden hat, belegen Reste von Sulfiderzen im Kern größerer Goethit-Hämatit-Knollen. Auch die niedrigen Neben- und Spurenelementgehalte der oxidischen Erze (Tab. 3) sprechen – in Übereinstimmung mit den geochemischen Untersuchungen von TAUPITZ (1954 a) – für die in situ-Verwitterung der spurenelementarmen Sulfide sowie des Ankerits und gegen eine allochthone Metallionenzufuhr. SCHNEIDER (1953 b) nimmt an, dass diese Prozesse im Zeitraum Oberkreide bis Miozän unter semiaridem bis wechselfeuchtem Klima abliefen. Wie sehr die Verkarstung und Oxidation vom (Paläo-)Relief abhängt, zeigt der Befund aus dem Füssener Grenztunnel durch den Falkensteinzug, wo schon mehrere Dekameter unter der Geländeoberfläche massive Sulfiderze in offenbar nur wenig verkarstem Wettersteinkalk angetroffen wurden (ESSLINGER, 1999). Da unverwitterte Sulfiderze heute vielfach auch oberflächennah anstehen, scheint die subrezente und rezente Verwitterung nur in geringem Maß zur Oxidation der Erze beizutragen. Es ist anzunehmen, dass ein Großteil der heute erkennbaren Karsterscheinungen im Wettersteinkalk letztlich schon auf eine Paläo-Verkarstung zurückgeht. Denn ausgedehnte Karstgebiete liegen z.T. in

Hochlagen der Berge, die weit über dem heutigen Grund- bzw. Karstwasserspiegel liegen.

Kleinere, genetisch eng verwandte Erzanreicherungen gibt es auch im Wetterstein- und Karwendelgebirge (TAUPITZ, 1954 a). Ein weiteres kleines Eisenerzvorkommen im Almajurtal ist an das Niveau des Alpenen Muschelkalkes gebunden und soll nach TAUPITZ (1954 a) im 15. und 16. Jahrhundert in geringem Umfang abgebaut worden sein. Neben Goethit-durchsetzten Dolomiten tritt dort auch Breunnerit auf (MUTSCHLECHNER, 1955).

#### 4.1.2. Kommen auch andere Eisenerze als Rohstoffe in Frage?

Obwohl eine Verbindung zwischen der Verhüttung im Füssener Land und den oben genannten Eisenerzvorkommen in den nahegelegenen Nördlichen Kalkalpen plausibel erscheint und auch immer wieder vermutet wird (z.B. SCHMITZ, 1843; SCHNETZER, 1938; ROTTENKOLBER, 1951; KOHLER, 1984), konnte dafür bislang kein eindeutiger Nachweis erbracht werden. Für die Schlackenplätze zwischen Füssen und Reutte, besonders für den am Frauensee, scheint dieser Zusammenhang ganz offensichtlich zu sein, da sich historische Eisenerz-Abbaue in nächster Nähe befinden. Diese räumliche Einheit von Abbau und Verhüttung prägt die Metallgewinnung nach ZOTZ (1993) im Regelfall zumindest bis ins frühe Mittelalter, wenn auch mancherorts Erztransporte über größere Entfernung üblich waren (STEUER, 1993). Die meisten Schmelzplätze im Ostallgäu liegen hingegen nicht in direkter Nähe von Erzvorkommen, denn große Schlackenkonzentrationen befinden sich im Bereich der Flyschzone und der Faltenmolasse, bis zu mehr als 10 km vom Nordrand der Kalkalpen entfernt (Abb. 1). Ausschlaggebend für die Wahl der Verhüttungsstandorte waren vielfach wohl nicht die Erzvorkommen, sondern die Holzreserven und Holzrechte bzw. die Lage der Köhlereien. Denn Holz wurde i.d.R. in ungleich größeren Mengen benötigt als Erz, weshalb es wohl häufig einfacher war, das Erz zum Holz zu transportieren als umgekehrt (LUDEMANN, 1999 a,b; NEUMANN, 1954). Aus den Nördlichen Kalkalpen schaffte man nach einem Bericht von BAUER (1950/51) tatsächlich Erz ins Alpenvorland, weil dort noch genügend Holz zur Verfügung stand. Auch diente die Flößerei auf dem Lech, die nachweislich ab dem 16. Jahrhundert eine bedeutende Rolle spielte, u.a. zum Transport von Erz (BÖHM, 1994). Dennoch liegen eine Reihe von bedeutenden Schlackenplätzen nicht in der Nähe des Flusses, sondern mehrere Kilometer davon entfernt, z.B. Roßhaupten oder Reheck (Abb. 1). Daher muss geprüft werden, ob hier nicht auch lokale Eisenerze von Vorkommen außerhalb der Kalkalpen verhüttet worden sein könnten.

Lokale Erzvorkommen sind zwar aus der Ostallgäuer Flyschzone, dem Helvetikum und der Faltenmolasse nicht bekannt. Doch wäre hier das Auftreten von „Raseneisenerzen“ immerhin denkbar, die nach ETTTEL (1971) an den Füssener Schmelzplätzen auch tatsächlich verwendet worden sein sollen. „Raseneisenerze“ bzw. „Sumpferze“ bilden sich aus eisenreichen, sauren Lösungen unter bestimmten klimatischen und geologischen Voraussetzungen. Sie entstehen vorzugsweise im Grundwasserschwankungsbereich in feuchten Niederungen und an den anmoorigen Randbereichen von Mooren (OBERRASCHER, 1939; FISCHER, 1961). Die genetische verwandten „Seeerze“ entstehen nach LÜDERS (1965) in ruhigen Gewässern. Solche Erztypen sind z.B. in Norddeutschland und Skandinavien weit verbreitet. Da sie sich nahe der Oberfläche anreichern, wurden sie schon seit frühgeschichtlicher Zeit abgebaut und verhüttet (MOESTA, 1986; NEUMANN-REDLIN, 1977). Moorflächen über eisenführenden Flysch- oder Helvetikum-Gesteinen sind zwar im Füssener Alpenvorland häufig, z.B. am Bannwaldsee und am Hopfensee. Dennoch

wurden unseres Wissens nach bisher keine Raseneisenerze oder Seeerze im Allgäu gefunden, weder bei den Bohrungen im Bereich der Moore (VIDAL & HOHENSTATTER, 1964, 1966) noch bei zahlreichen geologischen Kartierungen. Auch lokale, historische Quellen, die sich ausführlich der Gewinnung von Bodenschätzen in der Füssener Gegend widmen, enthalten keinerlei Hinweise auf ein Vorhandensein solcher Erze (z.B. SCHMITZ, 1842, 1843).

Bei einigen angeblichen Raseneisenerzvorkommen (KELLER, 1982; SCHNETZER 1938; CZYSZ et al., 1995) handelt es sich den Beschreibungen nach um einen genetisch völlig anders entstandenen Erztyp, der vor allem in der Nähe von Augsburg häufig ist (Abb. 4). Diese Erze sind limonitische „Eisenschwarten“, die sich nach SCHEUENPFLUG (1993) als Konkretionen im Grenzbereich von quartären Schottern zur Oberen Süßwassermolasse angereichert haben. Sie wurden in Trichtergruben gewonnen, die zu Hunderten nebeneinander liegen. Genetisch sind diese Erze an altquartäre, tiefgründig verwitterte Schotter gebunden, wie sie im südlichen Alpenvorland nicht vorkommen. Da man in der Umgebung der Trichtergruben im nördlichen Schwaben meist auch Verhüttungsplätze mit Rennfeuerschlacken kennt, muss man von einer lokalen Verhüttung dieser Erze ausgehen (FREI, 1966).

Eine früher bedeutende und sehr gut bekannte Eisenerz-lagerstätte am nördlichen Alpenrand liegt dagegen nur gut 30 km westlich von Füssen, am Grünten (Abb. 4). Dort wurde mindestens seit dem 15. Jahrhundert das sog. „Grüntenerz“ gewonnen, das in bestimmten Horizonten des eozänen Nummulitenkalkes (Helvetikum) vorkommt oder diesen ersetzt (FENEBERG, 2002). Diese oolithischen Erze wurden bis ins 19. Jahrhundert hinein im Untertage-Abbau gewonnen und in Sonthofen verhüttet (ZIEGLER, 1983; BÖHNE, 1963; SCHNETZER, 1938). Es gibt Hinweise darauf, dass dieser Bergbau schon in römischer oder gar vorrömischer Zeit begonnen haben könnte (SCHOLZ et al., 2000).

Auch die Lagerstätten von „Bohnerzen“ der Schwäbisch-Fränkischen Alb seien der Vollständigkeit halber hier erwähnt, obwohl sie über 100 km von den Füssener Schlackenplätzen entfernt sind (Abb. 4). Bohnerze kommen v.a. als Füllungen alter Dolinen auf der Albhochfläche vor. Sie dienen, zusammen mit massiven Brauneisenerzkrusten auf Malmkalken, schon den Kelten als Rohstoff für die Eisengewinnung (SCHWARZ et al., 1964; FRÖHLICH, 1984). Das Gleiche gilt auch für die oolithischen Brauneisenerzflöze und die Trümmereisenerze, die im sogenannten „Eisensandstein“ des unteren Dogger (Aalenium) im nördlichen Alb-Vorland häufig sind. Sie wurden nach KEMPA (1993) mindestens seit der Völkerwanderungszeit bis zum 20. Jahrhundert in großem Umfang abgebaut und verhüttet.

Zur Charakterisierung von Erzen bietet sich v.a. das Spurenelementspektrum an, das i.a. für die jeweilige Lagerstättenbildung typisch ist. Da man die Fraktionierung während des Verhüttungsprozesses jedoch meist nur qualitativ kennt und neben den Erzen auch die Ofenwand und eventuelle Zuschlagstoffe die Zusammensetzung der Schlacken beeinflussen (s. Kap. 5.2), kann man keinesfalls direkt vom Schlackenchemismus auf ein bestimmtes Erz schließen. Mit Hilfe der Spurenelementzusammensetzung der Schlacken lassen sich jedoch gewisse Anforderungen an die Rohstoffe ableiten und damit meist verschiedene Erztypen ausschließen. Als Indikatorelemente eignen sich z.B. Mangan und Phosphor, die nach SPERL (1980) die Bildungsbedingungen der Eisenerz-lagerstätten gut widerspiegeln. Häufig werden auch die Nickel-, Chrom- und Kupfer-Gehalte zur Charakterisierung der Erze herangezogen (FRÖHLICH, 1984; FEHR, 2000; KRONZ, 1997).

Die chemische Zusammensetzung der Schlacken wird in Kap. 4.2.4. ausführlicher diskutiert. An dieser Stelle wird

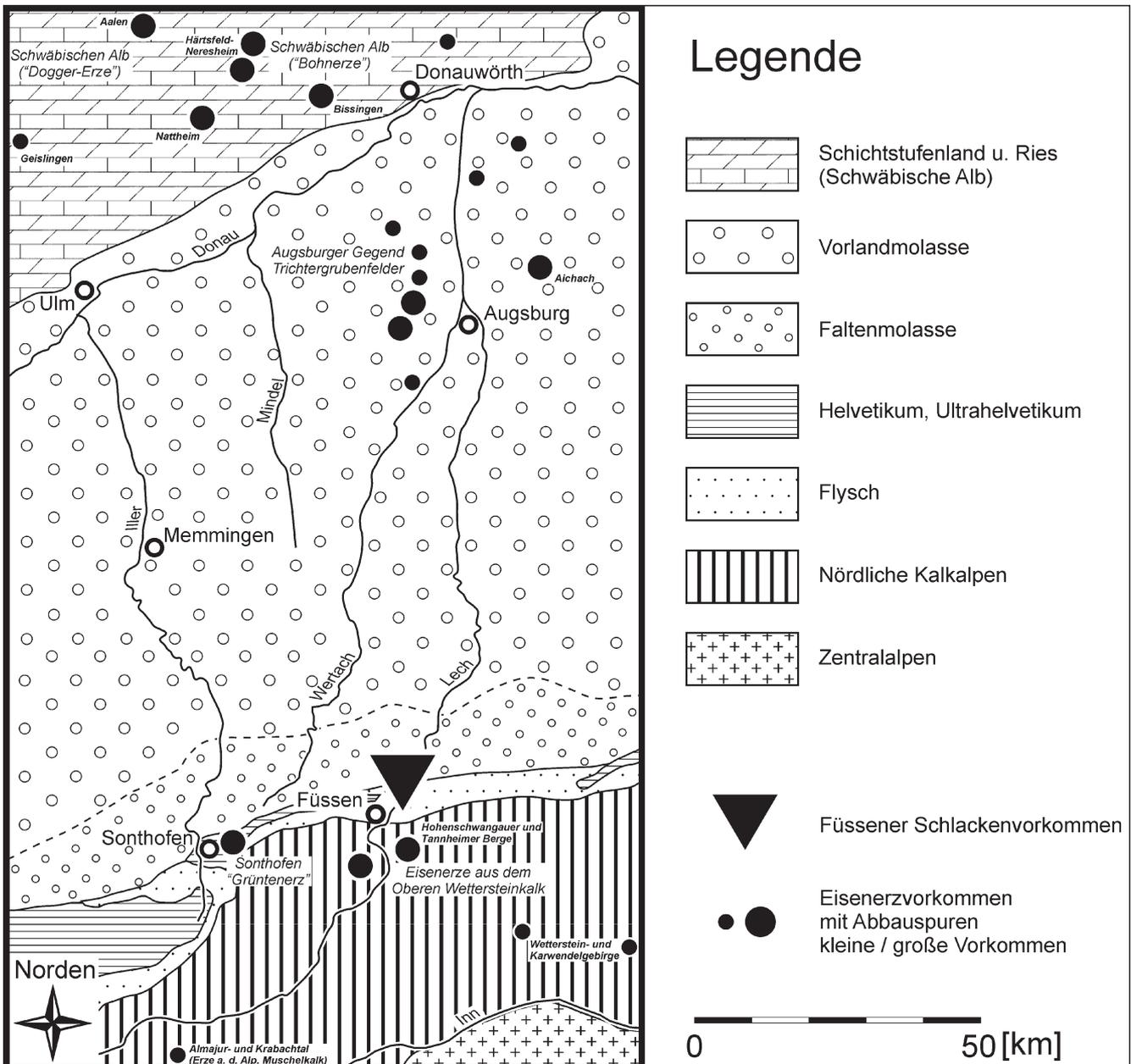


Abb. 4. Stark vereinfachte, schematische geologische Karte mit der Lage verschiedener Eisenerzlagerstätten, die als Rohstoffquellen für die Füssener Eisenverhüttung in Frage kommen könnten. In der Schwäbischen Alb sind nur die größeren Bohnerz- und „Dogger-Erz“-Vorkommen eingezeichnet. Auch weiter nordöstlich und weiter westlich in der Schwäbischen (und Fränkischen) Alb existieren z.T. beachtliche Eisenerzvorkommen, die aber aufgrund der großen Entfernung zu den Füssener Schlacken nicht mehr in das Kärtchen aufgenommen wurden. Nach BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996), FREI (1966), GEYER (1957), GEYER & GWINNER (1964), KOHLER (1982), NEUMANN-REDLIN et al. (1976), SCHMITZ (1840/41), TAUPITZ (1954a) und ZIEGLER (1975).

nur auf die für die Frage der verwendeten Rohstoffe wichtigen Elemente eingegangen. Mangan und Phosphor reichern sich unter den Bedingungen im Rennofen gewöhnlich in der Schmelze an und sollten daher in den Schlacken höher konzentriert sein als im Erz (KRONZ, 1997; NEUMANN, 1954). Durch den Vergleich der  $MnO/FeO$ - und  $P_2O_5/FeO$ -Gehalte der Erze und Schlacken wird deutlich, dass für die Füssener Schlacken nur die Erze aus dem Wettersteinkalk diese Voraussetzung erfüllen, sofern die geringe Probenanzahl überhaupt eine Aussage zulässt (Abb. 5, Tab. 1). Die Erze aus dem Dogger der Schwäbisch-Fränkischen Alb sind zu phosphorreich, um als Rohstoff für die Füssener Eisenverhüttung in Betracht zu kommen. Die Bohnerze und Brauneisenkrusten der Schwäbischen Alb enthalten durchschnittlich sowohl zuviel  $MnO$  als auch zu viel  $P_2O_5$ .

Auch die Augsburger Erze scheiden wegen ihrer viel zu hohen Mangangehalte als Rohstoffquelle aus. Die Erze aus dem Almajurtal sind ebenfalls z.T. deutlich manganreicher als die des Oberen Wettersteinkalkes. Die relativ nahe gelegenen Grüntenerze sind zwar manganarm, enthalten jedoch durchschnittlich mehr  $P_2O_5$  als die Füssener Schlacken. Außerdem machen die relativ hohen Chromgehalte die Verwendung der Rohstoffe vom Grüntener unwahrscheinlich, da sich im Rennfeuerprozess auch Chrom in den Schlacken anreichert, die Füssener Schlacken aber meist unter 100 ppm Cr enthalten (Tab. 1). Nickel konzentriert sich dagegen im Metall (z.B. FRÖHLICH, 1984). Dennoch ist auffallend, dass im Gegensatz zu anderen Lokalisationen sowohl in den Füssener Schlacken als auch in Erzen aus dem Oberen Wettersteinkalk die Ni-Gehalte im

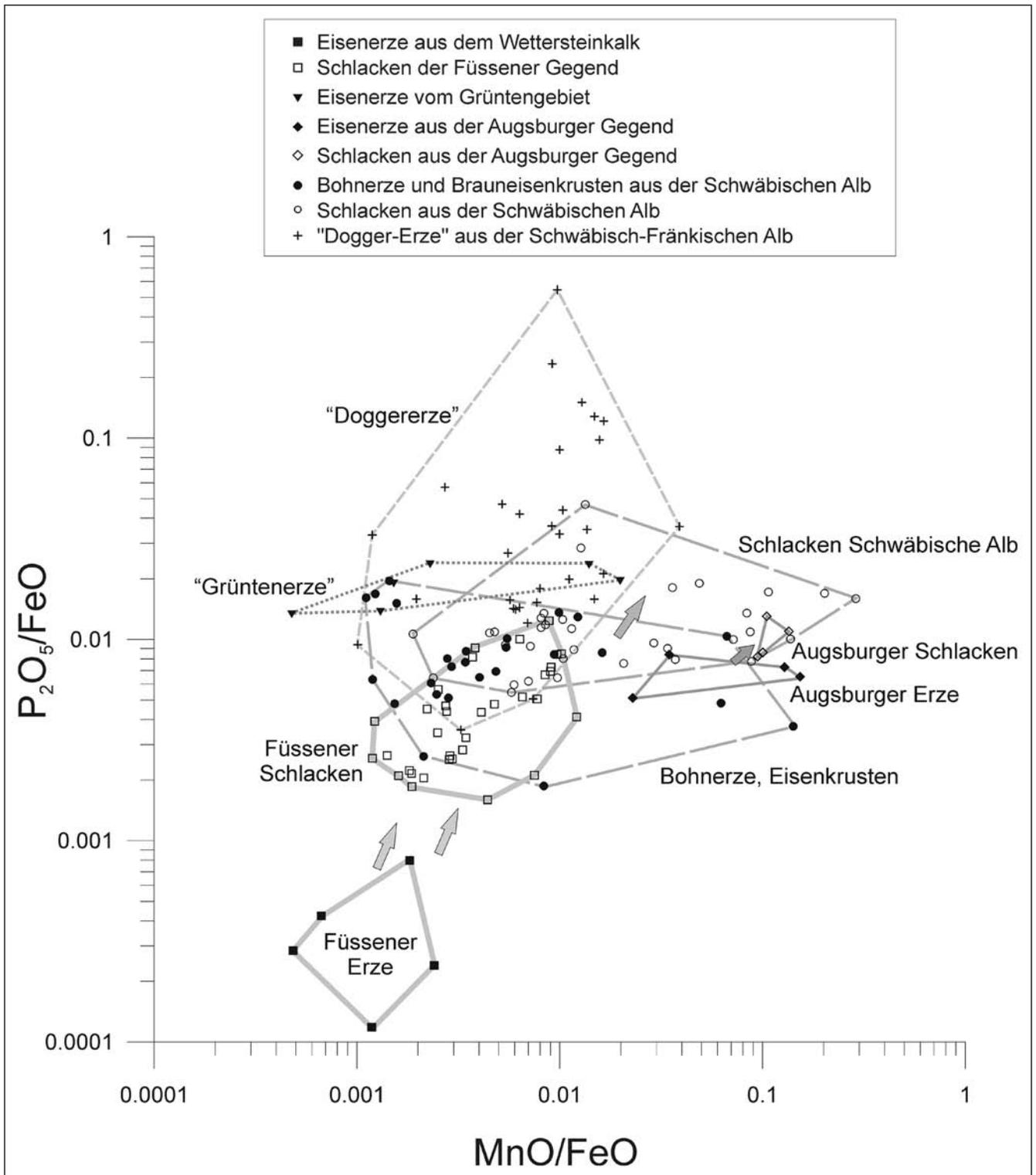


Abb. 5.  
 $MnO/FeO$ - $P_2O_5/FeO$ -Verhältnisse der Erze aus dem Oberen Wettersteinkalk und der Schlacken aus der Füssener Gegend sowie verschiedener Eisenerze (und Schlacken) aus der näheren und weiteren Umgebung (vgl. Abb. 4).  
 Die Pfeile deuten auf die Anreicherung der Elemente im Rennfeuerprozess hin. Die Umgrenzungen der einzelnen Felder dienen ausschließlich der besseren Lesbarkeit der Abbildung und haben keine analytische oder statistische Bedeutung.  
 Datengrundlage: Tab. 3, BÖHNE (1963), FEHR (2000), FISCHER & HAUNER (1987), FRANK et al. (1975), FREI (1966), FRÖHLICH (1984), MUTSCHLECHNER (1955), SCHNEIDERHÖHN (1980), TAUPITZ (1954 a), YALÇIN & HAUPTMANN (1995).

