

**Zeitschrift:** Archäologie im Kanton Bern : Fundberichte und Aufsätze = Archéologie dans le canton de Berne : chronique archéologique et textes

**Herausgeber:** Archäologischer Dienst des Kantons Bern

**Band:** 5A/5B (2004)

**Artikel:** Die Bleischlacken von Trachsellaunen

**Autor:** Guénette-Beck, Barbara / Pfeifer, Hans-Rudolf

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-726498>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 13.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Die Bleischlacken von Trachsellaunen

Barbara Guénette-Beck, Hans-Rudolf Pfeifer<sup>1</sup>

Trachsellaunen im Berner Oberland (Gde. Lauterbrunnen) ist bekannt für seine Blei- und Silberbergwerke, die gemäss historischen Überlieferungen hauptsächlich auf Silber ausgebeutet wurden. Der Letztabbau fand in den Jahren 1782 bis 1805 statt. Das Erz wurde damals unweit der Bergwerke verhüttet. Die Untersuchung der metallurgischen Abfälle des Verhüttungsortes Trachsellaunen ermöglichte die Bestimmung von drei verschiedenen metallurgischen Prozessen anhand von drei verschiedenen Schlackentypen (Abb. 1). Diese Schlacken sind Abfallprodukte der Bleiverhüttung, wahrscheinlich der Eisenverhüttung und der Schmiedetätigkeit. Der wichtigste metallurgische Prozess war, gemessen an der Abfallmenge, derjenige der Bleiproduktion. Es handelt sich um die Verhüttung von silberreichem Bleierz, genauer von Bleiglanz oder Galenit (PbS).

Die folgenden Untersuchungen finden im Rahmen einer Doktorarbeit der erdwissenschaftlichen Abteilung der Universität Lausanne statt. Der grösste Teil der Proben wurden vom Archäologischen Dienst des Kantons Bern zur Verfügung gestellt und am Centre d'Analyses Minérales (J.-C. Lavanchy, verantwortlicher Analytiker, und H.-R. Pfeifer, Direktor) mit wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenz (WD-XRF) analysiert und mit dem semi-quantitativen Programm Uniquant<sup>®</sup> ausgewertet. Wenn nicht anders vermerkt, handelt es sich um ge-

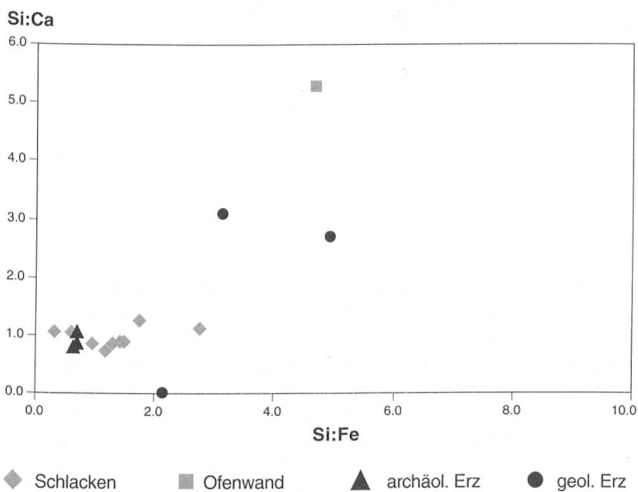


Abb. 1: Vergleich der drei Schlackentypen in den Diagrammen Si-Fe und Si-Ca. Die drei verschiedenen Schlackentypen sind deutlich unterscheidbar. Es handelt sich um Blei-, Schmiede- und vielleicht Eisenschlacken.

samtchemische Gesteinsanalysen von ungefähr 30 g Probenmaterial. Einzelne Proben wurden zusätzlich unter dem Auflicht-Polarisationsmikroskop und mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Einige wenige Proben stammen aus dem Naturhistorischen Museum Bern (B. Hofmann, Konservator). Es handelt sich um Gesteinsproben, die während der letzten Abbauperiode gesammelt wurden. Sie wurden an der Mikrosonde untersucht.

## 1. Die Blei- und Silbergewinnung

### 1.1 Die Schlacken

Die Schlacken der Bleiverhüttung sind zum grössten Teil Fliessschlacken (Abb. 2). Die einzelnen Wülste dieser Schlacken sind nur fragmentiert erhalten. Sie sind einige



Abb. 2: Makroskopische Abbildungen von Fliessschlacken.

<sup>1</sup> Erdwissenschaften, Centre d'Analyse Minérale, Universität Lausanne.

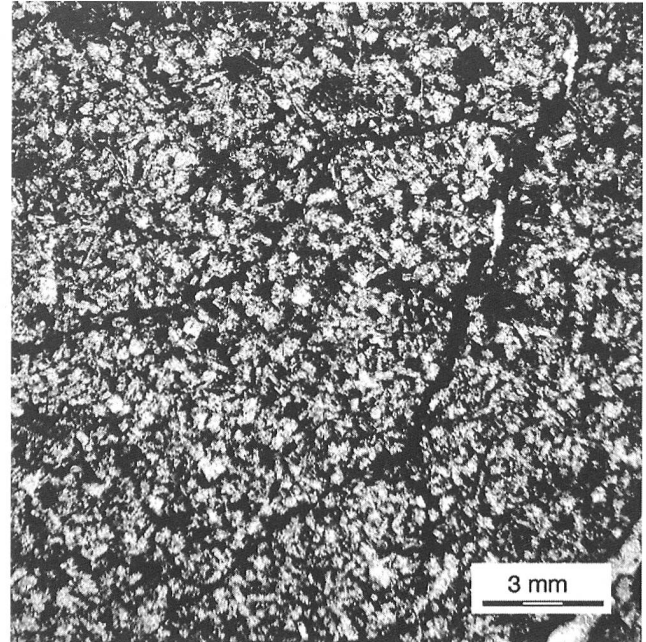
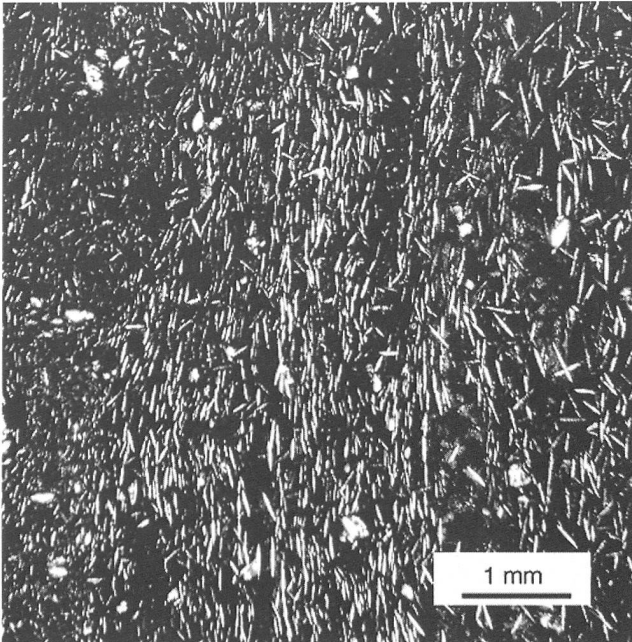


Abb. 3: Mikroskopische Abbildungen von Fliess- (links) und Ofenschlacken (rechts). Bei den Mineralien handelt es sich wahrscheinlich um Ba-Ca-Silikate der Feldspatgruppe. Aufnahme mit Durchlicht.

Millimeter dick und mehrere Zentimeter breit. Die genauen Dimensionen können nicht bestimmt werden, da die Stücke fast ausschliesslich nur 2 bis 4 cm gross sind. Entsprechend der Dicke der Stücke verhält sich auch die Porosität: Dünne Fliesschlacken haben weniger und kleinere Luftblasen als dickere. Sie haben eine bräunliche Patina, sind aber an den frischen Bruchstellen grau. An einigen Bruchstellen konnten metallische Bleieinschlüsse beobachtet werden, unter dem Mikroskop sind manchmal auch metallische Silbereinschlüsse sichtbar. Diese Schlacken bestehen hauptsächlich aus feinen, nadelförmigen Mineralien, die in der Fliessrichtung ausgerichtet sind (Abb. 3). Es handelt sich, gemäss semiquantitativen Analysen am Rasterelektronenmikroskop, um Ba-Ca-Silikate mit Anteilen an Al und K, d.h. eventuell um Silikate der Feldspatgruppe. Die Matrix besteht hauptsächlich aus Ca, Ba, Fe, Si, Al und S. Die makro- und mikroskopische Form dieser Fliesschlacken lässt erkennen, dass sie auf einen ebenen Boden geflossen und dort erkaltet sind. Die Grösse der Fragmente lässt darauf schliessen, dass die Schlacken zerschlagen wurden, um das in ihnen enthaltene metallische Blei auszusortieren.