Bereich der Nachweisgrenze liegen. Die chemische Zusammensetzung von Raseneisenerzen ist grundsätzlich vom Substrat abhängig. Hohe Mangan- und Phosphorgehalte und sogar die Vergesellschaftung mit Manganerzen sowie mit Vivianit sind jedoch charakteristisch für diesen Erztyp (GASSMANN, 1993; NEUMANN, 1954; OBERASCHER,

1939). Abgesehen vom Fehlen jeglicher Spur von Raseneisenerzen in der Füssener Gegend spricht daher auch der Chemismus gegen die Verwendung eines solchen Erztyps.

Als Erzhoffstoff für die Füssener Eisenverhüttung kommen nach den vorliegenden Untersuchungen nur die Goe-

Tabelle 1.

Übersicht über die MnO-, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-, Cr- und Ni-Gehalte von Eisenerzen aus dem Füssener Raum und der weiteren Umgebung sowie von den Füssener Schlacken. Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen von eigenen Analysen und Literaturdaten.

Eisenerzvorkommen	MnO (Gew. %)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Gew. %)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Analysen	Datengrundlage
Füssener Gegend (Wettersteinkalk)	0.1 ± 0.1	0.03 ± 0.02	9 ± 4	9 ± 1	5/5/3/3	Tabelle 3
Almajurtal (Alpiner Muschelkalk)	0.9 ± 1.7	-	-	-	5/0/0/0	TAUPITZ (1954 a), MUTSCHLECHNER (1955)
Grünten (Nummulitenkalk)	0.2 ± 0.3	0.6 ± 0.3	390 ± 165	134 ± 40	6/6/2/2	BÖHNE (1963), FEHR (2000)
Augsburger Gegend (Schotter / Molasse)	5.2 ± 3.8	0.4 ± 0.1	-	-	4/4/4/4	FREI (1966)
Schwäbisch-Fränk. Alb ("Doggererze")	0.4 ± 0.3	1.7 ± 1.9	91 ± 64	96 ± 48	35/35/20/20	FRANK ET AL. (1975), SCHNEIDERHÖHN (1980), YALÇIN & HAUPTMANN (1995),
Schwäbische Alb (Bohnerze, Eisenkrusten)	1.3 ± 2.6	0.4 ± 0.2	254 ± 180	237 ± 146	28/26/26/26	FRÖHLICH (1984), YALÇIN & HAUPTMANN (1995)
Raseneisenerze (Beispiele aus Pommern)	3.3 ± 2.5	8.9 ± 6.0	-	-	27/27/0/0	OBERRASCHER (1939)
Füssener Eisenverhüttungsschlacken	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	65 ± 28	6 ± 4	34/34/34/10	Tabelle 3

thit-Hämatit-Erze aus dem Oberen Wettersteinkalk in Frage. Eine zusätzliche Verwendung anderer Erze in geringem Umfang ist nicht grundsätzlich auszuschließen, jedoch nicht wahrscheinlich.

## 4.2. Die Eisenverhüttung

### 4.2.1. Die Schlackenplätze

Obwohl die Schlackenvorkommen in der Gegend um Füssen seit langem bekannt sind, wird nur selten beschrieben, wo sie sich befinden. BAUER (1950/51) schreibt beispielsweise von etwa 40 Schlackenfundplätzen im Raum um Füssen, gibt jedoch nur von wenigen die genaue Lage an. Bei der systematischen Suche nach Verhüttungsprodukten konnten innerhalb der letzten Jahre die meisten in der Literatur beschriebenen und zahlreiche weitere Schlackenplätze gefunden werden. An dieser Suche waren v.a. P. NASEMANN (Hohenschwangau), H. KRUMM (Frankfurt a.M.), P. WALK und H. PFEIFFER (Roßhaupten), aber auch J. SCHRÖPPEL (Pfronten) sowie M. DERGESWEILER (München) beteiligt. Insgesamt wurden inzwischen, in Übereinstimmung mit den Angaben von BAUER (1950/51), ca. 40 Fundplätze genau lokalisiert und kartiert (Abb. 1). Durch systematische Prospektion, wie sie in anderen ehemaligen Bergbaugebieten schon durchgeführt wurde (z.B. JOCKENHÖVEL & WILLMS 1993), könnten sicherlich noch viele weitere Verhüttungsplätze gefunden werden. Hinweise auf Schlackenfunde in den Füssener Bergen, die man in der Literatur gelegentlich findet (SCHMITZ, 1843; GÜMBEL, 1861), müssen hingegen sehr kritisch gewertet werden, da manche Schlackentypen natürlich entstandenen, schwammartigen Brauneisenkrusten und -schwarten sehr ähnlich sehen und mit diesen leicht zu verwechseln sind.

Typischerweise sind die Verhüttungsprodukte heute noch in Halden zu finden, die an vielen Stellen weitgehend ungestört erhalten geblieben sind. In der Regel findet man an jedem Fundplatz nur eine einzige Halde. Man muss annehmen, dass die meisten Schlackenhalde in unmittelbarer Nähe der alten Schmelzplätze entstanden sind. Allerdings wurden bisher noch keine Versuche unternommen, einen Ofenstandort durch Grabungen oder zumindest geomagnetisch nachzuweisen. Viele der kleinen Halden bilden

nur kniehohe Hügelchen oder unregelmäßige Haufen mit selten mehr als 2 m Durchmesser. Solche typischen kleinen Halden finden sich beispielsweise am Frauensee bei Reutte, nördlich des Bannwaldsees, in Horn bei Schwangau oder bei Langenwald (Abb. 1). Sie enthalten nach eigenen Schätzungen zwischen etwa 100 kg und 2 t Verhüttungsprodukte und sind in unebenem Gelände, z.B. am Frauensee, nur schwer zu erkennen.

Größere Halden liegen z.B. bei Osterreinen am Forggensee, bei Reheck nordwestlich von Roßhaupten, an der Ulrichsbrücke bei Stegen und bei Pinwang. Der ehemalige Schlackenhügel an der Ulrichsbrücke, der wohl etwa 40 t Schlacken enthielt, wurde zwar 1998 durch die Bauarbeiten für die Zufahrt zum Falkenstein-Tunnel zerstört, war jedoch gerade aus diesem Grund einzigartig gut aufgeschlossen. Die übrigen großen Halden zeigen jeweils einen ähnlichen Aufbau: Sie bilden vorspringende Nasen an natürlichen Terrassenkanten, über die man die Schlacken vermutlich



Abb. 6.

Eine typische historische Schlackenhalde (Bildmitte) in Osterreinen bei Rieden am Forggensee.

Die Halde bildet einen kleinen Hügel – eine „Nase“ – an einer Hangkante. Die Schlacken (mehr als 100 t) werden erst sichtbar, wenn man die Halde aufgräbt. Der zugehörige Schmelzofen muss am oberen Ende der Halde (rechts außerhalb des Bildes) gelegen haben.

Foto: P. NASEMANN.

hinuntergekippt hat (Abb. 6). Die zugehörigen Öfen standen wohl dahinter auf den Terrassenflächen. Nach ihrer Ausdehnung zu schließen liegt die Menge des hier abgelagerten Materials in der Größenordnung von 100 bis 200 t.

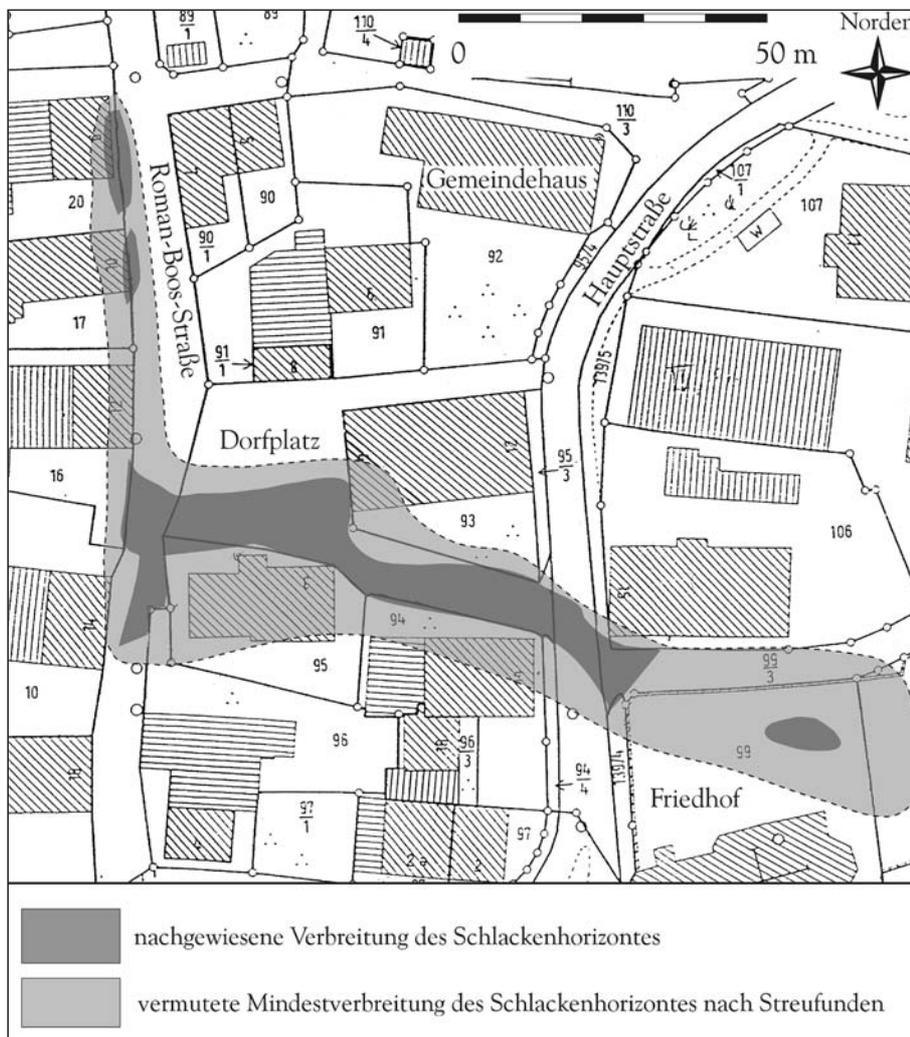
Weitaus größer als alle bekannten Halden ist jedoch die Konzentration von Verhüttungsprodukten in Roßhaupten. Dort steht der ganze Ortskern „buchstäblich auf Schlackengrund“, wie schon BAUER (1950/51) berichtet.

Im Jahr 1997 wurde im Zuge der Dorfplatzerneuerung und des Kanalbaus ein zusammenhängender Schlackenhorizont freigelegt, auf den man schon bei früheren Bauarbeiten immer wieder gestoßen war (Abb. 7). Die Schlackenschicht ist etwa 60 cm mächtig und wird von einer ca. 1,5 m mächtigen Kieslage überdeckt, die teilweise mit Bauschutt durchmengt ist. So weit man bisher beurteilen kann, bedecken die Schlacken eine zusammenhängende Fläche von mindestens 3000 m<sup>2</sup>. Doch auch darüber hinaus hat man gelegentlich noch Schlacken gefunden. Insgesamt muss man hier von einer Schlackenmenge von mindestens 5000 t ausgehen. Es handelt sich jedoch nicht um eine ungestörte Halde, da auch der Schlackenhorizont selbst mit Ziegelstückchen und Kies vermischt ist. Ein Indiz für ein hohes Alter der Schlacken in Roßhaupten ergibt sich u.a. daraus, dass dieser Schmelzplatz trotz seiner Größe offensichtlich in keiner schriftlichen Quelle erwähnt wird. Nicht einmal der Ortsname oder sonst ein nahegelegener Flurname weist auf einen Zusammenhang mit historischer Eisenverhüttung hin. Ein Mindestalter des Schmelzplatzes ergibt sich durch ein Haus, das im 15. Jahrhundert über dem Schlackenhorizont errichtet worden ist (mündl. Mitt. P. Walk). Die Schlacken müssen hier also mindestens mittel-

alterlich, wenn nicht sogar noch älter sein. Einen genaueren Hinweis auf das Alter der Schlacken und die angewandten Verhüttungstechniken hätten Grundrisse von Schmelzöfen geben können, die bei den Bauarbeiten am Dorfplatz 1997 angeblich entdeckt worden sind. Sie wurden jedoch weder genau dokumentiert noch näher untersucht. Dieser Befund bleibt daher leider wertlos.

Die bei frühen Schmelzverfahren anfallenden Eisenschlacken zeichnen sich i.d.R. durch sehr hohe Eisengehalte aus. In Gegenden, wo es auch in nachmittelalterlicher Zeit noch Eisenhütten gab, sind die historischen Schlackenhalde vielfach wieder abgetragen in den moderneren und effektiveren Hochöfen noch einmal verhüttet worden (KEMPA, 1993). Deshalb sind in solchen Gebieten, z.B. in der Gegend um Sonthofen (SINGER, 2003), in der Regel kaum alte Schlacken zu finden. Hinweise auf die gelegentliche Zerstörung älterer Schlackenhalde im Füssener Land könnten manche Streufunde von Schlacken sein. So wurden beispielsweise in der Nähe der römischen Siedlungen an der Tegelberg-Talstation bei Hohenschwangau, am Illasberg und im Bereich der Lechstaustufe 1 bei Roßhaupten zwar immer wieder einzelne Schlacken gefunden, trotz intensiver Suche aber keine Schlackenhalde.

Obwohl im 19. Jahrhundert auch bei Reutte und in Halblech Hochöfen betrieben worden sind, gibt es keine Hinweise auf eine systematische Wiederverwertung der historischen Schlacken, denn dafür sind zu viele Halden vollständig erhalten. Die heute noch vorhandene Schlackenmenge scheint im Großen und Ganzen immer noch der zu entsprechen, die bei der historischen Eisengewinnung angefallen war.



#### 4.2.2. Die Ausbildung der Verhüttungsprodukte

Die Schlackenhalde bestehen aus blasenreichen, glasigen und kristallinen Verhüttungsprodukten verschiedener Form und Dichte. Unter dem Begriff „Schlacken“ versteht man silikatische Produkte, die bei der Verhüttung von Erzen oder bei der Weiterverarbeitung von Metallen aus einer Schmelze entstehen (GOLDENBERG, 1996). Das Fundspektrum der Schlackenplätze kann zu drei unterschiedlichen Materialgruppen zusammengefasst werden: Fließschlacken, heterogene Schlacken und ein glasig-poröses Material, das durch Reaktion der Ofenwand mit der Schmelze entstanden ist und nicht zu den Schlacken i.e.S. zählt. Diese drei Materialtypen können allerdings miteinander verbacken sein bzw.

Abb. 7. Das Ortszentrum von Roßhaupten mit der bisher bekannten Verbreitung des Schlackenhorizontes (nach Angaben von P. WALK, Roßhaupten). Der aus zahlreichen Aufschlüssen bekannte bzw. vermutete, ca. 60 cm mächtige Horizont erstreckt sich über eine Fläche von mindestens 3000 m<sup>2</sup>. Kartengrundlage: Flurkarte 1:1000, Blatt Nr. SW 23-28.23; Wiedergabe mit Genehmigung des Bayer. Landesvermessungsamtes München, Nr. 458/03.

fast stufenlos ineinander übergehen, was die rein optische Klassifizierungsmöglichkeit stark einschränkt.

Am häufigsten kommen dunkelgraue bis graugrüne, meist plattige „Fließ“- oder „Laufschlacken“ (SPERL, 1980) mit zahlreichen Blasen Hohlräumen vor. An der Oberseite sind typischerweise bis zu fingerdicke, wurmförmige Fließstränge ausgebildet, wie man sie auch von extrem dünnflüssigen Laven (Pahoehoe-Laven) kennt (Abb. 8). Im Gegensatz zu den meist glasigen, glatten Oberflächen haften an den raueren, teilweise runzeligen Unterseiten immer kleine Gesteinsbruchstücke oder Sandkörner vom Untergrund. Bruchflächen zeigen, dass die Schlacken aus dünnen, übereinandergeflossenen Lagen bestehen. Einzelne Fließstränge sehen im Querschnitt wie winzige Pillows aus Kissenlaven aus. Gelegentlich sind auch tropfen- und wurmförmige Schlackenfäden zu finden. Die Fließschlacken entstehen typischerweise beim Abstich der flüssigen Schlacke und erstarren außerhalb des Ofens. Solche Fließschlacken mit hoher Dichte fallen bei der Verhüttung in Rennöfen an (PLEINER, 2000).

Die heterogenen Schlacken, die sehr unterschiedlich ausgebildet sein können, besitzen i.d.R. keine ausgeprägten Fließstrukturen, sondern raue, zellige Außenflächen (Abb. 9). Sie enthalten zahlreiche Holzkohlestückchen

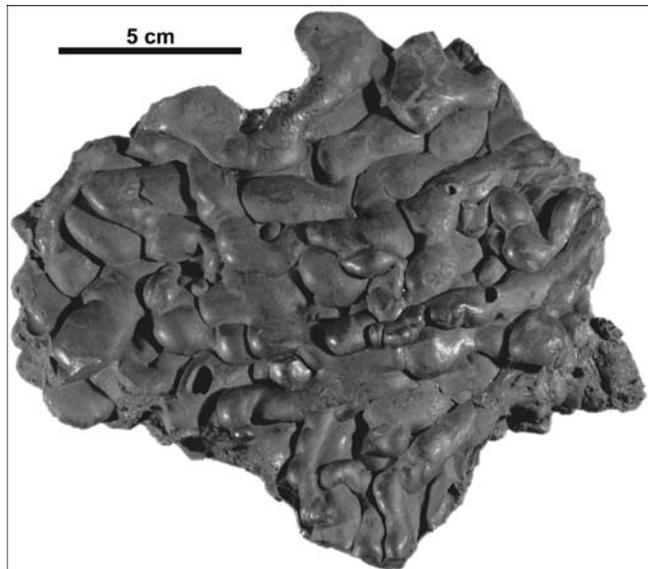


Abb. 8. Fließschlacke aus der Schlackenhalde bei der Ulrichsbrücke. Die wurmförmigen Fließstränge, die nur bei sehr dünnflüssigen Schmelzen entstehen, sind charakteristisch für diesen auffälligsten und häufigsten Schlackentyp der Füssener Gegend. Fließschlacken entstehen beim „Schlackenabstich“, bei dem die flüssige Schlacke während oder am Ende des Ofenbetriebes abgelassen wird (vgl. Abb. 2). Probe U7732.

bzw. die Abdrücke davon. Meist fallen diese Schlacken durch rostige Anwitterungsfarben und eine besonders hohe Dichte auf. Ursache hierfür sind vor allem die z.T. beachtlichen Gehalte metallischen Eisens, das die heterogenen Schlacken in Form von Tropfen, Schlieren oder unregelmäßigen Aggregaten durchsetzt. Vereinzelt konnten sogar Proben mit über 50 % an metallischem Eisen gefunden werden, was den Eisengehalten einer sogenannten Luppe (s. unten) schon recht nahe kommt. Die hohen Gehalte von Holzkohleresten und Eisen sowie das weitgehende Fehlen von Fließstrukturen deutet darauf hin, dass diese Schlacken im Inneren des Ofens erstarrt sind. Die heterogenen Schlacken sind vor allem in den größeren Halden vertreten, bilden jedoch höchstens 20 % des Fundmaterials. Sie werden von SPERL (1980) und anderen Autoren auch zu den „Ofenschlacken“ gerechnet, ein Begriff,

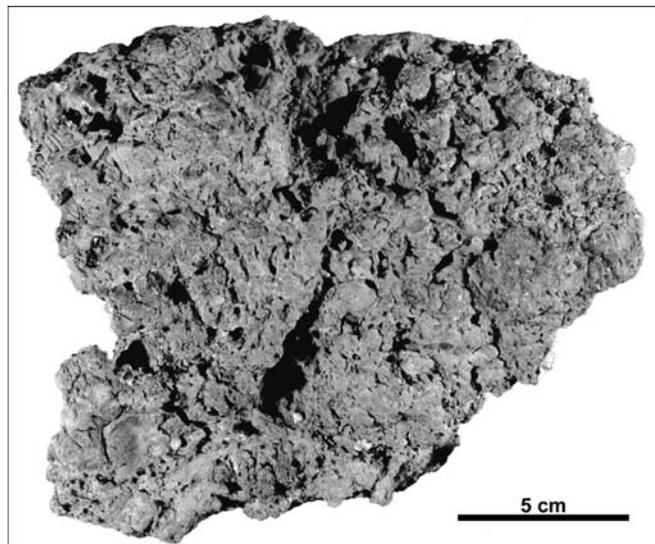


Abb. 9. Heterogene Schlacke aus der Schlackenhalde bei der Ulrichsbrücke. Die rostigen Verwitterungsfarben sind eine Folge der zahlreichen metallischen Eiseneinschlüsse. Neben Eiseneinschlüssen kennzeichnen diesen Schlackentyp das Fehlen von Fließstrukturen, die unregelmäßig zellig-kavernöse Struktur und eingeschlossene Holzkohlestückchen. Die Holzkohlereste weisen darauf hin, dass die heterogenen Schlacken innerhalb des Ofens entstanden sind (vgl. Abb. 2). Probe U7743.

der jedoch nicht exakt definiert ist. Ähnlich ausgebildete Schlacken werden häufig als „Schmiedeschlacken“ interpretiert (z.B. FEHR, 2000). Die von FRÖHLICH et al. (1987) angegebenen Kriterien für Schmiedeschlacken treffen auf keine der hier untersuchten Proben zu. Allerdings gibt es keine allgemeingültigen chemisch-mineralogischen Merkmale für Schmiedeschlacken, und die Unterscheidung von Schlacken aus einem Verhüttungs- und einem Schmiedeprozess wird z.T. nach unterschiedlichen Gesichtspunkten vorgenommen (vgl. SPERL, 1980; FISCHER & HAUNER, 1987; FRÖHLICH et al., 1987; KRONZ, 1997). Genaueren Aufschluss könnten archäologische Grabungen bringen, da die Weiterverarbeitung der Luppen in speziellen Öfen erfolgte.

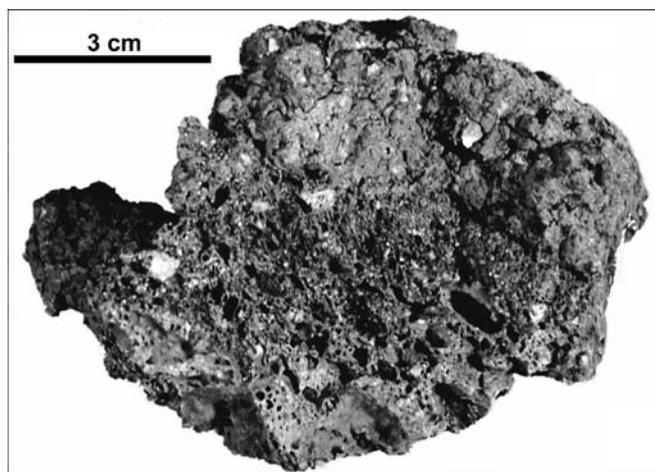


Abb. 10. Glasig-poröses Material aus der Schlackenhalde bei Osterreinen. Im unteren Bereich ist eine glasige Masse mit unzähligen, meist runden Poren sowie einigen hellen Quarz- und Gesteinsbruchstücken zu erkennen. Der obere Bereich ist weniger porös, zeigt Risse und ist randlich sehr brüchig. Das glasig-poröse Material ist keine Schlacke, sondern ein Reaktionsprodukt zwischen der Schmelze und der sandig-lehmigen Ofenwand. Probe OR7726.

Extrem poröse bis schaumige Brocken mit relativ niedriger Dichte, die z.T. an Bimsstein erinnern, bilden den dritten Materialtyp, der in den Halden vorkommt (Abb. 10). In einer glasigen Grundmasse, die grau, beige, braun oder violett gefärbt sein kann, sind zahlreiche Quarz- und kleine Gesteinsbruchstücke eingelagert. Oft wirken die Proben sehr inhomogen, da sie breccienartig aus unterschiedlich gefärbten und ausgebildeten „Klasten“ des glasig-porösen Materials zusammengesetzt sind. Leicht abbröckelnde Randbereiche zeigen häufig die Rot- bis Orangefärbung von gebranntem Lehm. In einem solchen Randbereich war in einem Fall eine zylindrisch-konische Hohlform ausgebildet, die als Negativ einer Düse zu deuten ist. Gelegentlich können auch im glasig-porösen Material Reste von Holzkohle erhalten sein. Diese Proben stellen bis zu einem Viertel des Materials in den Schlackenalden. Nach Ausbildung und Gefüge ist das glasig-poröse Material als Reaktionsprodukt zwischen der Ofenwandung und der Schmelze zu deuten. Ähnliche Bildungen werden bei anderen Autoren als „glasig-sandiges Material“ (FRÖHLICH et al., 1987) und „Ofenwandglas“ (KRONZ, 1997) bezeichnet. Der Begriff „Mantelschlacken“ (FEHR, 2000) bzw. die Mitbehandlung dieses Materials unter den „heterogenen Schlacken“ (KLEIN, 1993) bzw. „Ofenschlacken“ (SPERL, 1980)

ist nicht korrekt, da es sich nicht um Schlacken im eigentlichen Sinn handelt.

Das Fundspektrum der Schlackenplätze, das vor allem aus drei unterschiedlichen Materialgruppen besteht, aus Fließschlacken, heterogenen Schlacken und Relikten der geschmolzenen Ofenwand, repräsentiert typische Produkte eines Rennfeuerprozesses (TYLECOTE, 1992; SPERL, 1980).

### 4.2.3. Die mineralogische Zusammensetzung der Verhüttungsprodukte

Nach KEESMANN et al. (1982, 1984) sind eisenreiche Schlacken durch die Paragenese Olivin ± Wüstit ± Spinell ± Klinopyroxen + Glas bzw. Feldspat und Melilith oder Leucit gekennzeichnet. Diese Paragenese tritt auch in den Füsener Schlacken auf (Tab. 2). Die Fließschlacken und die heterogenen Schlacken sind hinsichtlich Phasenbestand und Gefüge relativ ähnlich. Das glasig-poröse Material hingegen enthält keine schlackenbildenden Phasen.

Metallisches Eisen kommt in Form von kleinen Tröpfchen in nahezu allen untersuchten Proben vor, auch im glasig-porösen Material. Damit gelingt der Nachweis, dass die Schlacken tatsächlich aus einem Eisenverhüttungsver-

Tabelle 2. Ergebnisse der phasenanalytischen Untersuchungen.

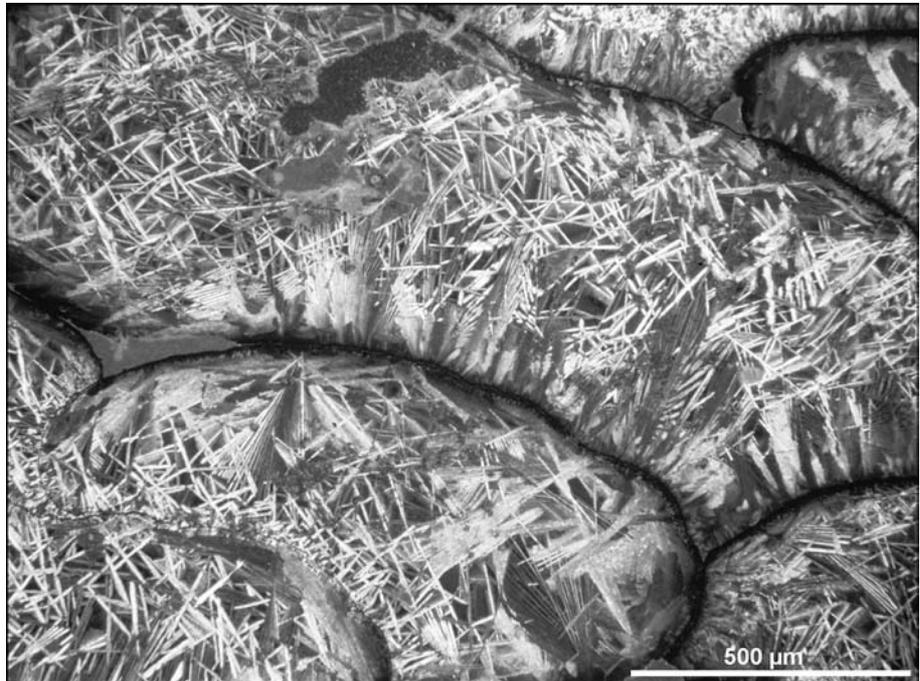
Proben Nr.	Probentyp	Wüstit	Spinell (Magnetit)	Fe-Olivin (Fayalit)	Ca-Olivin (Monticellit)	Pyroxen (Diopsid-Hedenbergit)	Leucit	Quarz	Cristobalit	Cordierit	Glas	Holzkohle	Eisen	Erstkristallisiert	Bemerkungen
	VERHÜTTUNGSPRODUKTE	W	Ma	F	Mo	Cpx	L	Q	Cr	Co	Gl	Hk	Fe		
R7701-1	Fließschlacke, 1. Lage	xxx	?		xx	x					x		n.b.	W	
R7701-2	Fließschlacke, 2. Lage	xxx	?		xx	x					x		n.b.	W	
R7701-3	Fließschlacke, glasige Lage	xxx	?		±	±					x		n.b.	W	
R7701-4	Fließschlacke, gesamt	xxx	?		xx	x			±	±	x		n.b.		nur XRD-Befund
R7702-1	Fließschlacke	?	x	xxx	x		x				x		n.b.	F	
R7702-2	Fließschlacke + glasig-por. Mat.	x		xx	x		x	x			x	x	n.b.	F	W+L kotektisch
OR7713	Fließschlacke	xxx	?	xxx	x		±	x			x		n.b.	W	W+F kotektisch
OR7714	Fließschlacke	x		xxx	±		x				±		n.b.		nur XRD-Befund
OR7715	Fließschlacke	xx		xxx	x			x			x		n.b.	F	
OR7717	Fließschlacke	xxx			xx	x					±		n.b.		nur XRD-Befund
U7734	Fließschlacke	xx		xxx							x		n.b.	F	W+F kotektisch
U7736	Fließschlacke	xxx		xx							x		n.b.	W	
U7737	Fließschlacke		x	xxx							±		n.b.		nur XRD-Befund
F7791	Fließschlacke	xxx		xxx	x						x		n.b.	F	W+F kotektisch
F7792	Fließschlacke	x		xxx	x			x			x		n.b.	F	
F7793	Fließschlacke			xxx	?						±		n.b.		nur XRD-Befund
R7704	Heterogene Schlacke	xxx		xx	x						x	x	x	W	
R7705-1	Heterogene Schlacke	x	x	xxx			x	±			x	x	x	F	W+F, W+L kotektisch
R7705-2	Heterogene S., glasiger Bereich		±	xxx					±		x		n.b.		nur XRD-Befund
OR7719	Heterogene Schlacke	xx	x	xxx			x				±	x	±	W	W+L kotektisch
OR7720-1	Heterogene S., kompakte Bereiche			xx		xx	xx				±	x	x		nur XRD-Befund
OR7720-3	Heterogene Schlacke, Rest			xx		x	xx				±		x		nur XRD-Befund
OR7721	Heterogene Schlacke	xxx		xxx							x	x	x	W	
U7741	Heterogene Schlacke	xxx		xx	x						x		x	W	
U7742	Heterogene Schlacke	xxx	xx	xx				x			x	x	xx	W	W+F kotektisch, Fe-Schlieren
U7743-1	Heterogene S., Luppenanteil entfernt	xxx		xxx			x	x			x	x	xx	W	massive Fe-Anteile
U7743-3	Heterogene Schlacke, gesamt	xxx		xxx			x	x	x	±	x	x	xx		„Luppe“, nur XRD-Befund
U7745-1	Heterogene Schlacke	xx		xxx			?	±			x	x	x		nur XRD-Befund
U7761	Heterogene Schlacke	xx		xxx			x				x		±	W	W+F, W+L kotektisch
F7799	Heterogene S. + glasig-por. Mat.	x	x	xx				xx	xxx	?	x	x	±	W	
R7703	Glasig-poröses Material							xxx	xx		x		±		nur XRD-Befund
R7706	Glasig-poröses Material							xxx	xxx		x	x	±		(Q+Cr)/GI = ca. 60/40
R7707	Glasig-poröses Material							xxx	xx	x	x		±		(Q+Cr)/GI = ca. 40/60
OR7725	Glasig-poröses Material	x		x				xxx	x	xx	x		±		(Q+Cr)/GI = ca. 60/40
OR7726	Glasig-poröses Material			±				xxx	xx	xx	x	x	±		(Q+Cr)/GI = ca. 60/40
U7766	Glasig-poröses Material							xxx	x	xx	x		±		(Q+Cr)/GI = ca. 20/80
U7767	Glasig-poröses Material							xxx	x	x	x		±		(Q+Cr)/GI = ca. 20/80
F7800	Glasig-poröses Material							xx	xxx		x		±		(Q+Cr)/GI = ca. 20/80

R = Roßhaupten; OR = Osterreinen; U = Ulrichsbrücke; F = Frauensee

xxx = sehr viel; xx = viel; x = wenig; ± = Spuren; n.b. = nicht bestimmt

Abb. 11.  
Dünnschliffbild einer fayalitischen Fließschlacke.

Wie bei einer Pillow-Lava liegen die einzelnen Fließlagen übereinander. Diese Schlacke besteht fast ausschließlich aus Fayalit, der in typischem Spinifex-Habitus kristallisiert ist. Am Rand einer Fließlage dominiert garbenförmiges Kristallwachstum nach innen, zum Zentrum hin nimmt die Korngröße zu und es herrscht ein sperriges Gefüge vor. Die einzelnen, sich gegenseitig verzahnenden Fayalit-„Garben“ sind kristallographisch orientiert, wie man an der gleichmäßigen Auslöschung innerhalb einer „Garbe“ erkennt. Durchlicht; gekreuzte Polarisatoren, Schliffdicke ca. 18 µm.  
Lokalität Frauensee; Probe F7792.



fahren stammen, denn ganz ähnlich ausgebildete, fayalitische Schlacken fallen auch bei der Buntmetallverhüttung an (vgl. KEESMANN et al., 1982; KLEIN, 1993; KRONZ, 1997). Größere Anteile metallischen Eisens sind jedoch auf die heterogenen Schlacken beschränkt (Abb. 12).

Kubischer Wüstit wächst meist in Form von idiomorphen, fein- bis mittelkörnigen Skelettkristallen (Abb. 12, 16). Die Skelette bilden im Raum typischerweise rechtwinklig Gitter bzw. sich vielfach durchkreuzende, orthogonale Sterne oder „Bäumchen“. Auch die selteneren gedrungenen Kristalle sind i.d.R. in Gitterform angeordnet. Außerdem kommt Wüstit vielfach in kotektischen Verwachsungen mit Fayalit bzw. mit Leucit vor (Abb. 14). In eisenreichen Schlacken tritt Wüstit als Hauptgemengteil auf.

Ein Hauptbestandteil aller Schlacken ist eisenreicher Olivin (Fayalit). Der Fayalit bildet charakteristische Spinifexgefüge, wie man sie von präkambrischen Komatiiten her kennt (Abb. 11, 15). Die fein- bis grobkörnigen, tafelförmigen Skelettkristalle bilden entweder regellos sperrige Gefüge oder wachsen in kristallographisch orientierten Fächern, v.a. ausgehend von Inhomogenitätsflächen. Im Dünnschliff sind die Fayalite farblos bis hellgelb und hellgrün mit einem sehr schwachen Pleochroismus und häufig deutlichem Zonarbau. Da die Fayalittafeln im Schliffbild überwiegend als dünne, langgestreckte Kristallanschnitte erscheinen, werden sie z.T. irrtümlich als Stengel oder Nadeln beschrieben (z.B.

SPERL, 1980). Vereinzelt treten stark zonierte, kurzprismatische Kristallformen auf.

Zwei Proben bestehen nach dem röntgenographischen Befund dominierend aus Monticellit, der bei feinkörniger Ausbildung polarisationsoptisch kaum von Fayalit zu unterscheiden ist. Als Nebengemengteil wurde Monticellit in den Diffraktogrammen zahlreicher Proben diagnostiziert. Vermutlich handelt es sich dabei um Ca-reiche Randsäume auf Fayalit, denn eigenständige Monticellit-Phasen konnten in den zugehörigen Dünnschliffen nicht nachgewiesen werden. Nach Mikrosondenuntersuchungen von HAUPTMANN et al. (1984) und KRONZ (1997) entwickeln sich Schlackenolivine i.d.R. vom Kern nach außen von Mg-reicher über Fe-reiche hin zu Ca-reicher Zusammensetzung.

Leucit ist ein charakteristisches Nebengemengteil in vielen Schlacken und bildet überwiegend kotektische Gefüge mit Wüstit (Abb. 14). Aufgrund seiner optischen Eigen-

Abb. 12.  
Anschliffbild einer heterogenen, metallreichen Schlacke.

Metallisches Eisen (weiß) durchsetzt die Schlacke in unregelmäßigen Schlieren. Aus der Schmelze kristallisierte zuerst Wüstit (hellgrau), typischerweise in orthogonalen Kreuzen bzw. in Gitterform. Randlich ist stellenweise Magnetit (etwas heller als Wüstit) zu sehen. Fayalit (mittelgrau) kristallisiert tafelig, in den Zwischenräumen befindet sich Glas (dunkelgrau). Schwarz sind Fehlstellen im Anschliffpräparat.  
Auflicht; linear polarisiertes Licht.  
Lokalität Ulrichsbrücke, Probe U7742.

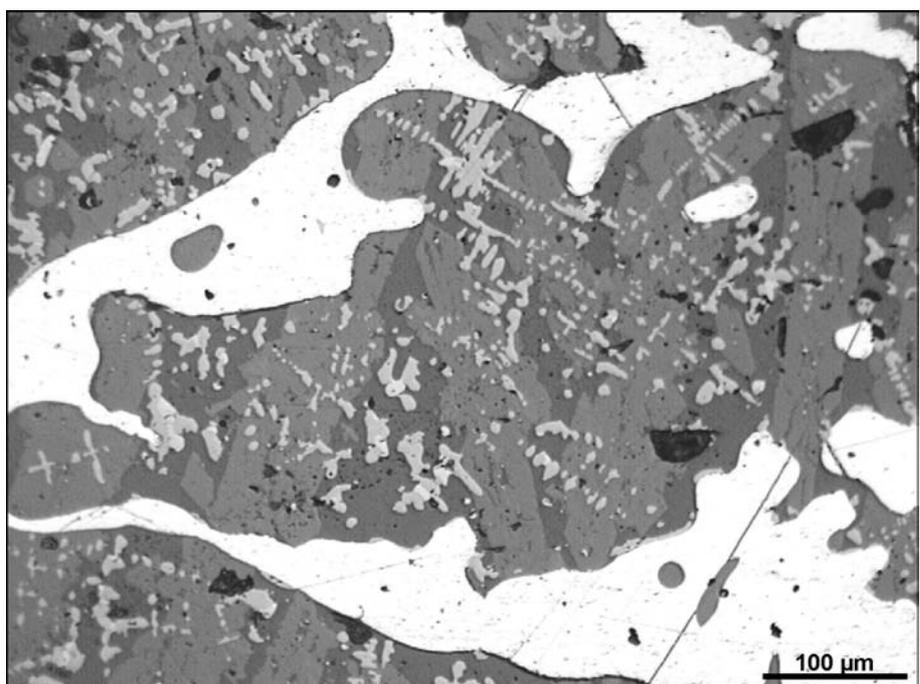
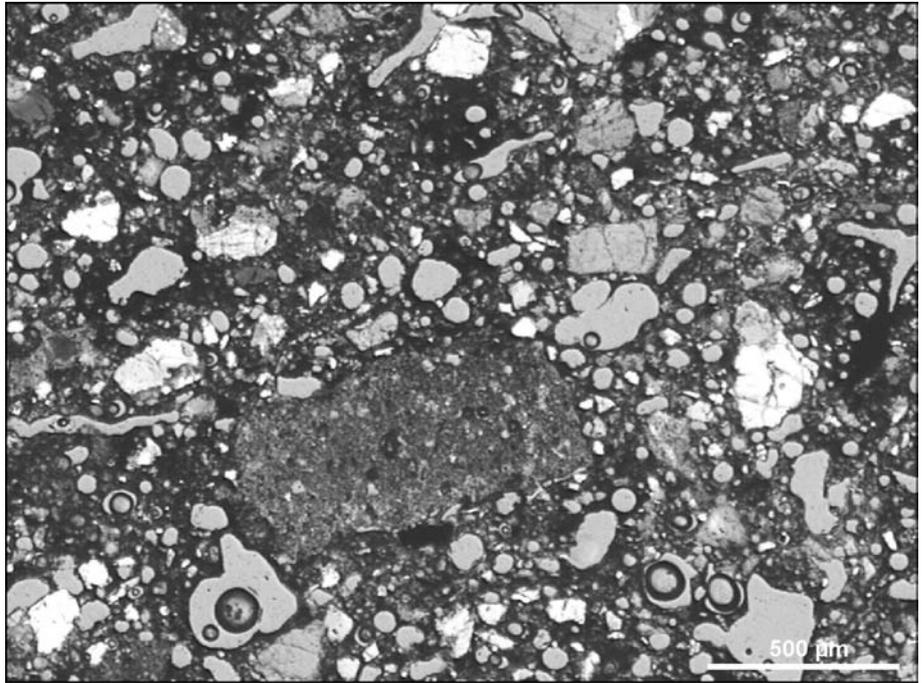


Abb. 13.  
Dünnschliffbild einer glasig-porösen Probe. In einer glasigen Matrix (dunkel) sind zahlreiche Quarzbruchstücke (weiß-grau) eingelagert, die nicht aufgeschmolzene Reste der Ofenwand darstellen. Die Probe enthält unzählige, meist rundliche Blasen Hohlräume (hellgrau). Durchlicht; Polarisatoren zu ca. 45° gekreuzt. Lokalität Roßhaupten, Probe OR7725.



schaften und seiner engen Verwachsung mit Wüstit ist Leucit im Schliffbild leicht zu übersehen. Als Nebengemengteil oder Akzessorium waren ferner Spinelle (Magnetit nach XRD-Befund) und Pyroxene (Diopsid-Hedenbergit) nachweisbar. Magnetit befindet sich typischerweise an den Grenzflächen zwischen Wüstit und Fayalit. Die Pyroxene, die nur in wenigen Proben mittels XRD detektiert wurden, treten vermutlich feinkristallin in der Matrix auf. In den Zwickeln zwischen Fayalit und anderen Phasen ist Glas erstarrt, das in linear polarisiertem Licht farblos, grau oder bräunlich erscheinen kann. Bei feinen, leistenförmigen Kristallen in glasigen Bereichen der Schlacken, die im Mikroskop nicht mehr auflösbar waren, könnte es sich um Rhönit handeln (vgl. KRONZ, 1997). An Blasen Hohlräumen, an Bruchflächen und entlang von Rissen bilden sich als Alterationsprodukte Hämatit, Goethit und gelegentlich Chlorit.