Andere Schlacken sind um einiges dicker und zeigen an vereinzelten Stellen kleinere Fliessstrukturen, die nicht in eine bestimmte Richtung zu laufen scheinen. Auch ist nicht bestimmbar, auf welcher Art von Untergrund sie ausgekühlt sind: Zum Teil über anderen Schlacken oder auf einem inhomogenen, unbestimmbaren Untergrund. Mikroskopisch lassen sich Mineralien mit ähnlicher Zusammensetzung wie oben bestimmen, deren Form jedoch grösser und viereckig ist (Abb. 3): Die grössere Form zeigt, dass sie mehr Zeit zum Kristallisieren hatten. Es handelt sich wahrscheinlich um Ofenschlacken.<sup>2</sup>

Tabelle 1 zeigt die globale chemische Zusammensetzung von 13 untersuchten Schlacken. Die Resultate haben keinen Zusammenhang mit der äusseren Gestalt der Schla-

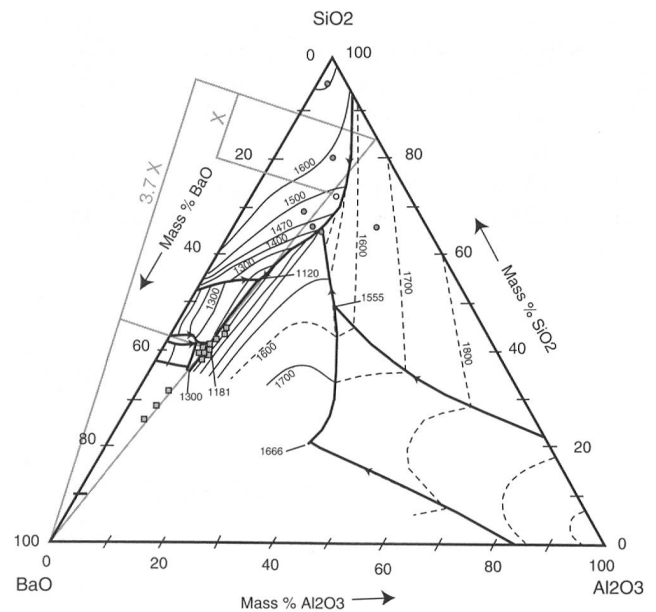


Abb. 4: Dreieckdiagramm SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO (Verein Deutscher Eisenhüttenfreunde 2001). Dieses Diagramm ermöglicht es, anhand der Temperaturkurven (gestrichelte oder durchgezogene Linien) die Bildungstemperatur der Schlacken (viereckige Symbole) abzuschätzen (1120 bis 1200 °C) und mit der theoretischen Schmelztemperatur der Erze (runde Symbole) zu vergleichen (ungefähr 1490 °C). Der Bariumgehalt in den Schlacken ist ungefähr 3,7-mal grösser als derjenige der Erze. Wie aus diesem Diagramm ersichtlich ist, dient die Zugabe von Barium zum Herabsetzen der Schmelztemperaturen.

<sup>2</sup> Kutzer 1996.

cken. Die Schlacken bestehen hauptsächlich aus Silizium (SiO<sub>2</sub>: 17,1–28,5%), Eisen (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 5,1–13,45% mit einzelnen Ausnahmen um 23,1 bis 36,1%), Kalzium (CaO: 10,7–21,1%), Barium (BaO: 24,2–51,1%) und Aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 2,6–5,6%). Der Bleigehalt ist nie grösser als 4,4% PbO und in den meisten Fällen sogar unter 1%!