Die Kristallisationsfolgen in den Schlacken sind sehr komplex. Das liegt u.a. daran, dass die Schmelzen sehr schnell abgekühlt sind und daher nicht unbedingt Phasengleichgewichte zu erwarten sind. Verschiedene Phasen in den Schlacken können in unterschiedlicher Reihenfolge nacheinander oder kotektisch miteinander kristallisieren und z.T. mehr als einmal in der Abscheidungsfolge auftreten. Sehr stark vereinfacht können zwei Kristallisationsfolgen unterschieden werden (vgl. SCHÖNER, 2000): In den meisten Schlacken kristallisiert Wüstit vor Fayalit oder einem Wüstit-Fayalit-Kotektikum (Abb. 16). Bei sehr Ca-reichen Proben kann sich ein Ca-Olivin (Monticellit) anstelle von Fayalit bilden. Gelegentlich kristallisiert in den Zwickeln sperriger Fayalite eine weitere, hypidiomorphe Olivin generation. Häufiger sind jedoch kotektische Wüstit-Leucit-Verwachsungen ausgebildet. In den verbleibenden Zwickeln erstarrt Glas. Das zweite Kristallisationsschema beginnt mit Fayalit oder kotektischem Wachs-

tum von Fayalit und Wüstit (Abb. 11, 15). Anschließend bilden sich meist Wüstit-Skelettkristalle oder kotektisch Wüstit zusammen mit Leucit. Gelegentlich wächst eine zweite, hypidiomorphe Olivin generation. Die Restschmelze erstarrt auch hier zu Glas. Die kotektischen Gefüge treten meist in den Zwickeln zwischen Fayalit und/oder Wüstitkristallen auf und deuten darauf hin, dass die Schmelze nicht mehr mit den auskristallisierten Phasen reagiert, sondern sich hin zur Zusammensetzung idealer (niedrigster) Schmelztemperaturen entwickelt. Metallisches Eisen kann in Form von kleinen Tröpfchen in alle Phasen eingeschlossen sein.

Bei den Fließschlacken ist an den Rändern einzelner Fließlagen gewöhnlich eine submikroskopische Kontaktzone ausgebildet, von der aus Fayalit in fächerförmigen Bündeln nach innen wächst (Abb. 11). Von außen nach innen geht die gerichtete Kristallisation unter Zunahme der Kristallgröße allmählich in ein regellos sperriges Gefüge

Abb. 14.  
Dünnschliffbild einer heterogenen Schlacke. In den Zwischenräumen von tafeligen Fayalitkristallen (hellgrau) wachsen Wüstit (schwarz) und Leucit (weiß) in kotektischen, faserig-wurmförmigen Gefügen. Darüber kristallisiert ein Wüstit-freier Randsaum aus Leucit. Durchlicht; linear polarisiertes Licht. Lokalität Osterreinen, Probe OR7719.

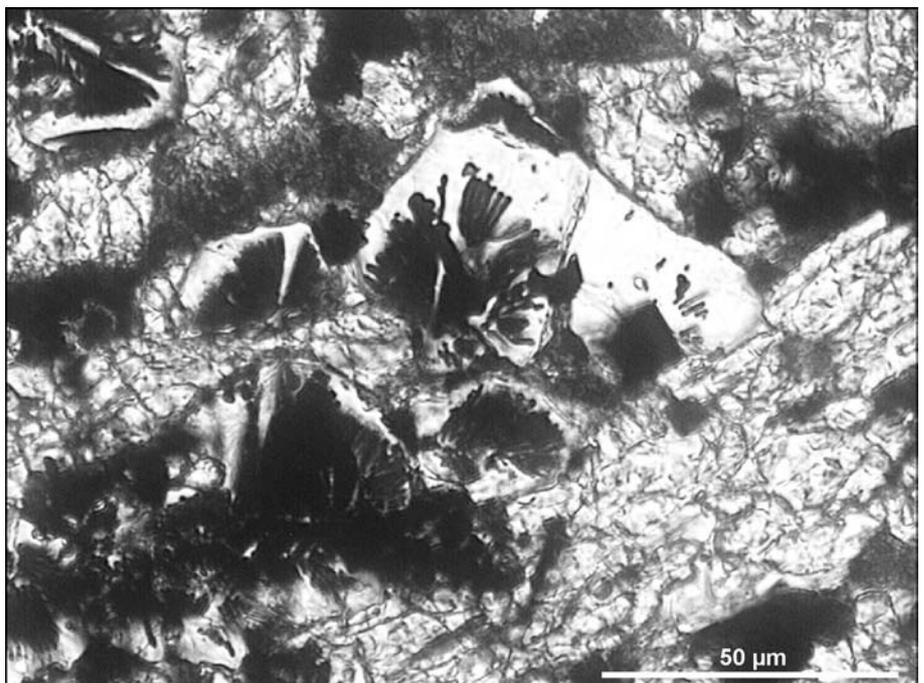


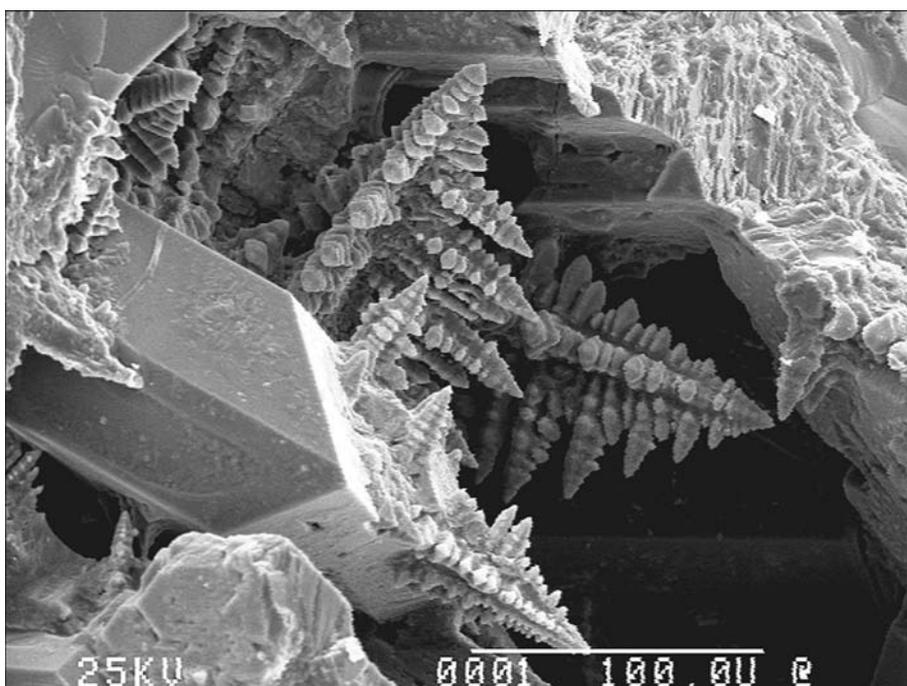
Abb. 15.  
Rückstreuelektronenbild einer Fließschlacke. In einem kleinen Hohlraum wachsen tafelige Fayalitkristalle in Spinifex-Habitus und bauen ein sperriges „Kartenhausgerüst“ auf. Solche Kristallformen sind typisch für schnell abkühlende, niedrigviskose Schmelzen.  
Lokalität Roßhaupten, Probe R7702.



ge über. Im langsamer abkühlenden Zentrum dickerer Fließlagen wachsen z.T. gedrungene Fayalite. Monticellit kommt in den Fließschlacken häufiger vor als in den heterogenen Schlacken. Diese weisen im Durchschnitt höher Gehalte an Wüstit auf, der hier meist als primäre Phase kristallisiert. Gedrungene, prismatische Fayalit-Individuen sind wesentlich häufiger als bei den Fließschlacken und deuten auf langsamere Abkühlungsraten hin. Für den auffallend hohen Leucitanteil der heterogenen Schlacken ist vermutlich die längere Reaktion mit der kaliumreichen Holzkohlenasche und/oder der tonführenden Ofenwand verantwortlich. Immer wieder enthalten diese Schlacken Bruchstücke des glasig-porösen Materials, die teils diffus, teils scharf gegen die Schlacken abgegrenzt sind.

Das glasig-poröse Material besteht aus einer hoch porösen, glasigen Grundmasse, in die ohne gegenseitigen Kontakt regellos Quarzkörner und Sandsteinbruchstücke eingelagert sind (Abb. 13). Die eckigen bis gut gerundeten Quarzkörner sind meist einschlusreich, trüb und zeigen Hinweise auf Deformation, z.B. undulöses Auslöschen und Subkornbildung. Sie müssen daher als nicht aufgeschmolzene Relikte interpretiert werden, die aus der Ofenwand stammen dürften. Häufig sind ehemalige Quarzkörner in Cristobalit umgewandelt, der noch die ursprünglichen Kornrisse beibehalten hat. Diffraktometrisch konnte zudem in zahlreichen Proben Cordierit nachgewiesen werden. Ganz vereinzelt sind Blasen Hohlräume mit Fayalit und Wüstit gefüllt. Häufig sind in den Proben selbst Bruchstücke des glasig-porösen Materials zu erkennen, die das breccienartige Aussehen verursachen (s. oben). Das glasig-poröse Material stand im Kontakt mit der Schmelze im Ofen und reagierte mit ihr, wie die Holzkohle, die vereinzelt Tröpfchen metallischen Eisens und die mit Schlackenmaterial gefüllten

Abb. 16.  
Rückstreuelektronenbild einer Fließschlacke. Kubischer Wüstit in orthogonaler „Bäumchen“-Form und tafeliger Fayalit sind in diesem Bild gleich orientiert. Der Fayalitkristall ist offensichtlich zoniert: Das entlang der Kanten aufgewachsene Material weist andere Rückstreueigenschaften auf als die Flächen des Kristalls.  
Lokalität Ulrichsbrücke, Probe U7734.



Blasenhohlräume belegen. Das breccienartige Gefüge, das das ursprüngliche Gefüge der Ofenwand widerspiegeln könnte, und die nur teilweise in Cristobalit umgewandelten Quarzkörner sind sichere Indizien dafür, dass dieses Material zwar sehr hohen Temperaturen ausgesetzt, aber niemals völlig aufgeschmolzen war.

#### 4.2.4. Die chemische Zusammensetzung der Verhüttungsprodukte

Die Ergebnisse der chemischen Analysen sind in Tabelle 3 angegeben. Da Eisen in den Schlacken nicht nur in zweiwertiger Form, sondern auch metallisch und in dreiwertiger Form vorkommt, aber nicht getrennt analysiert werden konnte, wurde auf eine Summierung der Elementgehalte verzichtet. Zur besseren Vergleichbarkeit sind auch die Eisengehalte des glasig-porösen Materials und der Erze in Gew.-% FeO umgerechnet, obwohl sie kaum

Tabelle 3.  
Ergebnisse der chemischen Untersuchungen.

Material	Proben Nr.	Hauptelemente in Gew. %											Spurenelemente in ppm										
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Mo	Ba	Pb	
FS	R7701-1	29.1*	0.33	8.1	44.4	0.45	2.2	11.3	0.08*	2.2	0.38	87	53	<4	10*	9	68	117	282	<4	579	18	
FS	R7701-2	n.b.	0.32	9.3	48.3	0.44	2.7	13.2	n.b.	2.4	0.35	84	50	<4	n.b.	9	38	107	244	<4	524	<5	
FS	R7701-3	n.b.	0.31	7.4	43.7	0.42	2.1	11.1	n.b.	2.0	0.37	83	48	<4	n.b.	9	49	122	181	<4	955	<5	
FS	R7701-4	n.b.	0.32	11.6	52.0	0.44	3.9	16.6	n.b.	3.0	0.35	85	51	<4	n.b.	12	21	113	260	<4	552	<5	
FS	R7702-1	n.b.	0.32	7.6	39.7	0.25	2.7	9.0	n.b.	2.6	0.40	70	43	<4	n.b.	4	28	155	241	<4	620	<5	
FS+GP	R7702-2	n.b.	0.31	11.9	58.6	0.22	4.8	11.6	n.b.	3.5	0.48	68	41	<4	n.b.	10	300	126	294	<4	554	<5	
FS	OR7713	n.b.	0.27	7.8	54.4	0.14	2.5	4.3	n.b.	2.3	0.31	78	57	<4	n.b.	10	61	114	214	<4	341	<5	
FS	OR7714	29.1*	0.32	8.5	50.4	0.14	2.3	3.4	0.12*	2.3	0.24	93	68	<4	10*	7	47	117	198	<4	368	<5	
FS	OR7715	n.b.	0.28	7.4	56.2	0.09	1.7	3.2	n.b.	1.6	0.12	68	43	<4	n.b.	8	35	74	209	<4	182	11	
FS	OR7717	n.b.	0.29	8.5	43.5	0.28	2.0	13.3	n.b.	2.1	0.22	73	53	<4	n.b.	6	35	129	259	<4	423	<5	
FS	U7734	25.7*	0.31	8.2	67.8	0.13	2.1	2.9	0.06*	1.8	0.13	81	51	<4	5*	6	35	162	164	<4	963	6	
FS	U7736	n.b.	0.30	7.4	50.5	0.17	1.6	4.7	n.b.	1.4	0.14	82	50	<4	n.b.	19	72	98	181	<4	230	<5	
FS	U7737	n.b.	0.27	8.4	52.0	0.23	1.7	1.6	n.b.	1.9	0.08	88	66	<4	n.b.	25	79	79	214	<4	400	<5	
FS	F7791	n.b.	0.24	7.8	63.1	0.12	2.5	6.0	n.b.	1.7	0.14	68	53	<4	n.b.	8	83	61	155	<4	179	<5	
FS	F7792	n.b.	0.29	7.7	47.1	0.14	1.7	4.7	n.b.	1.6	0.12	79	64	<4	n.b.	8	59	75	168	<4	281	6	
FS	F7793	30.6*	0.29	7.7	46.9	0.13	1.7	5.1	0.07*	1.6	0.12	79	62	<4	10*	7	64	74	160	<4	217	<5	
FS	KR4**	32.7*	0.30*	6.4*	41.4*	0.17*	2.6*	9.2*	0.25*	1.7*	0.18*	61*	78*	n.b.	<4*	<5*	19*	111*	80*	<1*	323*	5*	
FS	KR5**	35.8*	0.32*	7.0*	37.8*	0.18*	2.7*	9.8*	0.28*	1.8*	0.18*	67*	82*	n.b.	<4*	<5*	14*	120*	86*	<1*	346*	4*	
FS	KR11**	28.5*	0.30*	7.4*	49.3*	0.17*	1.7*	4.1*	0.26*	2.2*	0.16*	70*	89*	n.b.	<4*	<5*	15*	113*	77*	<1*	302*	8*	
HS	R7704	n.b.	0.21	5.9	63.3	0.14	2.0	4.9	n.b.	1.4	0.13	57	22	<4	n.b.	6	30	70	250	<4	223	<5	
HS	R7705-1	n.b.	0.30	8.3	52.8	0.15	1.9	2.6	n.b.	2.1	0.23	81	56	<4	n.b.	28	61	78	256	<4	400	<5	
HS	R7705-2	n.b.	0.49	12.4	29.2	0.23	3.0	5.6	n.b.	3.5	0.15	111	79	<4	n.b.	24	32	139	215	<4	681	205	
HS	OR7719	n.b.	0.30	9.8	47.5	0.18	2.5	4.6	n.b.	2.6	0.43	90	63	<4	n.b.	9	32	117	143	<4	342	<5	
HS	OR7720-1	n.b.	0.47	13.1	30.3	0.27	3.1	9.5	n.b.	3.8	0.21	132	83	<4	n.b.	26	61	143	215	<4	415	69	
HS	OR7720-3	n.b.	0.46	12.8	27.8	0.25	2.8	8.3	n.b.	3.2	0.34	124	81	<4	n.b.	65	69	128	179	<4	492	<5	
HS	OR7721	n.b.	0.16	4.8	68.3	0.08	1.3	1.8	n.b.	1.2	0.27	264	196	<4	n.b.	21	178	104	166	<4	254	<5	
HS	U7741	27.7*	0.25	8.7	56.6	0.07	5.4	10.8	0.09*	2.5	0.15	71	56	<4	10*	13	190	234	254	148	1647	<5	
HS	U7742	n.b.	0.19	5.3	59.7	0.08	1.1	1.9	n.b.	0.8	0.16	89	56	<4	n.b.	38	172	54	187	<4	39	173	
HS	U7743-1	n.b.	0.27	6.7	59.3	0.11	1.6	1.8	n.b.	1.0	0.13	111	76	<4	n.b.	13	125	69	253	<4	215	<5	
HS	U7745-1	n.b.	0.43	10.3	45.1	0.10	2.3	2.4	n.b.	1.9	0.20	115	90	<4	n.b.	17	138	72	225	<4	178	<5	
HS	U7761	n.b.	0.31	7.4	54.4	0.16	1.3	1.9	n.b.	1.5	0.14	78	64	<4	n.b.	20	65	59	206	<4	327	<5	
HS+GP	F7799	n.b.	0.42	8.7	33.7	0.08	1.3	1.8	n.b.	1.5	0.12	82	59	<4	n.b.	26	282	46	170	<4	160	5	
HS	KR9**	24.1*	0.31*	8.1*	41.3*	0.50*	5.0*	14.2*	0.18*	1.2*	0.17*	98*	83*	n.b.	<4*	5*	21*	67*	74*	4*	825*	15*	
HS	KR10**	19.7*	0.02*	5.8*	52.0*	0.39*	3.0*	11.1*	0.18*	0.9*	0.11*	55*	52*	n.b.	10*	<5*	17*	59*	56*	8*	345*	9*	
GP	R7703	n.b.	0.69	14.2	10.1	0.15	1.8	2.0	n.b.	3.5	0.18	106	71	<4	n.b.	19	134	65	310	<4	387	<5	
GP	R7706	75.5*	0.50	9.3	5.5	0.09	1.3	1.5	0.08*	2.1	0.13	76	51	<4	n.b.	14	9	57	158	<4	295	<5	
GP	R7707	n.b.	0.74	15.8	6.8	0.12	2.2	0.9	n.b.	2.7	0.10	136	85	<4	n.b.	32	256	49	147	<4	409	<5	
GP	OR7725	65.7*	0.68	14.5	9.2	0.10	1.8	1.3	0.63*	2.5	0.14	123	87	<4	n.b.	34	575	89	123	<4	388	<5	
GP	OR7726	n.b.	0.62	12.4	10.7	0.15	1.8	2.3	n.b.	2.7	0.24	104	78	<4	n.b.	32	316	105	196	<4	425	<5	
GP	U7766	n.b.	0.82	16.5	10.4	0.23	2.3	1.8	n.b.	2.4	0.14	164	114	<4	n.b.	40	77	85	209	<4	284	<5	
GP	U7767	n.b.	0.83	16.2	8.9	0.19	2.3	1.3	n.b.	2.8	0.15	156	113	<4	n.b.	44	95	101	208	<4	286	<5	
GP	F7800	71.8*	0.62	10.7	10.2	0.08	1.3	1.2	0.34*	1.4	0.07	97	75	<4	n.b.	20	100	50	212	<4	186	290	
GP	KR6**	46.3*	1.47*	27.1*	14.8*	0.13*	1.6*	4.6*	0.51*	1.3*	0.40*	269*	226*	n.b.	133*	73*	33*	667*	269*	15*	1003*	16*	
GP	KR7**	44.7*	1.13*	33.9*	10.3*	0.13*	1.2*	3.0*	0.78*	2.5*	0.44*	236*	136*	n.b.	100*	338*	13*	1210*	264*	10*	1501*	4*	
GP	KR8**	72.0*	0.59*	9.9*	9.1*	0.11*	1.7*	2.4*	0.38*	2.0*	0.20*	99*	171*	n.b.	64*	17*	80*	77*	136*	2*	217*	5*	
Erztyp	Lokalität	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Mo	Ba	Pb	
GHE	F3047	12.1*	0.03	0.61	69.8	0.05	0.56	0.38	<0.01*	0.09	0.03	20	5	<4	8*	4	50	43	67	4	761	<5	
GHE	F3089	12.9*	0.03	1.15	66.1	0.12	0.51	0.64	<0.01*	0.19	0.05	26	8	<4	10*	5	150	56	91	46	100	26	
HE	F7798	12.0*	0.02	1.08	81.0	0.04	0.32	0.40	<0.01*	0.30	0.02	23	13	<4	10*	4	219	34	145	65	62	16	
HE	KR1**	3.3*	0.01*	0.60*	84.5*	0.10	0.20*	0.09*	<0.01*	0.10	<0.01*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
GHE	KR2***	3.3*	0.03*	2.3*	83.3*	0.20*	0.30*	0.06*	<0.01*	0.20*	0.02*	70*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	140*	n.b.	
SE	KR3***	<0.1*	<0.01*	0.01*	10.4*	0.15*	11.24*	36.73*	0.03	0.01*	0.02*	<5*	<6*	n.b.	<4*	7*	6*	91*	12*	<1*	24*	13*	
SE, konz.	KR3a***	0.1*	<0.01*	0.02*	29.2*	0.04*	4.17*	10.63*	0.08	0.01*	0.02*	<5*	<6*	n.b.	5*	<5*	11*	30*	11*	<1*	35*	43*	