Das Phasendiagramm SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO (Abb. 4) zeigt, dass sich diese Schlacken bei einer Temperatur von mindestens 1120 und 1200 °C gebildet haben. Versuche im Labor haben gezeigt, dass diese Schlacken mit 1100 bis 1150 °C schon bei leicht tieferen Temperaturen schmelzen. Im oben genannten Phasendiagramm werden aber die Anteile an Kalzium und Eisen vernachlässigt, zwei Elemente, die einen wichtigen Einfluss auf die Schmelztemperaturen haben.

## 1.2 Das Erz

In historischer Zeit wurde im Gebiet von Trachsellauenen an vier verschiedenen Orten blei- und silberhaltige Erze (d.h. silberreicher Bleiglanz oder Galenit) abgebaut: an der linken Talseite in den Bergwerken «Gnadensonne» und «Gute Hoffnung», an der rechten Talseite in den Bergwerken «Beschertes Glück» und «Segenszuwachs».<sup>3</sup> Die Bergwerke von Trachsellauenen liegen im Lauterbrunner Kristallin, das als ein Migmatit mit granodioritischer Zusammensetzung beschrieben werden kann.

<sup>3</sup> Saheurs 1974. Vgl. den hier vorangehenden Aufsatz: Adriano Boschetti-Maradi/Daniel Gutscher, Die Ausgrabungen in den Verhüttungsanlagen bei Trachsellauenen 1992, in: AKB 5, 543–576.

### Fliessschlacken

	X-BTS 210	X-BTS 211	X-BTS 212.1	X-BTS 213	X-BTS 214	X-BTS 215	X-BTS 216	X-BTS 217	X-BTS 223	X-BTS 228	X-BTS 229	X-BTS 230.1	X-BTS 231.1
interpretiert als	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid
	Fliessschlacke mit brauner Patina	Fliessschlacke mit brauner Patina	Fliessschlacke mit brauner Patina	Fliessschlacke mit grauer Patina	Fliessschlacke mit grauer Patina	Fliessschlacke	Fliessschlacke mit schwarzer Patina	feine Fliessschlacke	zweiphasige Schlacke	Ofenschlacke	Schlacke	Schlacke	Ofenschlacke
<b>[g/kg] mass</b>													
SiO <sub>2</sub>	21.09	17.14	21.04	22.84	22.4	22.31	21.01	25.11	17.87	26.44	25.83	24.08	28.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.37	3.20	4.44	4.41	4.28	3.52	3.23	4.57	2.6	5.58	5.19	4.75	5.15
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.17	0.227	0.279	0.264	0.20	0.207	0.28	0.173	0.237	0.26	0.24	0.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.15	36.14	23.29	12.9	12.86	8.54	5.08	11.82	5.87	11.82	13.45	17.00	9.42
CaO	13.17	10.65	12.96	20.2	19.89	11.44	12.29	18.61	11.65	19.54	19.78	18.23	21.08
MgO	1.16	0.77	1.22	1.49	1.42	0.73	0.669	1.53	0.595	1.33	1.22	1.13	1.52
MnO	0.08	0.06	0.08	0.158	0.159	0.08	0.109	0.15	0.111	0.095	0.10	0.10	0.09
PbO	0.31	0.56	0.382	4.35	3.66	1.45	0.192	2.84	1.74	0.941	0.99	2.99	0.89
BaO	30.39	24.19	28.63	28.09	29.94	45.69	50.82	29.84	51.46	28.92	28.18	25.37	28.40
Na <sub>2</sub> O	nd	nd	0.252	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
K <sub>2</sub> O	1.37	0.91	1.75	1.67	1.68	0.82	1.47	1.63	1.62	0.825	0.92	0.82	0.81
S	1.59	2.16	2.08	0.266	0.272	1.97	1.97	0.50	2.42	1.18	1.44	2.88	1.33
SO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.72	1.00	0.735	0.652	0.623	0.38	0.269	0.64	0.259	1.05	1.11	0.97	1.01
CO <sub>2</sub>	0.29	1.24	0.91	0.69	0.46	0.63	0.42	0.48	1.03	0.45	nd	nd	nd
<b>Total</b>	<b>97.90</b>	<b>98.18</b>	<b>98.00</b>	<b>98.00</b>	<b>97.91</b>	<b>97.77</b>	<b>97.74</b>	<b>97.99</b>	<b>97.40</b>	<b>98.41</b>	<b>98.47</b>	<b>98.55</b>	<b>98.45</b>
<b>ppm</b>													
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	280	510	350	nd	nd	nd	nd	nd	nd	430	560	500	430
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	508	217	514	180	181	123	nd	168	40	581	621	587	426
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	41	78	65	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
NiO	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
CuO	25	45	23	21	20	38	67	nd	60	114	73	167	21
ZnO	3980	4570	3980	2690	2770	1740	1070	2820	3750	609	694	852	562
Rb <sub>2</sub> O	39	nd	36	25	23	nd	35	32	25	nd	20	nd	nd
SrO	11900	8570	11400	12800	13500	13800	15100	12800	15500	10000	9540	8650	10200
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
ZrO <sub>2</sub>	340	270	370	320	330	290	310	300	280	238	209	180	233
Ag <sub>2</sub> O	37	41	nd	nd	nd	41	78	53	59	51	nd	141	nd
SnO <sub>2</sub>	nd	219	nd	247	257	405	310	nd	383	265	267	279	235
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	210	170	144	170	138

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der Fliessschlacken.

Die Lagerstättenverhältnisse der Bergwerke «Gnadensonne» und «Gute Hoffnung» sind ähnlich. Es handelt es sich bei der Vererzung um Quarz- (SiO<sub>2</sub>) und intensiv verquarzte Barytgänge (BaSO<sub>4</sub>), die etwas Galenit (PbS), Sphalerit (ZnS) und Pyrit (FeS<sub>2</sub>) führen. Zum Teil zeigt der Barytgang eine charakteristische Galenit-Bänderung.<sup>4</sup> Der Erzhorizont zeigt wechselnde Mächtigkeit (Boudinage) und kann 120 cm erreichen.

Die Bergwerke «Beschertes Glück» und «Segenszuwachs» bestehen aus einem boudinierten Barytgang, dessen Mächtigkeit maximal zwischen 120 bis 140 cm erreicht. Im Baryt ist ein Galenitband eingelagert.

Sieben Proben wurden auf ihre gesamtchemische Zusammensetzung untersucht (Tab. 2). Es sind: Eine Erzprobe,

die auf dem Ausgrabungsgelände in Form eines grossen unangereicherten Blockes gefunden wurde (BTS 114), drei Erzproben, die auf den Halden der Bergwerke «Gnadensonne» (BTS 117 und BTS 118) und «Beschertes Glück» (BTS 115/116) gesammelt wurden, und drei archäologischen Erzproben (BTS 226, BTS 227 und BTS 235), die bereits schon geröstet waren. Zusätzlich wurden einige historische Proben aus dem Naturhistorischen Museum in Bern, die zur Zeit des Abbaus gesammelt worden waren, mit der Mikrosonde analysiert.

Die Proben, die auf den Halden der verschiedenen Bergwerke eingesammelt wurden, zeigen einen niedrigen Blei-