Ergebnisse der ICP-OES-Analysen bzw. der RFA-Analysen (mit \* gekennzeichnet)

FS = Fließschlacke; HS = Heterogene Schlacke; GP = Glasig-poröses Material; GHE = Goethit-Hämatit-Erz; HE = Hämatit-Erz; SE = Sulfid-Erz; R = Roßhaupten; OR = Osterreich; U = Ulrichsbrücke; F = Frauensee; KR\*\* = Tegelberg; KR\*\*\* = Erzgrube (KR = Analysen von H. Krumm, Frankfurt); n.b. = kein Analysewert vorhanden.

zweiwertiges Eisen enthalten dürften. Die nicht in Tabelle 3 aufgeführten Elemente Ag, As, Cd, Sb und Tl lagen unter bzw. in wenigen Fällen im Bereich der Nachweisgrenze (ICP/OES-Messungen).

Fließschlacken und heterogene Schlacken weisen grundsätzlich eine ähnliche, aber stark schwankende chemische Zusammensetzung auf. Die durchschnittlichen Fe-Gehalte der Schlacken liegen bei  $49 \pm 10$  % FeO mit Maximalwerten bis 68 % FeO und sind charakteristisch für Rennfeuerschlacken (FRÖHLICH, 1984, 1987; SPERL, 1980; KRONZ, 1997; YAÇLIN & HAUPTMANN, 1995). Sie sprechen für den Einsatz hochwertiger Erze, um ein Ausbringen von Eisen überhaupt zu ermöglichen. Im Gegensatz dazu liegen die CaO-Gehalte, die zwischen ca. 1 und 16 % streuen und im Durchschnitt  $6.7 \pm 4.3$  % aufweisen, z.T. erheblich höher als in den meisten Rennfeuerschlacken aus anderen Gegenden (vgl. FREI, 1966; FRÖHLICH, 1987; SPERL, 1980; KRONZ, 1997 u.a.). Sie stehen in Einklang mit dem Auftreten von Ca-Olivinen und Pyroxen und deuten auf calciumreiche Einsatzstoffe hin.

Das glasig-poröse Material, das auch chemisch eine völlig eigenständige Gruppe bildet, enthält selten mehr als 10 % FeO, dafür sehr hohe  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalte. Die extremen Schwankungen von ca. 45 bis 75 %  $\text{SiO}_2$  und entsprechend ca. 34 bis 8 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gehen mit unterschiedlichen Anteilen an Quarz im mikroskopischen Bild einher. Das glasig-poröse Material weist hinsichtlich der Haupt- und Spurenelementzusammensetzung, abgesehen von einem etwas erhöhten Eisengehalt, typische Konzentrationen von durchschnittlichen siliziklastischen Sedimentgesteinen auf (WEDEPOHL, 1969, 1978). Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung und das Gefüge dieses Materials entspricht etwa einem sandigen Lehm, der entweder als Ofenauskleidung oder direkt als Ofenbaumaterial verwendet worden sein muss.

Eisenverhüttungsschlacken können mit dem Vierstoffsystem  $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  beschrieben werden (KEESMANN et al., 1982). Dieses System ist allerdings nicht optimal an die realen Bedingungen angepasst, da nicht alle phasenbildenden Elemente berücksichtigt werden. Insbesondere fehlen  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{MgO}$ , die z.B. in den Phasen Leucit und Olivin vorkommen. Dennoch ist das Vierstoffsystem zur Orientierung gut geeignet und wird in zahlreichen Arbeiten verwendet (z.B. YAÇLIN & HAUPTMANN, 1995). Prozesstemperaturen, die man aus den Phasendiagrammen herauslesen kann, dürfen jedoch bestenfalls als Maximaltemperaturen verwendet werden, da die Eutektika in Multi-Element-Systemen noch bei wesentlich tieferen Temperaturen liegen können (vgl. GOLDENBERG, 1996; KRONZ, 1997). Die meisten hier untersuchten Schlacken liegen in der Projektion  $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  mit ihrer pauschalchemischen Zusammensetzung im Stabilitätsfeld von Fayalit (Abb. 17). Die relativ hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehalte in 4 heterogenen Schlackenproben gehen auf Kontaminationen mit Ofenwandmaterial zurück. Wenn auch die ablesbaren Temperaturen von ca. 1100 bis 1300°C nicht den realen Prozesstemperaturen entsprechen müssen, so fällt doch auf, dass sich die Schlacken nahe bei den Temperaturminima des Schmelzsystems konzentrieren. Dass die Werte nicht genau im eutektischen Bereich liegen, deckt sich mit den Ergebnissen anderer Arbeiten und ist auf eine Verzerrung der Projektion im Verhältnis zu den realen Verhältnissen zurückzuführen ist (vgl. KRONZ, 1997).

In Übereinstimmung mit den makroskopischen und den phasenanalytischen Untersuchungen sind die Fließschlacken auch chemisch relativ einheitlich, während die Zusammensetzung der heterogenen Schlacken ein großes Feld zwischen den Erzen und den Ofenwandproben einnimmt (Abb. 17). Im Unterschied zu den Schlacken sind im glasig-porösen Material die Elementkonzentrationen im-

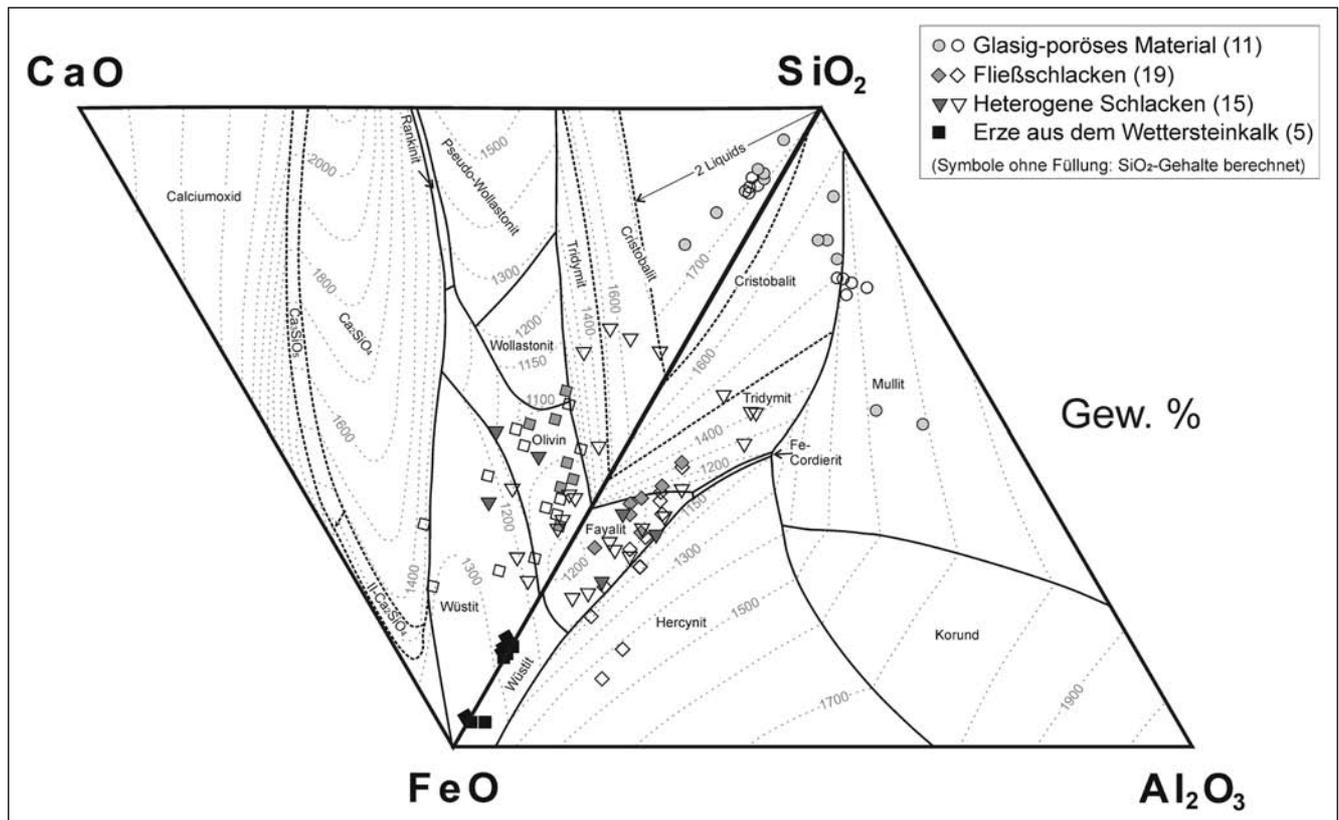


Abb. 17. Projektion der pauschalchemischen Zusammensetzung [Gew.-%] in das System  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO} - \text{CaO}$ . Bei Proben, bei denen nur ICP-OES-Analysen zur Verfügung standen, wurden  $\text{SiO}_2$ -Gehalte berechnet. Phasendiagramme nach OSBORN & MUJAN (1960).

mer unabhängig vom Eisengehalt. Dies belegt neben der mineralogischen Zusammensetzung und dem Gefüge, dass dieses Material kein Produkt aus der Schmelze sein kann und die Deutung als Teil der Ofenwand gerechtfertigt ist.

#### 4.2.5. Das Alter der Schlackenhalden

Um nicht länger auf Spekulationen angewiesen zu sein, wurde versucht, das Entstehungsalter einiger Halden mit Hilfe von <sup>14</sup>C-Datierungen an Holzkohleproben direkt zu ermitteln. Man bestimmt bei dieser Methode das Alter des Holzes, das für die Verhüttung benutzt wurde und erhält damit gleichzeitig ein Maximalalter für den Schmelzplatz. Da im Mittelalter als Brennstoff häufig Schwachholz bevorzugt wurde (LUDEMANN, 1999 a), scheinen die Schlackenhaldden in der Regel nicht wesentlich jünger zu sein als die datierte Holzkohle. Da in den Halden z.T. nur sehr wenig Holzkohle gefunden wurde, sind die Fehler mit ± 55 bis 75 Jahren relativ groß, hinsichtlich der Fragestellung jedoch akzeptabel. Das Datierungsverfahren liefert keine exakten Altersdaten, sondern Zeitintervalle (hier ca. 200 bis 300 Jahre), die Wahrscheinlichkeitsbereiche darstellen und dementsprechend vorsichtig interpretiert werden müssen.

Alle vier untersuchten Schlackenhaldden können ins Mittelalter datiert werden, in die Zeit zwischen dem 7. und dem 14. Jahrhundert n. Chr. (Abb. 18). Die Halde an der Ulrichsbrücke stammt aus dem Hochmittelalter, die Schlackenhaldden bei Osterreinen und am Frauensee aus dem frühen Mittelalter. Mit einem Alter um etwa 700 n. Chr. scheint Roßhaupten, der größte Schlackenplatz der Region, auch der älteste zu sein. Allerdings muss man bei einer Fundstelle dieser Dimension davon ausgehen, dass hier über einen längeren Zeitraum hinweg Eisenerz verhüttet wurde, u.U. auch in verschiedenen Phasen. Die ehemaligen Halden sind aber nicht mehr vorhanden und wohl schon im Mittelalter eingeebnet worden (s. oben). Die Datierung von Holzkohlestücken aus einem gestörten Schlackenhorizont kann daher nur ein Alter liefern, das bestenfalls einen Mittelwert des Betriebszeitraumes darstellt. Sehr wahrscheinlich wurde in Roßhaupten um 700 n. Chr. Eisenerz verhüttet, möglicherweise aber auch schon in der Völkerwanderungszeit und noch bis ins hohe Mittelalter. Römischer oder noch älterer Bergbau ist hingegen bisher nicht nachzuweisen. Eine keltische Eisenverhüttung ist auch deshalb nicht wahrscheinlich, weil keltische Rennöfen fast überall in Mitteleuropa durch eingetiefte Schlackengruben gekennzeichnet sind, die bis 100 kg schwere Schlackenklötze oder

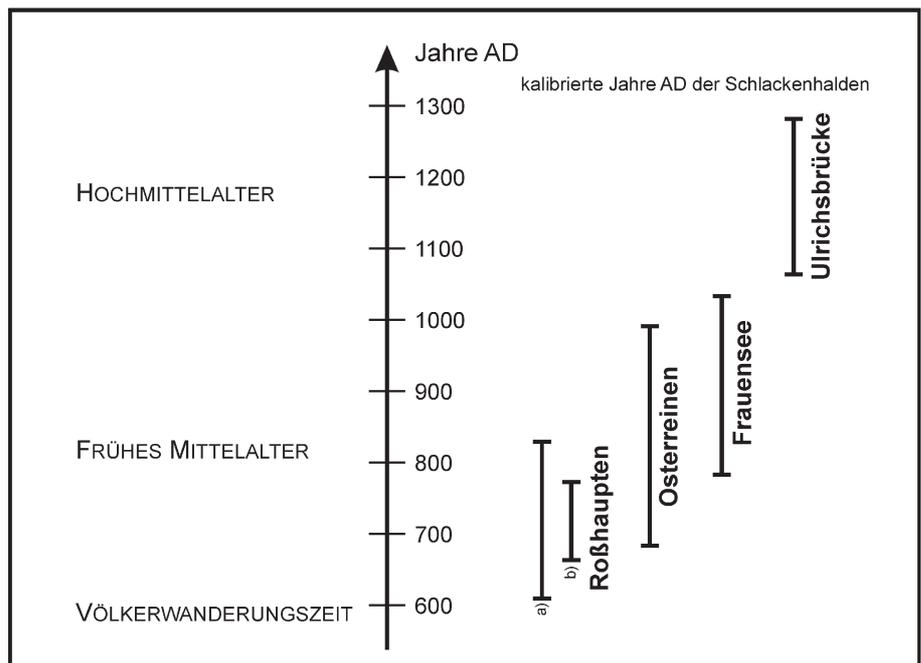
„Ofensäue“ hinterlassen (PLEINER, 2000; GASSMANN, 1999; KEMPA, 1998). Solche Schlackenklötze wurden im Füssener Raum bisher nirgends gefunden.

## 5. Die wichtigsten Überlegungen zur Füssener Eisengewinnung

### 5.1. Überlegungen zum Erzabbau

Ein historischer Bergbau hinterlässt Spuren in der Landschaft, die selbst noch nach langer Zeit erkennbar sind, z.B. Verhaue, Pingen, Schächte, Mundlöcher von Stollen und Abraumhaldden. Nach diesen Anzeichen sucht man allerdings in den Gegenden der Füssener Berge, in denen nach Literaturangaben Bergbau betrieben worden sein soll, meist vergeblich. In der Regel findet man dort im Bereich des vererzten Wettersteinkalkes eine sehr unregelmäßige Geländeoberfläche mit zahlreichen Senken und Löchern (Abb. 19). Die Wände dieser Hohlräume sind meist stark zerfurcht und mit Karren und Spalten versehen, zeigen stellenweise aber auch vollkommen glatte Oberflächen und dürften in den meisten Fällen natürliche Karsthöhlen darstellen, die gelegentlich etwas erweitert wurden. Abgesehen von vereinzelt undeutlichen Bearbeitungsspuren, z.B. im Inneren des Magnusstollens am Säuling, fehlen in den stollenähnlichen Höhlen die für den mittelalterlichen Bergbau charakteristischen Schrämmspuren, die durch den Gebrauch von Schlegel und Eisen entstehen. Glatte, schalig absondernde Flächen, wie sie in typischer Weise durch Feuersetzen entstehen, sind gleichfalls nur in ganz wenigen Fällen nachweisbar. Die weit verbreiteten Karstgebiete, z.B. an der Altenberger Alpe, sehen zwar manchmal Schürf- oder Trichtergrubenfeldern sehr ähnlich, wie sie auf der Albhochfläche und in der Augsburgener Gegend vorkommen (KEMPA, 1998; FREI, 1966). Doch trichterförmige Schürfgruben unterscheiden sich von natürlich entstandenen Dolinen immer dadurch, dass unmittelbar neben den Hohlformen auch Vollformen auftreten, ringförmige oder unregelmäßige Wälle aus taubem Aushubma-

Abb. 18. Die Ergebnisse der <sup>14</sup>C-Datierungen an Holzkohleproben aus den Schlackenhaldden am Frauensee, bei der Ulrichsbrücke und bei Osterreinen sowie aus dem Schlackenhorizont in Roßhaupten. Vier Messungen wurden mit konventioneller <sup>14</sup>C-Methode durchgeführt, eine Messung mit der AMS-<sup>14</sup>C-Methode. Kl = Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung, HV = <sup>14</sup>C- und <sup>3</sup>H-Laboratorium, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, ETH = Institut für Teilchenphysik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.



Lokalität	Probe Nr.	Labor Nr.	<sup>14</sup> C-Alter (Jahre BP)	Fehler (± 1 s)	d13C ‰ PDB	kalibriertes Alter (Kalender-Alter)	Wahrscheinlichkeit
Frauensee	1I, 1II	KI-4401	konv.	1090±65	-26,16	780 AD <J< 1030 AD	90% (± 1,65 s)
Ulrichsbrücke	2I, 2II	KI-4402	konv.	860±40	-26,38	1060 AD <J< 1280 AD	90% (± 1,65 s)
Osterreinen	3	KI-4403	konv.	1190±75	-25,85	685 AD <J< 995 AD	90% (± 1,65 s)
Roßhaupten b)	14233	HV-22128	konv.	1330±55	-25,3	660 AD <J< 770 AD	97,5% (± 2 s)
Roßhaupten a)	R001	ETH-17764	AMS	1340±65	-21,9±1,2	607 AD <J< 827 AD	96,2% (± 2 s)



Abb. 19.  
Fragwürdige Bergbaus Spuren im Bereich des vererzten oberen Wettersteinkalkes an der Altenberg-Alpe, ca. 1420 m ü. NN. Die unruhige Geländeoberfläche des vererzten und verkarsteten Wettersteinkalkes mit den trichterartigen Vertiefungen sieht auf den ersten Blick einem Schürfgrubenfeld ähnlich. Die dafür typischen kleine Abraumhalden oder -wälle zwischen den Hohlformen fehlen jedoch. Dolinenfelder können exakt so aussehen und sind in vergleichbarer Ausbildung auch in nicht vererztem Wettersteinkalk zu finden.

terial (VOGT-EISENSCHINK, 1987). Solche Abraumhalden sind in den Füssener Bergen nur ganz selten zu finden. Zudem sind Karstfelder nicht auf den vererzten Wettersteinkalk beschränkt, sondern an vielen Stellen im Wettersteinkalk vorhanden, beispielsweise am nördlichen Fuße des Schlagsteins und am Niederstraußbergsattel. Ein Großteil der Mulden und Löcher, die in der Literatur als Pingens oder Schurfächer bezeichnet werden, z.B. an der Altenberger Alpe oder am Frauensee (TAUPITZ, 1954 a; SCHNEIDER & WALDVOGEL, 1964), sind nichts weiter als natürlich entstandene Dolinen und Karsthöhlen, die

bestenfalls gelegentlich noch künstlich etwas erweitert wurden.

Dennoch sind vereinzelt auch eindeutige Spuren eines Erzabbaus vorhanden. Dazu zählen ein handgeschlagenes Bohrloch an der Altenberger Alpe, ein kleiner Haufen aus Erzbrocken bei der Lokalität Erzgrube (WALDVOGEL, 1964) und die Abraumhalde vor der „St.-Mang-Grube“ am Älpleskopf. Die St.-Mang-Grube ist ebenso wie das „Säuling-Bergwerk“ im Klemmtal ein kurzer, etwa 15 m in den Berg reichender Stollen mit Bohr- und Bearbeitungsspuren an den Wänden.

Diese Stollen sind mit Sicherheit im Zuge des Eisenerzabbaus entstanden. Die sichtbaren Bearbeitungsspuren dürften jedoch von einer neuzeitlichen Abbauperiode herühren, die nichts mehr mit den Rennfeuerschlacken zu tun hat. Der nachmittelalterliche Abbau hat wohl meist die älteren Spuren verwischt oder vernichtet, wie es z.B. nachweislich bei den Erzgruben geschehen ist (SCHMITZ, 1842).

Eine weitere Karsthöhle, die vermutlich mit dem von WALDVOGEL (1964) beschriebenen „Schrämmstollen“ identisch ist, befindet sich bei Unterpinswang. Sie ist allerdings nicht im Wettersteinkalk angelegt, sondern folgt Kluftscharen im Hauptdolomit und in rötlichen Jurakalken. Für eine natürliche Entstehung sprechen eindeutig der rundliche Querschnitt der Höhle, dessen Form sich ständig ändert, der abknickende Verlauf, die z.T. vollkommen glatten Wände und das Fehlen jeglicher Schrämmsspuren (Abb. 20). Dennoch deuten vereinzelte Bearbeitungsspuren in der Firste und der unregelmäßig ausgebrochene Eingangsbereich darauf hin, dass einige Stellen der Höhle künstlich erweitert wurden. Möglicherweise wurde hier versucht, die an die Störungszone gebundenen Eisenoxide abzubauen, von denen spärliche Reste noch erhalten sind. Ein Zusammenhang mit den Erzen im Wettersteinkalk ist in diesem Fall jedoch nicht nachgewiesen.

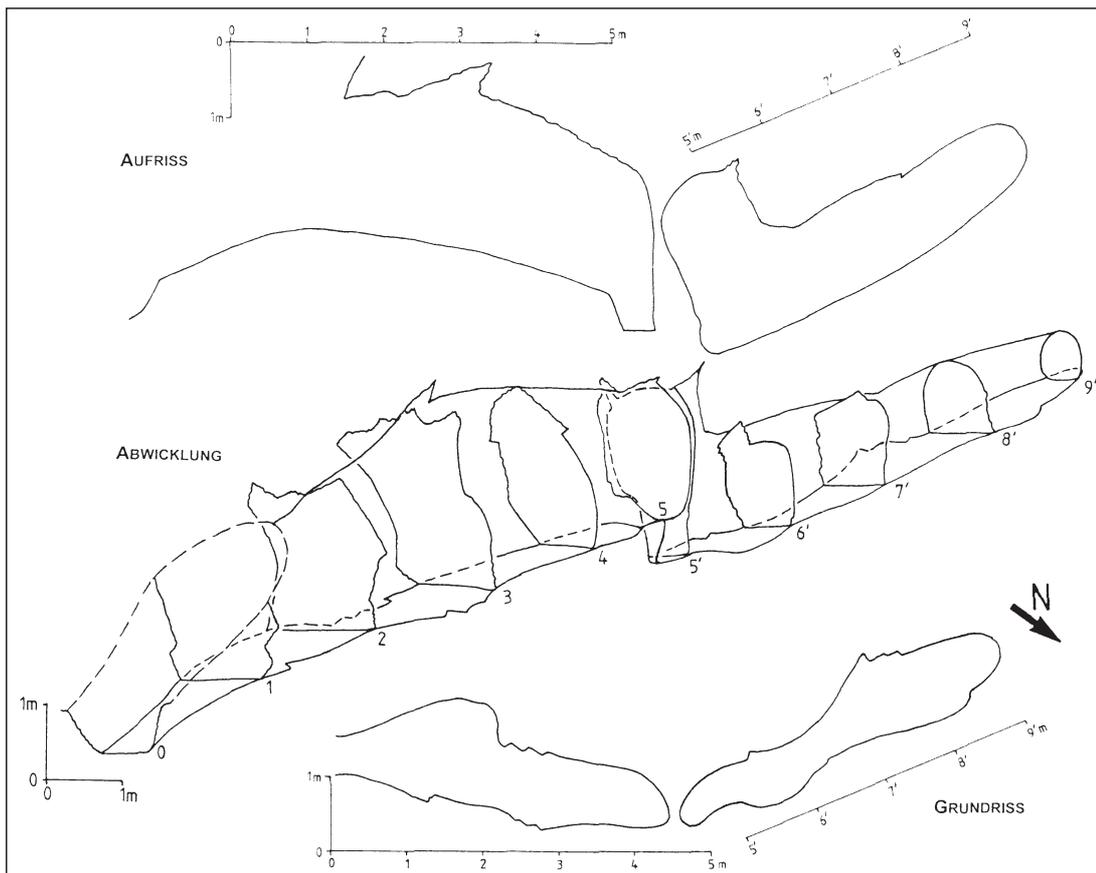


Abb. 20.  
Grundriss, Abwicklung und Aufriss der Karsthöhle bei Unterpinswang, die als potentieller Abbaustollen diskutiert wird. Bei der Abwicklung sind die Querschnitte maßstäblich, der Verlauf der Sohle und der Firste verzerrt.

Insgesamt sind die Abbauspuren im Gelände also sehr vage und es ist nicht gerechtfertigt, von einem „Bergbau“ im klassischen Sinne oder gar von „Bergwerken“ zu sprechen. Als bestes Argument für eine Erzgewinnung sind die offensichtliche Vererzung selbst und die Eisenverhüttungsschlacken anzuführen, die am Frauensee sogar in unmittelbarer Nähe der Erzvorkommen liegen.

Der Erzabbau scheint im Wesentlichen im Absammeln der natürlichen Oberfläche des Wettersteinkalkes bestanden zu haben, die gerade in stark verkarsteten Gebieten ungewöhnlich groß ist. Da die Erze flächenhaft verbreitet sind und sich auf dem Kalk außerdem nur geringmächtige A-C-Böden (Rendzinen) bilden, eignet sich dieses Gelände hervorragend zum einfachen Aufsammeln der Verwitterungserze aus den Karstaschen und -spalten. Bezeichnenderweise spricht auch BAUMANN (1883) in seinem Geschichtsband über das Allgäu vom „Sammeln“ von Eisenerz. Angesichts der unregelmäßigen Verbreitung der Erze und des Fehlens von zusammenhängenden Erzkörpern oder Erzgängen wäre es an den meisten Stellen auch völlig unsinnig gewesen, im Wettersteinkalk Stollen, Schächte oder Verhau anzulegen. Die Gewinnung der Eisenerze scheint also nicht von echten Bergleuten, sondern vermutlich (wie im Oberallgäu) von „Eigenlöhnern“, also von Waldarbeitern oder Bauern im Nebenerwerb ausgeführt worden zu sein (vgl. BÖHNE, 1963). Dafür spricht auch die Tatsache, dass einige Höfe in Schwangau früher ein eigenes Bergrecht besaßen (freundl. Mitt. von Herrn H. PFEIFFER, Schwangau) und an diesen Höfen z.T. sogar kleine Schlackenhalde nachgewiesen werden konnten (Abb. 1).

Die bisher bekannten Schlackenfunde summieren sich zu mehr als 5000 t. Reichen die Erzmengen, die im Wettersteinkalk der Füssener Berge gewinnbar sind, überhaupt aus, um derart große Schlackemengen zu erklären? Bei einer geschätzten Ausbeute von 50 bis 60 % beim Rennfeuerprozess (vgl. NEUMANN, 1954; KRONZ, 1997) muss man mit einer Größenordnung von mindestens 10000 t abgebauten Erzes rechnen. Legt man diese Menge auf die Flächen um, auf denen Erzvorkommen und Abbauspuren belegt sind, so sollte nach einer groben Abschätzung aus jedem Quadratmeter Wettersteinkalk Erz im Kilogramm-Bereich gewonnen worden sein (SCHÖNER, 2000). Verglichen mit den heute auffindbaren Erzmengen scheint diese Zahl sehr hoch zu sein. Da die Erze in der Oxidationszone aber bekanntermaßen fast immer schon zu historischer oder gar prähistorischer Zeit abgebaut wurden und infolgedessen heute weitgehend verschwunden sind (STEUER, 1993), dürften auch die Goethit-Hämatit-Erze in den Füssener Bergen ursprünglich wesentlich massiver angereichert gewesen sein als heute. Vermutlich ist das Erz auch auf deutlich größerer Fläche aufgesammelt worden, als es die spärlichen Abbauspuren heute nahe legen. Wenn alleine im Jahr 1840 bei Abbaueversuchen an der Lokalität Erzgrube 1000 Zentner Erz gewonnen wurden (SCHMITZ, 1842), erscheint ein Abbau von rund 10000 t Erz über einen Zeitraum von mehreren Jahrhunderten im Mittelalter durchaus realistisch. TAUPITZ (1954 a) liegt mit seiner Schätzung von insgesamt über 500.000 t abgebautem Erz wohl um eine Größenordnung zu hoch – als Rohstoff für die mittelalterlichen Schmelzplätze der Füssener Gegend dürften die Erze aber ausgereicht haben.

## 5.2. Überlegungen zur Eisenverhüttung

Die Schmelzplätze legte man offensichtlich nur selten in der Nähe der Erzvorkommen an, sondern zum großen Teil im Alpenvorland. Vermutlich waren die Holzreserven und Holzrechte bzw. die Lage der Köhlereien ausschlaggebend für die Wahl eines Verhüttungsstandortes. Einzig der kleine Verhüttungsplatz am Frauensee wurde unmittelbar

neben den Erzvorkommen angelegt und könnte ein erster Versuch gewesen sein, bei dem die Qualität des Erzes getestet wurde. Die Verteilung der vielen Schlackenhalde im Füssener Raum zeigt, dass das Erz in zahlreichen, meist kleinen Betrieben verhüttet worden ist. Es gab sowohl sehr kleine Schmelzplätze, an denen vielleicht nur ein einziges Mal Erz verhüttet wurde, als auch große Verhüttungsplätze, die mehrmals oder über längere Zeit in Betrieb waren. Die Eisengewinnung dürfte wohl überwiegend zur Deckung des Eigenbedarfes gedient haben. Nur Roßhaupten, das ein bedeutendes Zentrum der Eisenverhüttung gewesen sein muss, passt nicht in dieses Bild und könnte durchaus überregionale Bedeutung gehabt haben.

Wann die Eisenverhüttung im Füssener Raum begonnen hat, können auch die vorliegenden Untersuchungen nicht abschließend klären. Dennoch stimmt nach bisherigen Datierungen der Beginn der Verhüttung im 7. Jahrhundert n. Chr. sehr gut mit der Besiedlungsgeschichte überein. Zwar gab es bereits zur Römerzeit und wohl auch schon früher einige Siedlungen in der Nähe von Füssen und Schwangau, z.B. nördlich des Tegelberges (CZYSZ et al., 1995; BACHRAN, 1993). Doch erst gegen Ende des 6. Jahrhunderts wurde diese Gegend von den Alamannen besiedelt, deren Einwohnerzahl im Laufe des 7. Jahrhunderts stetig zunahm (BACHRAN, 1993). Es bleibt künftigen Untersuchungen vorbehalten zu klären, ob die Alamannen, die das Füssener Land wohl lechtaufwärts kommend besiedelten, die Technologie der Eisenverhüttung aus dem Raum der Schwäbischen Alb mitbrachten, wo bereits zur Völkerwanderungszeit und noch früher Eisen nach dem Rennfeuerprozess verhüttet wurde (KEMPA, 1998). Allerdings sind weder die Schlacken aus dieser frühen Zeit noch die späteren mittelalterlichen Schlacken mit den Verhüttungsprodukten aus den Füssener Rennöfen vergleichbar (siehe YAĞLIN & HAUPTMANN, 1995). In diesem Zusammenhang wäre auch interessant, wann genau und mit welcher Technik die Augsburgische Eisenerze verhüttet wurden, für die man bisher ebenfalls eine mittelalterliche Rennfeuerverhüttung annimmt, ohne sich jedoch auf genauere Untersuchungen oder Datierungen stützen zu können (FREI, 1966). Auch mögliche Beziehungen zur Eisenerzverhüttung im nahegelegenen Grüntengebiet können nur in zukünftigen Studien genauer beleuchtet werden.

Obwohl mangels archäologischer Grabungen nichts über den Ofentyp oder die Ofentypen im Füssener Raum bekannt ist, lassen die Untersuchungen am Verhüttungsmaterial einige Aussagen zu (Abb. 2). Wie die große Menge an Fließschlacken zeigt, müssen auch in der Füssener Gegend Rennöfen mit Schlackenabstich verwendet worden sein, wie sie in manchen Gebieten schon zur Römerzeit zum Einsatz kamen (TYLECOTE, 1992; NEUMANN, 1954). Nach dem Abstich verblieb offensichtlich neben der Luppe und Holzkohleresten auch ein gewisser Anteil der Schmelze im Ofen zurück, der heute in Form der heterogenen Schlacken erhalten ist. Diese findet man oft mit dem glasig-porösen Ofenwandmaterial verbacken. Da im gesamten Füssener Raum nur eine Tondüse gefunden wurde (Fundort Lechstaustufe 1), die als Öffnung für einen Blasebalg gedient haben dürfte, scheint ein solcher nicht zwingend erforderlich gewesen zu sein. Obwohl die Luftzufuhr von Rennöfen vielen Autoren zufolge mit einem Blasebalg erfolgte (z.B. TYLECOTE, 1992; SPERL, 1993; NEUMANN, 1954), reichen auch einfache Öffnungen im unteren Teil eines Ofens aus (GASSMANN, 1999). Die extrem niedrige Viskosität der Schmelze, die durch die Ausbildung der Fließschlacken belegt ist, war für den Ablauf des Rennfeuerprozesses von entscheidender Bedeutung. Sie ist vor allem durch die hohen FeO- und CaO-Gehalte in den Schlacken bedingt.

Zwischen den vier untersuchten Fundplätzen sind weder hinsichtlich des Fundmaterials noch hinsichtlich dessen

chemisch-mineralogischer Zusammensetzung interpretierbare Unterschiede feststellbar. Daher scheinen sich über den bisher belegbaren Zeitraum von ca. 600 Jahren (Abb. 18) keine wesentlichen Änderungen in der Verhüttungstechnik durchgesetzt zu haben, soweit die geringe Probenanzahl diesbezüglich überhaupt eine Aussage zulässt. Lediglich im glasig-porösen Material sind teilweise verschiedene Quarzanteile enthalten, die auf die Verwendung unterschiedlicher Ofenbaumaterialien hinweisen. Während der Quarzgehalt in den Proben vom Frauensee und von der Ulrichsbrücke etwa 20 % ausmacht, erreicht er in den Proben aus Roßhaupten und Osterreinen bis zu 60 % (Tab. 2). Lehm zum Ofenbau kann im untersuchten Gebiet fast überall lokal bezogen werden, sei es von quartären Lockersedimenten, von verwitterten Festgesteinen der Molasse, des Helvetikums, der Flyschzone oder sogar aus den Kalkalpen. Auch das Wasser, das zum Bau eines Ofens benötigt wird, ist überall in erreichbarer Nähe. Fast alle Schlackenfunde liegen in der Nähe von einem Gewässer, wenn auch manchmal nur an einem kleinen Rinnsal.

Vergleicht man nun die chemische Zusammensetzung der untersuchten Proben, so wird deutlich, dass aus den neben- und spurenelementarmen Erzen alleine wohl kaum die vielfältig zusammengesetzten Schlacken entstehen konnten. Zudem belegen die kotektischen Gefüge, die teilweise schon sehr früh in der Kristallisationsabfolge auftreten, dass die Schlacken im Bereich von Temperaturminima des Schmelzsystems kristallisiert sind. Die chemische Zusammensetzung der Schlacken war also offenbar nicht weit von der idealen Schmelzzusammensetzung entfernt. Die Bruchstücke des glasig-porösen Ofenwandmaterials, die immer wieder in die Schlacken eingeschlossen sind, legen nahe, dass der Ofenwand selbst im Schmelzprozess eine gewisse Bedeutung zukam. Die Schlacken projizieren in der Teilprojektion  $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  genau zwischen der Zusammensetzung der Erze und der Ofenwandproben und könnten somit durch Mischung dieser beiden Materialien entstanden sein (Abb. 17). In der Teilprojektion  $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{CaO}$  zeigt sich jedoch ein erhöhter CaO-Gehalt der Schlacken im Vergleich zu den Erzen und Ofenwandpro-

ben (Abb. 17). Die teilweise hohen Calciumgehalte in den Schlacken müssen durch eine zusätzliche karbonatreiche Komponente verursacht worden sein. Da die Erze aus dem Wettersteinkalk stammen, ist am wahrscheinlichsten, dass nicht nur reine Goethit-Hämatit-Erze, sondern auch verzerrte Karbonatbrocken und/oder ankeritische Erze verwendet wurden. Die positive lineare Korrelation zwischen Calcium, Magnesium und Strontium in den Schlacken (Abb. 21) erhärtet diesen Verdacht, denn alle drei Elemente sind im Wettersteinkalk, im Vergleich zu den Schlacken, sehr hoch konzentriert (KRANZ, 1976).

Versucht man die Materialumsätze im Rennofen abzuschätzen, so muss man nach den oben ausgeführten Überlegungen die Gleichung

$$\text{Erze} + \text{Nebengestein} + \text{Teile der Ofenwand} + \text{Holzkohlenasche} = \text{Schlacken} + \text{Metall}$$

ansetzen. Die Zusammensetzung der Erze, der Schlacken und der Ofenwand ist durch die vorliegenden Untersuchungen weitgehend bekannt und als Zusammensetzung des Metalls kann für eine Abschätzung vereinfacht 100 % Fe angenommen werden. Bei einem geschätzten Ausbringen von 60 % des Eisengehaltes des Erzes (vgl. SPERL, 1993; KRANZ, 1997) müssten nach dieser Rechnung etwa 14 kg Ofenwand pro 100 kg Erz abschmelzen, um den Siliziumhaushalt auszugleichen (vgl. SCHÖNER, 2000). Das würde bei einem Ofendurchmesser von 50 cm (TYLECOTE, 1992) und einer Reaktionshöhe von ebenfalls 50 cm einem zylindrischen Mantel von weniger als 5 cm entsprechen. Gleichzeitig wären zum Ausgleich der Massenbilanz jeweils etwa 4 kg Calcit und Dolomit nötig, was wiederum auf die Verhüttung der eisenreichen Dolomite und Ankerite hindeutet. Während nach zahlreichen Autoren beim Rennfeuerprozess keine Zuschlagstoffe verwendet wurden (z.B. AL-MUSSAWY & KEESMANN, 1984; DILL et al., 1995; TYLECOTE, 1992), sprechen andere von gezielten Quarzsand- oder Karbonatzuschlägen (YALÇIN & HAUPTMANN, 1995; MOESTA, 1986; FISCHER & HAUNER, 1987; FEHR, 2000). Zuschlagstoffe im strengen Sinn, die man bewusst und in definierter Menge zur Verbesserung der Prozesseigenschaften zugegeben hat, waren für die Füssener Eisenver-

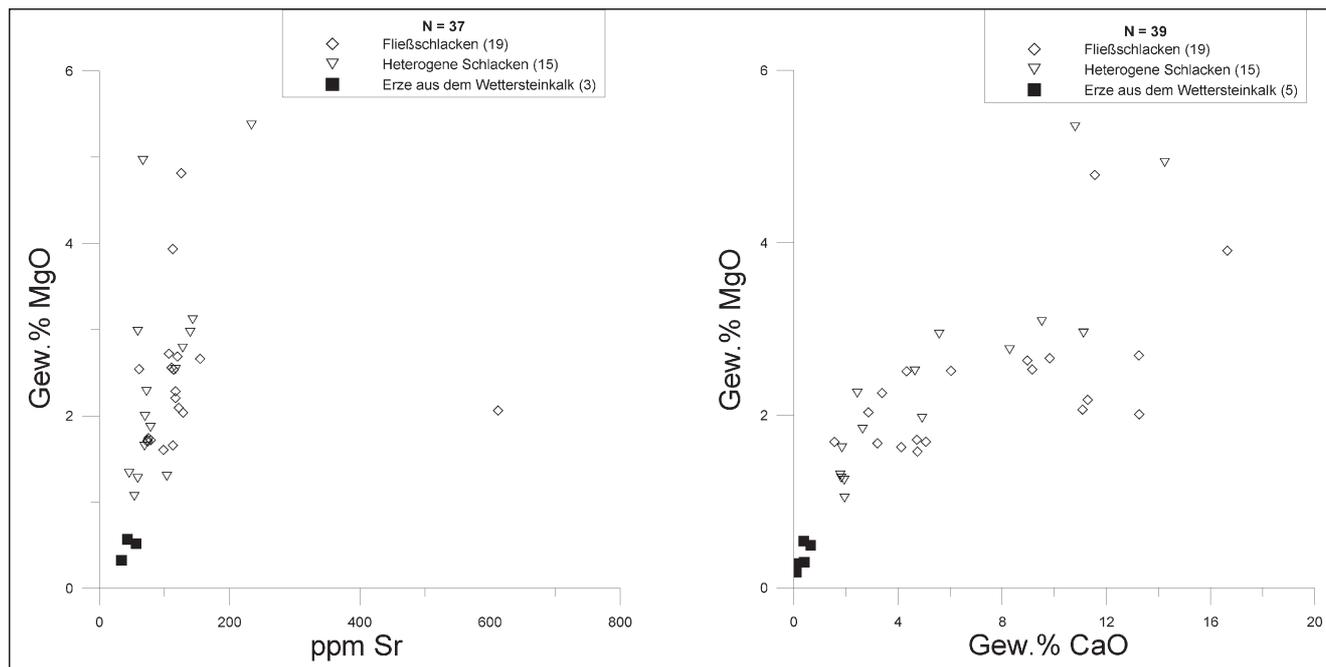


Abb. 21.

MgO-Sr- und MgO-CaO-Verhältnisse der Füssener Schlacken und der Eisenerze aus dem Wettersteinkalk.

Deutlich sind die niedrigen Elementkonzentrationen in den Erzen und die jeweils positive Korrelation der Elemente in den Schlacken erkennbar, die darauf hindeutet, dass alle drei Elemente aus einer relativ Ca-Mg-Sr-reichen Quelle stammen. Dabei handelt es sich am wahrscheinlichsten um das karbonatische Nebengestein der Eisenerze aus dem Wettersteinkalk.

hüttung eigentlich nicht nötig. Der sehr stark schwankende Karbonatgehalt in den Schlacken deutet nicht unbedingt auf eine gezielte Zugabe von Kalk oder Dolomit hin. Allerdings bestätigen die vorliegenden Untersuchungen die Ergebnisse anderer Autoren, nach denen die teilweise abschmelzende Ofenwand eine wichtige Komponente zur Bildung silikatischer Schlacken ist, wenn die Erze selbst keine ideale Zusammensetzung besitzen (z.B. KRONZ, 1997; KLEIN, 1993; GOLDENBERG, 1996). Nicht zuletzt wird dies auch durch die große Menge der Ofenwandfragmente belegt, die in den Schlackenhalde gefunden werden kann. Ein guter Beleg dafür, dass sich in der Schmelze ein nahezu optimaler Chemismus hinsichtlich der Schmelztemperaturen einstellte, sind die häufigen kotektischen Gefüge in den Schlacken. Diese Argumente sprechen daher – trotz der scheinbar einfachen Rennfeuertechnik – für ein sehr ausgereiftes Verhüttungsverfahren.

Neue und noch detailliertere mineralogisch-geochemische Untersuchungen an weiteren Schlackenhalde der Füssener Gegend und aus dem großen Schlackenhorizont in Roßhaupten wären wünschenswert, um genauere Aussagen über die Verhüttungstechnik und deren mögliche Entwicklung über die lange Periode der Eisenverhüttung hin treffen zu können. Vor allem aber müssten die Verhüttungsplätze archäologisch untersucht und noch genauer datiert werden, um Kenntnisse über deren Aufbau, Betriebsdauer und Alter zu gewinnen.

## 6. Schlussfolgerungen

Die Spuren des Eisenerzabbaus und die etwa 40 bisher bekannten Schlackenfundstellen mit insgesamt über 5000 t Verhüttungsmaterial zeugen von einer mittelalterlichen Eisenproduktion, die über Jahrhunderte hinweg überwiegend in kleinem Umfang betrieben wurde. Als Rohstoff dienten Goethit-Hämatit-Erze aus dem Oberen Wettersteinkalk der Füssener Berge, die durch die Verwitterung von Eisensulfiden und -karbonaten entstanden und in Karsthöhlräumen angereichert sind. Die Erze wurden wohl nur selten von echten Bergleuten, sondern eher von Waldarbeitern oder Bauern im Nebenerwerb („Eigenlöhner“) durch bloßes Aufsammeln oder kleinräumigen Abbau mit einfachsten Mitteln gewonnen. Bei den häufig in der Literatur erwähnten „Stollen“ und „Pingen“ scheint es sich dagegen meist um natürlich entstandene Karsthöhlen und -dolen zu handeln, die abschnittsweise zur Erzgewinnung erweitert worden sind.

Die Schmelzplätze legte man meist im Alpenvorland und nur selten in der Nähe der Erzvorkommen an. Ursache dafür waren vermutlich Holzreserven oder Holzrechte, denn zur Verhüttung benötigte man größere Mengen an Holzkohle als an Eisenerz. Viele kleine Schlackenhalde, die von einem einzigen Verhüttungsprozess stammen könnten und wohl zur Deckung des Eigenbedarfes dienten, sind im Füssener Raum weit verbreitet. Einige größere Halde mit z.T. über 100 t Schlacke und vor allem der sehr voluminöse Schlackenhorizont unter der Ortschaft Roßhaupten zeigen, dass an einigen Standorten auch über längere Zeit hinweg Eisenerz verhüttet worden ist.

Die Eisengewinnung wurde, wie die unterschiedlichen Verhüttungsprodukte zeigen, durch Reduktion der Fe-Oxide mittels Holzkohle in Rennöfen durchgeführt, die mit einer Möglichkeit zum Schlackenabstich, aber ohne eingetiefte Ofengrube ausgestattet waren. Die strukturelle wie chemische Ähnlichkeit der Verhüttungsprodukte an den bekannten Schmelzplätzen im Füssener Raum spricht dafür, dass die Verhüttung mit ähnlichen Methoden, an den gleichen Erzen und im gleichen Zeitraum durchgeführt worden ist.

Nach den bisher vorliegenden <sup>14</sup>C-Datierungen zu urteilen, die alle an Holzkohleproben aus insgesamt 4 verschie-

denen Schlackenhalde durchgeführt worden sind, hat die Verhüttung der Eisenerze in der ausgehenden Völkerwanderungszeit (7. Jahrhundert) begonnen und ist 600 Jahre lang bis mindestens ins Hochmittelalter (14. Jahrhundert) fortgesetzt worden. Die Kenntnis der Eisenproduktion im Rennofen muss über diese Zeitspanne hinweg von Generation zu Generation weitergegeben worden sein, ohne dass sich die Verhüttungstechnik dabei grundlegend geändert hätte. Ob sich dabei im Detail technologische Entwicklungen durchgesetzt haben, können allerdings erst künftige Untersuchungen an einer deutlich größeren Probenanzahl zusammen mit weiteren Datierungen zeigen. Der Rennfeuerprozess scheint für die Verhältnisse der damaligen Zeit ein ausgereiftes Verfahren gewesen zu sein, bei dem neben den Erzen selbst auch Teile des Nebengesteins und der Ofenwand wichtige Komponenten bildeten. Mit einer längeren Unterbrechung der Eisenverhüttung in diesen 600 Jahren, die mit Sicherheit zu einem Abreißen der Tradition geführt hätte, ist deshalb nicht zu rechnen.

Gegen Ende des Mittelalters, als sich mit der Einführung der Wasserkraft bei der Verhüttung ein grundlegender Wandel in der Eisenhüttentechnik anbahnte, kam nach den bisherigen Daten die Rennfeuerverhüttung im Füssener Gebiet zum Erliegen, bevor modernere Verhüttungsverfahren eingeführt werden konnten. Dadurch sind hier viele der alten Schlackenhalde mit ihren eisenreichen Verhüttungsprodukten erhalten geblieben, die anderenorts quantitativ abgetragen und in moderneren Stuck- und Hochöfen erneut verhüttet wurden.

## Dank

Die Durchführung des umfangreichen Untersuchungsprogrammes war nur möglich, weil das Projekt von mehreren Seiten ideell und finanziell gefördert wurde. Die ICP-Analysen konnten von Robert SCHÖNER kostenlos im Labor des Elektroschmelzwerkes in Kempten durchgeführt werden, unter Anleitung des Laborleiters Dipl.-Chem. Jürgen HASSLER und Dipl.-Geol. Dr. Otto FÖRSTER. Diese Möglichkeit hatte sich über die Vermittlung von Herrn Dipl.-Ing. Dr. Dietrich LANGE und durch die grundsätzliche Bereitschaft des Werksleiters Herrn Dipl.-Ing. Rainer ROMPELTEN eröffnet. Für die dadurch notwendigen längeren Aufenthalte in Kempten stellte die Stadt Kempten eine kostenlose Übernachtungsmöglichkeit für Robert SCHÖNER zur Verfügung. Eine Reihe von RFA- und XRD-Analysen wurden freundlicherweise von Herrn Dipl.-Geol. Dr. Albert ULBIG und Isolde RENNSCHMID-ULBIG im Labor der Fa. ERLUS in Neufahrn (Niederbayern) kostenlos durchgeführt. Die Radiokohlenstoff-Datierungen sind großzügigerweise vom Alpenverein Sektion Füssen, von der Gemeinde Roßhaupten, vom Naturwissenschaftlichen Verein für Schwaben in Augsburg, in einem Falle auch privat von Herrn Volker DIEHL (Neuweiler) finanziert worden. Der größte Teil der untersuchten Proben wurde selbst gesammelt. Das Probenmaterial aus Roßhaupten stellten uns Herr Pankratz WALK und Herr Hermann PFEIFFER zur Verfügung.

Allen, die dabei mitgeholfen haben, das Projekt erfolgreich durchzuführen, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Vor allem aber sei Herrn OSTR Peter NASEMANN gedankt, der sich seit Jahren mit dem Bergbau und der Eisenverhüttung im Füssener Land beschäftigt hat und von dem die Anregung zur vorliegenden Arbeit eigentlich ausging. Viele seiner Ideen sind in diese Arbeit eingeflossen.

## Literatur

- AGRICOLA, G. (1556): *De Re Metallica Libri XII*. Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen. – 564 S., zahlr. Abb., Faksimiledruck der Ausgabe von 1953, übersetzt u. bearbeitet von C. SCHIFFNER (1978); Düsseldorf.
- ALBRECHT, I. (1856): *Chronik von Schwangau*. – Unveröff. Manuskript; Schwangau.
- AL-MUSSAWY, S. & KEESMANN, I. (1984): Eisenerze und ihre Verwendung zur Eisengewinnung nach dem Rennfeuer-Verfahren in der Nordpfalz. – *Fortschr. Miner.*, **62**, 4–6, 1 Abb.; Stuttgart.
- AMMAN, G. (1978): *Das Tiroler Oberland*. – 448 S., zahlr. Abb.; Salzburg (Verlag St. Peter).

- BACHRAN, W. (1993): Das alamannische Reihengräberfeld von Schwangau, Landkreis Ostallgäu. – Dissertation an der Univ. Mainz, 205 S.; Mainz.
- BAUER, G. (1950/51): Schlackenfunde im Füssener Land. – *Alt Füssen*, **16** (ohne Seitenzahlen); Füssen.
- BAUER, G. (1957): Geschichtliches aus Roßhaupten und seiner Umgebung. – *Alt Füssen*, **18**, 30–35; Füssen.
- BAUMANN, F.L. (1883): Die Geschichte des Allgäus, Bd. 2 und 3. – 774/725 S., zahlr. Abb.; Kempten (Kösel).
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996): Geologische Karte von Bayern 1: 500000. – 4. Aufl., mit Erläuterungen; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BIELININ, K. (1976): Eingetiefte Rennöfen der frühgeschichtlichen Eisenverhüttung in Europa. – *Archaeologica Austriaca*, Festschrift für Richard Pittioni II, Beiheft. **14**, 13–28, 9 Abb.; Wien.
- BÖHM, R. (1994): Der Lech – eine Lebensader in Füssens Geschichte. – In: NASEMANN, P. (1994): Lebensraum Füssener Lech – Eine kleine Heimatkunde, 107 S., zahlr. Abb.; Füssen (DAV Sektion Füssen).
- BÖHNE, C. (1963): Aus der Geschichte des Hüttenwerkes Sonthofen. – 44 S., 24 Abb., 2 Tab.; Sonthofen (BHS).
- BRIGO, L., KOSTELKA, L., OMENETTO, P., SCHNEIDER, H.J., SCHROLL, E., SCHULZ, O. & ŠTRUCL, I. (1977): Comparative Reflections on Four Alpine Pb-Zn Deposits. – In: KLEMM, D.D. & SCHNEIDER, H.J. [Hrsg.] (1977): Time- and Strata-Bound Ore Deposits, 273–293, 4 Abb.; Berlin etc. (Springer).
- CLAR, E. (1954): Über die Herkunft der Ostalpinen Vererzung. – *Geol. Rdsch.*, **42**, 107–127, 1 Abb.; Stuttgart.
- COUDURIER, L., HOPKINS, D.W. & WILKOMIRSKY, I. (1985): Fundamentals of Metallurgical Processes. – 2. Aufl., 404 S., 160 Abb., 43 Tab.; Oxford etc. (Pergamon).
- CZYSZ, W., DIETZ, K.-H., FISCHER, T. & KELLNER, H.-J. (1995): Die Römer in Bayern. – 594 S.; Stuttgart (Konrad-Theiss).
- DILL, H.G., FROBEL, B. & GEYH, M.A. (1995): Zum Alter des Eisenbergbaus im nordbayerischen Grundgebirge mit Hilfe der Schlackendatierung. – *Bergbau*, **95**(2), 83–86, 5 Abb., 1 Tab.; Gütersloh.
- ENDERS, P. (1976): Beiträge zur Lithofazies und Paläogeographie des Wettersteinkalkes der Nördlichen Kalkalpen zwischen Isar und Lech. – Dissertation an der Techn. Univ. München, 114 S., 48 Abb., 1 geol. Kt., 6 Beil.; München.
- ETTEL, R. (1971): Geschichte der Stadt Füssen. – 411 S., zahlr. Abb.; Füssen (Stadt Füssen).
- ESSLINGER, Ch. (1999): Geologie des Falkensteinzuges bei Füssen mit dem Schwerpunkt Gipsauslaugung im Faulenbachtal. – Unveröff. Diplomarbeit an der Techn. Univ. München, 152 S., 6 Abb., 14 Taf., 5 Beil.; München.
- FEHR, K.T. (2000): Mineralogische und geochemische Untersuchungen hochmittelalterlicher Eisenschlacken von Sulzberg, Allgäu. – *Münchner Geol. Hefte*, A, **28**, 275–283; München.
- FENEBERG, F. (2002): Untersuchungen zur Lithostratigraphie, Genese und Ingenieurgeologie der alttertiären Gesteine des Theresienstollens am Grünten (Allgäuer Helvetikum). – Unveröff. Diplomarbeit an der Techn. Univ. München, 55 S., 22 Abb., 4 Beil.; München.
- FISCHER, Th. & HAUNER, U. (1987): Die spätkeltische Industriesiedlung Berching-Pollanten aus archäologischer und geowissenschaftlicher Sicht. – In: Die Oberpfalz, ein europäisches Eisenzentrum, Schriftenreihe des Bergbau- und Industriemuseums Ostbayern, **12**(1), S. 39–58, 20 Abb.; Amberg (Bergbau- und Industriemuseum Ostbayern).
- FISCHER, W. (1961): Gesteins- und Lagerstättenbildung im Wechsel der wissenschaftlichen Anschauung. – 529 S., 12 Abb., 32 Tab., 12 Taf., 4 Beil.; Stuttgart (Schweizerbart).
- FRANK, M., GROSCOPF, P., GUDDEN, H., HALBACH, P., HEGENBERGER, W., SAUER, K., SIMON, P., WILD, H. & ZIEGLER, J.H. (1975): Sedimentäre Eisenerze in Süddeutschland. – *Geol. Jb.*, D, **10**, 3–280, 70 Abb., 27 Tab., 7 Taf.; Hannover.
- FREI, H. (1966): Der frühe Eisenerzbergbau und seine Geländespuren im nördlichen Alpenvorland. – *Münchner Geogr. Hefte*, **29**, 89 S., 11 Abb., 4 Taf., 3 Tab., 4 Beil.; Kallmünz üb. Regensburg.
- FRÖHLICH, F. (1984): Chemische und mineralogische Untersuchungen an einigen frühgeschichtlichen und mittelalterlichen Eisenschlacken Bayerns. – *Acta Albertina Ratisbonensia*, **42**, 33–52, 8 Abb., 12 Tab.; Regensburg.
- FRÖHLICH, F., ROSE, D. & ENDLICHER, G. (1987): Mineralogische Typisierung mittelalterlicher Eisenschlacken aus der Grabung im Regensburger Dom. – In: Die Oberpfalz, ein europäisches Eisenzentrum, Schriftenreihe des Bergbau- und Industriemuseums Ostbayern, **12**(1), 59–70, 13 Abb., 6 Tab.; Amberg.
- GASSMANN, G. (1993): Neuere Untersuchungen zur vor- und frühgeschichtlichen Eisengewinnung im südlichen Oberrheingebiet. – In: STEUER, H. & ZIMMERMANN, U. [Hrsg.] (1993): Montanarchäologie in Europa, Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990, Archäologie und Geschichte, Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, **4**, 497–504, 8 Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).
- GASSMANN, G. (1998): Spurensuche: Reste keltischer Eisenverhüttungsanlagen in Baden-Württemberg. – *Denkmalpflege in Baden-Württemberg*, Nachrichtenblatt des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg, **27**(4), 206–211, 6 Abb.; Stuttgart.
- GASSMANN, G. (1999): Keltische Eisenproduktion im Markgräfler Land. – In: LANDES DENKMALAMT BADEN-WÜRTTEMBERG [Hrsg.] (1999): Früher Bergbau im südlichen Schwarzwald, Begleitheft zur Ausstellung des Museums für Ur- und Frühgeschichte der Stadt Freiburg i. Br., Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, **41**, 29–36, 6 Abb.; Freiburg.
- GEYER, O.F. (1957): Über das Bohnerz in Württemberg. – *Z. dt. geol. Ges.*, **109**, 22–27, 2 Abb.; Hannover.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (1964): Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg. – 223 S., 87 Abb., 7 Tab., 11 Taf.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GOLDENBERG, G. (1996): Archäometallurgische Untersuchungen zur Entwicklung des Metallhüttenwesens im Schwarzwald. Blei-, Silber- und Kupfergewinnung von der Frühgeschichte bis zum 19. Jahrhundert. – In: GOLDENBERG, G., OTTO, J., STEUER, H. [Hrsg.] (1996): Archäometallurgische Untersuchungen zum Metallhüttenwesen im Schwarzwald, 9–274, 58 Abb., 24 Taf., 38 Tab.; Sigmaringen (Thorbecke).
- GÜMBEL, C.W. (1861): Geognostische Beschreibung des bayerischen Alpengebirges und seines Vorlandes. – 950 S., 25 Abb., 1 Taf., 5 geol. Kt., 42 Profilaf.; Gotha (Perthes).
- HAAS, U. (1987): Geologie der Berge südlich von Füssen. – Unveröff. Diplomarbeit an der Techn. Univ. München, IX u. 244 S., 103 Abb., 17 Taf., 6 Beil., 1 geol. Kt., 2 Profilaf.; München.
- HASSLER, J., DETCHEVA, A., FÖRSTER, O., PERZL, P.R. & FLÓRIAN, K. (1999): Working with a modern ETV-device and an ICP-CID-Spectrometer. – *Annali di Chimica*, **89**, 827–836, 14 Abb.; Rom.
- HAUPTMANN, A., KEESMANN, I. & SCHULZ-DOBRICK, B. (1984): Die Kristallisation von Fe-reichem Olivin in archäometallurgischen Schlacken. – *Fortschr. Miner.*, **62**, 84–86, 2 Abb.; Stuttgart.
- HEGEMANN, F. (1957): Geochemische Untersuchungen zur Entstehung der alpinen Blei-Zink-Erzlagerstätten in triassischen Karbonatgesteinen. – *Berg- u. Hüttenmännische Mh.*, **102**(9), 233; Wien.
- HOFMANN, S. (1985): Steingadener Chronik, **2**. – 227–658, zahlr. Abb.; Steingaden (Gemeinde Steingaden).
- JOCKENHÖVEL, A. & WILLMS, Ch. (1993): Untersuchungen zur vorneuzeitlichen Eisengewinnung und -verarbeitung im Lahn-Dill-Gebiet: Ausgangslage und Ergebnisse der archäologischen Geländeinspektion. – In: STEUER, H. & ZIMMERMANN, U. [Hrsg.] (1993): Montanarchäologie in Europa, Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990, Archäologie und Geschichte, Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, **4**, 517–529, 7 Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).
- JOHANNSEN, O. (1953): Geschichte des Eisens. – 3. Aufl., 621 S., 433 Abb., 3 Taf.; Düsseldorf (Stahleisen).
- KEESMANN, I., BACHMANN, H.G. & HAUPTMANN, A. (1982): Norm-Berechnungsverfahren für eisenreiche Schlacken. – *Fortschr. Miner.*, **60**, 110–111; Stuttgart.
- KEESMANN, I., BACHMANN, H. G. & HAUPTMANN, A. (1984): Klassifikation eisenreicher Schlacken nach dem Phasenbestand. – *Fortschr. Miner.*, **62**, 114–116, 1 Abb.; Stuttgart.
- KELLER, J. (1930): Wissenschaft und Kunst im Kloster St. Mang, nach Leisle. – *Alt Füssen*, **3/4** (ohne Seitenzahlen); Füssen.
- KELLER, E. (1982): Ein mittelalterliches Schürfgrubenfeld auf Raseneisenerz in Graßlfing bei Olching, Landkreis Fürstenfeldbruck, Oberbayern. – *Das Archäologische Jahr in Bayern*, **1982**, 144–146, 2 Abb.; Stuttgart.

- KEMPA, M. (1993): Die Anfänge der Eisenverhüttung auf der Schwäbischen Alb. – In: STEUER, H. & ZIMMERMANN, U. [Hrsg.] (1993): Montanarchäologie in Europa, Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990, Archäologie und Geschichte, Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, **4**, 505–515, 8 Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).
- KEMPA, M. (1998): Albvorland – Eisenland? Mittelalterliche Eisenhütten zwischen Reutlingen und Nürtingen. – Denkmalpflege in Baden-Württemberg, Nachrichtenblatt des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg, **27**(4), 212–219, 8 Abb.; Stuttgart.
- KLEIN, S. (1993): Archäometallurgische Untersuchungen an frühmittelalterlichen Buntmetallfunden aus dem Raum Höxter/Corvey. – Frankfurter geowiss. Arb., Serie C, **13**, 203 S., 28 Abb., 12 Taf., 14 Tab., 13 Beil.; Frankfurt a. M.
- KOCKEL, C.W., RICHTER, M. & STEINMANN, H.G. (1931): Geologie der Bayrischen Berge zwischen Lech und Loisach. – Wissenschaftl. Veröffentl. d. D. u. Ö. AV, **10**, 231 S., 57 Abb., 17 Taf., 1 geol. Kt., 1 Profiltaf.; Innsbruck.
- KOHLER, E. (1982): Der Abbau von Bodenschätzen und nutzbaren Ablagerungen. – In: Schwäbische Forschungsgemeinschaft [Hrsg.] (1982): Historischer Atlas von Bayerisch-Schwaben, Karte XI/2, mit Erläuterungen; Augsburg.
- KOHLER, E. (1984): Bodenschätze und nutzbare Ablagerungen. – In: KOLB, A.E. & KOHLER, E. [Hrsg.] (1984): Ostallgäu einst und jetzt, **1**, 45–56, 1 Abb.; Kempten (Allgäuer Zeitungsverl.).
- KOHLER, E. (1996): Der historische Erzbergbau. – In: LIEBHART, W. [Hrsg.] (1996): Schwangau: Dorf der Königsschlösser. Natur, Kultur und Freizeit erleben, 35–40, 1 Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).
- KOHLER, E. & ZACHER, W. (1982): Tonmineral-Vergesellschaftung und Faziesänderung in der obersten alpinen Trias der Allgäuer Kalkalpen. – Geologische Vereinigung, 72. Jahrestagung, Kurzfassungen, 65; Würzburg.
- KRANZ, J.R. (1976): Strontium – ein Fazies-Diagenese-Indikator im Oberen Wettersteinkalk (Mitteltrias) der Ostalpen. – Geol. Rdsch., **65**(2), 593–615, 9 Abb., 4 Tab.; Stuttgart.
- KRONZ, A. (1997): Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen – Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken. – Dissertation an der Univ. Mainz, 272 S., 61 Abb., 24 Tab., 24 Taf.; Mainz (K. Bielefeld-Verl.).
- KUHNERT, C. (1967): Geologische Karte von Bayern 1: 25.000, Blatt Nr. 8431 Linderhof. – mit 1 Profiltafel, mit Erläuterungen; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LORI, J.G. (1764): Sammlung des bayerischen Bergrechts, mit einer Einleitung in die bayerische Bergrechtsgeschichte. – CXX u. 647 S.; München (Richter).
- LÜDERS, R. (1965): Zur Entstehung von Raseneisenerz im Emstal bei Meppen. – Geol. Jb., **83**, 221–234, 3 Abb., 3 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- LUDEMANN, Th. (1999 a): Holzkohle – Energiequelle für den Bergbau, Informationsquelle für die Wissenschaft. – In: LANDESDENKMALAMT BADEN-WÜRTTEMBERG [Hrsg.] (1999): Früher Bergbau im südlichen Schwarzwald, Begleitheft zur Ausstellung des Museums für Ur- und Frühgeschichte der Stadt Freiburg i. Br., Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, **41**, 123–129, 6 Abb. 1 Tab.; Freiburg.
- LUDEMANN, Th. (1999 b): Zur Brennstoffversorgung im Bergbaurevier Sulzburg. – In: STEUER, H. [Hrsg.] (1999): Alter Bergbau im Sulzbachtal, Südschwarzwald, Archäologische Nachrichten aus Baden, **61/62**, 131–138, 7 Abb., 1 Tab.; Freiburg.
- MAUCHER, A. (1954): Zur „alpinen Metallogene“ in den bayerischen Kalkalpen zwischen Loisach und Salzach. – TPM, 3. F., Festband B. Sander, **4**, 454–463; Wien (Springer).
- MAUCHER, A. (1957): Die Deutung des primären Stoffbestandes der kalkalpinen Pb-Zn-Lagerstätten als syngenetisch-sedimentäre Bildung. – Berg- u. Hüttenmännische Mh., **102**(9), 226–229; Wien.
- MUTSCHLECHNER, G. (1955): Der Erzbergbau im Außerfern. – Schlern-Schriften, **111**, 25–52, 1 Abb., 4 Tab.; Innsbruck (Wagner).
- MOESTA, H. (1986): Erze und Metalle: ihre Kulturgeschichte im Experiment. – 2. Aufl., XI u. 189 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Berlin etc. (Springer).
- NEUMANN, B. (1954): Die ältesten Verfahren der Erzeugung technischen Eisens durch direkte Reduktion von Erzen mit Holzkohle in Rennfeuern und Stücköfen und die Stahlerzeugung unmittelbar aus dem Eisenerz. – Freiburger Forschungshefte D, **6**, 1–107; Berlin.
- NEUMANN-REDLIN, Ch., WALTHER, H.W. & ZITZMANN, A. (1976): The Iron Ore Deposits of the Federal Republic of Germany. – In: ZITZMANN, A. [Hrsg.] (1977): The Iron Ore Deposits of Europe and adjacent Areas, Vol. **1**, 165–186, 4 Abb., 4 Tab.; Hannover (Bundesanstalt f. Geowissenschaften u. Rohstoffe).
- OBERASCHER, E. (1939): Die Raseneisenerze Pommerns. – Abhandl. Geol.-Pal. Institut Greifswald, **XX**; 1–52; Greifswald.
- OSBORN, E.F. & MUAN, A. (1960): System CaO – FeO – SiO<sub>2</sub>, System FeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>. – In: ORTON, E. [Hrsg.] (1960): Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems; Columbus/Ohio (Amer. Ceramic Society).
- PETRASCHECK, W.E. (1957): Die Gesichtspunkte für eine Hydrothermale Entstehung der Kalkalpinen Bei-Zinklagerstätten. – Berg- u. Hüttenmännische Mh., **102**(9), 229–233; Wien.
- PLEINER, R. (2000): Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters. – 400 S.; Prag (Archeologický ústav AV ČR).
- PRESSLINGER, H. (2000): Stahlwerksschlacken. – Berg- u. Hüttenmännische Mh., **145**(1), 6–13, 11 Abb.; Wien.
- RIEDERER, J. (1987): Archäologie und Chemie – Einblicke in die Vergangenheit. – 276 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Berlin (Rathgen-Forschungslabor, Staatl. Museen Preußischer Kulturbesitz).
- ROTTENKOLBER, J. (1951): Geschichte des Allgäus. – 457 S., zahlr. Abb.; München (Rother).
- RUMP, H.-U. (1977): Füssen. – In: Historischer Atlas von Bayern, Teil Schwaben, **9**, 479 S., zahlr. Abb., 2. Kt.; München (Bayer. Akad. Wiss.).
- SCHUEENPFLUG, L. (1993): Zur Erd- und Landschaftsgeschichte des Landkreises Augsburg. – In: PÖTZL, W. [Hrsg.] (1993): Landschaft und Natur, 5–165, 92 Abb.; Augsburg (Pröll).
- SCHMIDT-THOMÉ, P. (1960): Geologische Karte von Bayern 1: 100.000, Blatt Nr. 662 Füssen. – Mit 1 Profiltafel; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- SCHMITZ, Ch. (1842): Über das Vorkommen nutzbarer Fossilien in den bayerischen Alpen. – Kunst- und Gewerbeblatt des polytechnischen Vereins für das Königreich Bayern, **28**(5/6), 292–318 und 363–381; München.
- SCHMITZ, Ch. (1843): Über die für die Fabriken und die Gewerbe, die Baukunst und den Handel dienlichen Mineralien des bayerischen Alpengebirges. – Kunst- und Gewerbeblatt des polytechnischen Vereins für das Königreich Bayern, **29**(8/9), 487–555, 1 Kt.; München.
- SCHNEIDER, H.-J. (1953 a): Neue Ergebnisse zur Stoffkonzentration und Stoffwanderung in Blei-Zink-Lagerstätten der nördlichen Kalkalpen. – Fortschr. Min., **32**, 26–29; Stuttgart.
- SCHNEIDER, H.-J. (1953 b): Lagerstättenkundliche Untersuchungen am oberen Wettersteinkalk der bayerischen Kalkalpen östlich der Loisach. – Dissertation an der Univ. München, 131 S., zahlr. Abb. u. Tab.; München.
- SCHNEIDER, H.-J. (1964): Facies differentiation and controlling factors for the depositional lead-zinc concentration in the Ladinian Geosyncline of the Eastern Alps. – Develop. Sedimentol., **2**, 29–45, 9 Abb.; Amsterdam.
- SCHNEIDER, H.-J. & WALDVOGEL, F. (1964): Sedimentäre Eisenerze und Faziesdifferenzierung im Oberen Wettersteinkalk. – In: ZACHER, W. (1964): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 25.000, Blatt Nr. 8430 Füssen, 101–123, 2 Abb., 1 Tab., 4 Taf.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- SCHNEIDERHÖHN, H. (1952): Genetische Lagerstättengliederung auf geotektonischer Grundlage. – N. Jb. Min., Mh. A, **1952**, 47–89; Stuttgart.
- SCHNEIDERHÖHN, P. (1980): Zur Petrographie des eisenerzführenden Dogger β in Franken. – Erlanger geolog. Abh., **108**, 68 S., 15 Abb., 36 Tab.; Erlangen.
- SCHNETZER, R. (1938): Bergbau in Schwaben. – Schwabenland, **5**, 1–24, 24 Abb.; Augsburg (Gauverband f. schwäb. Kultur- u. Heimatpflege).

- SCHÖNER, R. (2000): Mineralogische und geochemische Untersuchungen an historischen Eisenverhüttungsschlacken aus dem Füssener Raum und dem Außerfern (Ostallgäu und Tirol). – Unveröff. Diplomarbeit an der Techn. Univ. München, 95 S., 28 Abb., 1 Tab., 15 Taf., 11 Anl.; München.
- SCHÖNER, R., SCHOLZ, H., NASEMANN, P. & KRUMM, H. (2000): Bergbauspuren und Schlackenhalde im Füssener Land und im Außerfern. – In: KETTEMANN, O. [Hrsg.] (2000): Droben im Allgäu, wo das Brot ein End' hat. Zur Kulturgeschichte einer Region, Schwäbisches Bauernhofmuseum Illerbeuren, Katalog zur Sonderausstellung 10. Juni bis 22. Oktober 2000, 90–100, 11 Abb.; Kronburg-Illerbeuren.
- SCHOLZ, H. (1995): Bau und Werden der Allgäuer Landschaft. – 305 S., 134 Abb., 47 Taf.; Stuttgart (Schweizerbart).
- SCHOLZ, H., MERRBELER, J. & NETZBRANDT, L. (2000): Ein Allgäuer „Ruhgebiet“ am Grünten. – In: KETTEMANN, O. [Hrsg.] (2000), Droben im Allgäu, wo das Brot ein End' hat, Zur Kulturgeschichte einer Region, Schwäbisches Bauernhofmuseum Illerbeuren, Katalog zur Sonderausstellung 10. Juni bis 22. Oktober 2000, 80–89, 10 Abb.; Kronburg-Illerbeuren.
- SCHROLL, E. (1983): Geochemical Characterisation of the Bleiberg Type and other Hosted Lead-Zinc Mineralisations. – In: SCHNEIDER, H.J. [Hrsg.] (1983): Mineral Deposits of the Alps and of the Alpine Epoch in Europe, Proceedings of the IV ISMIDA, Berchtesgaden, October 4–10, 1981, Spec. Pub. Soc. Geol. Min. Dep., **3**, 189–197, 7 Abb.; Berlin etc. (Springer).
- SCHWARZ, K., TILLMANN, H. & TREIBS, W. (1964): Die Eisenerze der Oberkreide als Grundlage des keltischen Eisenerzbergbaues auf dem Michaelsberg bei Kelheim. – *Geologica Bavarica*, **53**, 129–134, 1 Beil; München.
- SINGER, J. (2003): Mineralogische und geochemische Untersuchungen an historischen Eisenverhüttungsschlacken aus der Umgebung von Sonthofen im Allgäu. – Unveröff. Diplomarbeit an der Techn. Univ. München, in Vorbereitung; München.
- SPEL, G. (1980): Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhüttenschlacken. – *Österr. Akademie d. Wissenschaften, Studien zur Industrie-Archäologie VII*, 68 S., 61 Abb., 19 Tab.; Wien (Akademie d. Wiss.).
- SPEL, G. (1993): Die Entwicklung der Eisenmetallurgie von römischer Zeit bis ins Mittelalter. – In: STEUER, H. & ZIMMERMANN, U. [Hrsg.] (1993): Montanarchäologie in Europa, Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990, Archäologie und Geschichte, Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, **4**, 461–476, 7 Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).
- SRBIK, R.V. (1929): Überblick des Bergbaues von Tirol und Vorarlberg in Vergangenheit und Gegenwart. – *Ber. Naturw. Verein Innsbruck*, **41**, 113–279, 20 Abb., zahlr. Tab.; Innsbruck.
- STEUER, H. (1993): Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa. – In: STEUER, H. & ZIMMERMANN, U. [Hrsg.] (1993): Montanarchäologie in Europa, Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990, Archäologie und Geschichte, Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, **4**, 11–27, 1 Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).
- TAUPITZ, K.-C. (1954 a): Die Blei-, Zink- und Schwefelkieslagerstätten der nördlichen Kalkalpen westlich der Loisach. – Dissertation an der Bergakademie Clausthal, 134 S., 47 Abb., 5 Taf., 14 Tab.; Clausthal.
- TAUPITZ, K.-C. (1954 b): Erze sedimentärer Entstehung auf alpinen Lagerstätten des Typs „Bleiberg“. – *Zeitschrift für Erzbergbau und Metallhüttenwesen*, **7**, 343–349; Stuttgart.
- TREPTOW, E., WÜST, F. & BORCHERS, W. (1900): Bergbau und Hüttenwesen. – 605 S., 608 Abb., 12 Beil.; Leipzig (Spramer).
- TYLECOTE, R.F. (1992): A History of Metallurgy. – 2. Aufl., 205 S., 155 Abb., 77 Tab.; Avon (Great Britain) (The Instit. of Materials).
- VEREIN DEUTSCHER EISENHÜTTENLEUTE [Hrsg.] (1971): Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens. – 17. Aufl., 547 S., 202 Abb., 35 Tab.; Düsseldorf (Stahleisen).
- VIDAL, H. & HOHENSTATTER, E. (1964): Subhydrische Bildungen. – In: ZACHER, W. (1964): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 8430 Füssen, 58–75; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VIDAL, H. & HOHENSTATTER, E. (1966): Moore und Seekreideablagerungen. – In: ZACHER, W. (1966): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 8429 Pfronten, 124–142; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VOGT-EISENSCHINK, W. (1987): Erfassung von Bergbau- und Eisenverhüttungsplätzen im Raum Regensburg-Kelheim. – In: Die Oberpfalz – Ein europäisches Eisenzentrum, Schriftenreihe des Bergbau- und Industriemuseums Ostbayern, **12**(1), 27–38, 7 Abb.; Amberg.
- WALDVOGEL, F. (1964): Eisenerzführung und spezielle Faziesentwicklung des oberen Wettersteinkalkes im westlichen Ammergebirge. – Unveröff. Diplomarbeit an der Univ. München, 77 S., 55 Abb., 1 Tab., 4 Taf., mit separat. Bildteil; München.
- WALZ, D. (1989): Auf den Spuren der Meister: Die Vita des heiligen Magnus von Füssen. – 224 S. 7 Abb., Sigmaringen (Thorbecke).
- WEDEPOHL, K.H. (1969): Composition and abundance of common sedimentary rocks. – In: WEDEPOHL, K.H. [Hrsg.] (1969), Handbook of Geochemistry, Vol I, 250–271, 5 Tab.; Berlin etc. (Springer).
- WEDEPOHL, K.H. [Hrsg.] (1978): Handbook of Geochemistry, Vol II/3. – Elements Cr (24) to Br (35); Berlin etc. (Springer).
- YALÇIN, Ü. & HAUPTMANN, A. (1995): Archäometallurgie des Eisens auf der Schwäbischen Alb. – In: LANDESDENKMALAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Beiträge zur Eisenverhüttung auf der Schwäbischen Alb, 269–309; Stuttgart (Konrad Theiss).
- ZACHER, W. (1964): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 8430 Füssen. – Mit 1 Profiltafel, mit Erläuterungen; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- ZACHER, W. (1966): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 8429 Pfronten. – Mit 1 Profiltafel, mit Erläuterungen; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- ZIEGLER, J.H. (1983): Eocene Iron Ore Deposits at the Northern Belt of the Bavarian Alps. – In: SCHNEIDER, H.J. [Hrsg.] (1983): Mineral Deposits of the Alps and of the Alpine Epoch in Europe, Proceedings of the IV ISMIDA, Berchtesgaden, October 4–10, 1981, Spec. Pub. Soc. Geol. Min. Dep., **3**, 136–145, 4 Abb., 2 Tab.; Berlin etc. (Springer).
- ZIEGLER, J.H. (1975): Alttertiäre Eisenerze am bayerischen Alpenrand. – In: FRANK, M., GROSCHOPF, P., GUDDEN, H., HALBACH, P., HEGENBERGER, W., SAUER, K., SIMON, P., WILD, H. & ZIEGLER, J.H.: Sedimentäre Eisenerze in Süddeutschland. – *Geol. Jb. D*, **10**, 239–253; Hannover.
- ZOTZ, T. (1993): Schriftquellen zum Bergbau im frühen Mittelalter. – In: STEUER, H. & ZIMMERMANN, U. [Hrsg.] (1993): Montanarchäologie in Europa, Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990, Archäologie und Geschichte, Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, **4**, 183–194; Sigmaringen (Thorbecke).
- ZWICKER, A. (1999): Deckenbau und gravitative Massenbewegungen im Ammergebirge zwischen Klammspitz und Pürschling (Bayerische Alpen). – Dissertation an der Techn. Univ. München, 140 S., 26 Abb., 1 Tab., 4 Anl.; München (Hieronymus).