4 Saheurs 1974.

Erz:	archäologisches Erz			interpretiert als	geologisches Erz					
	X-BTS 226	X-BTS 227	X-BTS 235		BTS 117-1	BTS 117-2	BTS 117-3	BTS 118-1	BTS 118-2	BTS 118-3
interpretiert als	Oxid	Oxid	Oxid		Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat
	geröstetes Erz	geröstetes Erz	geröstetes Erz		Galenit, reine Fraktion	Galenit, mittlere Fraktion	Galenit, tiefer Bleigehalt	Galenit, reine Fraktion	Galenit, mittlere Fraktion	Galenit, tiefer Bleigehalt
<b>[g/kg] mass</b>				<b>[g/kg] mass</b>						
SiO <sub>2</sub>	8.01	1.93	5.73	SiO <sub>2</sub>	25.22	69.55	74.06	13.73	86.79	92.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.42	0.49	1.78	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	1.78	2.21	0.29	1.33	1.23
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.0198	0.10	TiO <sub>2</sub>	0.03	0.10	0.13	–	0.05	0.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.86	2.04	5.81	Fe	0.67	0.73	0.64	0.40	0.26	0.12
CaO	4.94	1.58	4.50	CaO	1.27	2.58	3.55	0.14	0.35	0.20
MgO	0.40	0.0652	0.27	MgO	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MnO	0.02	0.0104	0.01	Mn	0.01	0.02	0.02	–	0.01	0.00
PbO	63.07	71.41	71.61	Pb	50.97	10.38	6.19	73.22	6.95	3.16
BaO	1.61	2.14	0.95	BaO	8.87	7.20	6.48	0.46	0.71	0.58
Na <sub>2</sub> O	nd	nd	0.00	Na <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	nd	nd	nd
K <sub>2</sub> O	0.32	0.234	0.15	K <sub>2</sub> O	0.45	0.82	1.00	0.14	0.70	0.60
S	7.63	–	8.96	S	10.57	5.82	4.78	11.50	2.81	1.71
SO <sub>3</sub>	–	16.34	–	SO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	–
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	nd	0.103	nd	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	nd	nd	0.02	nd	nd	nd
CO <sub>2</sub>	3.31	3.18	nd							
<b>Total</b>	<b>96.42</b>	<b>99.54</b>	<b>99.87</b>	<b>Total</b>	<b>99.06</b>	<b>98.99</b>	<b>99.08</b>	<b>99.89</b>	<b>99.95</b>	<b>99.97</b>
<b>ppm</b>				<b>ppm</b>						
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	nd	nd	nd	V	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	Cr	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	nd	nd	nd	Co	nd	nd	nd	nd	nd	nd
NiO	nd	nd	nd	Ni	31	nd	nd	nd	nd	nd
CuO	295	135	188	Cu	124	nd	nd	53	17	nd
ZnO	1200	2390	1920	Zn	4760	7230	6850	nd	76	57
Rb <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	Rb	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SrO	nd	705	nd	Sr	1790	1570	1260	nd	311	164
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	Y	nd	nd	nd	nd	nd	nd
ZrO <sub>2</sub>	nd	nd	nd	Zr	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag <sub>2</sub> O	241	97	99	Ag	155	54	nd	121	27	14
SnO <sub>2</sub>	nd	121	77	Sn	nd	nd	nd	55	nd	nd
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	280	285	132	Sb	nd	nd	nd	107	nd	nd

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der Erze. Die archäologischen Erze sind diejenigen, die in geschmolzenem Zustand in der Nähe des VerhüttungsOfens gefunden wurden, die geologischen Erzproben wurden auf den Halden der Bergwerke eingesammelt. Die Letzteren wurden im

glanzgehalt. Sie bestehen hauptsächlich aus Baryt, Pyrit und seltener Zinkblende, die eng mit dem Bleiglanz vergesellschaftet sind. Stellenweise konnte auch Quarz beobachtet werden. Deshalb wurde im Labor versucht, diese Proben anzureichern, indem der Bleiglanz von seinen Gangmineralien getrennt wurde. Zwei Methoden wurden angewandt: Trennung am Schütteltisch und Trennung mit einem Goldwäscherieb. Beide Verfahren nützen den spezifischen Gewichtsunterschied der einzelnen Mineralien aus. In Abbildung 6 sind die verschiedenen Kategorien der getrennten Proben aufgeführt. Die mit einer Nummer 1 bezeichneten Proben sind die reichsten, die mit einer 3 oder 4 bezeichneten Proben die bleiärmsten. Zusätzlich zu den archäologischen Erzproben BTS 226, BTS 227 und BTS 235 können deshalb die Proben BTS 118-1, BTS 119-1, BTS 114-1A (Trennung mit dem Goldwäscher-

sieb), BTS 114-1B und BTS 114-2 als mögliche Erzproben betrachtet werden.

Die verschiedenen geologischen Erze zeigen ein sehr inhomogenes chemisches Spektrum. Der Gehalt an Silizium ( $\text{SiO}_2$ : 0,5–8%), an Aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 0,2–2,5%), an Kalzium ( $\text{CaO}$ : 0,1–5%) und an Barium (0,5–8%) schwankt stark. Die archäologischen Erze weisen zwar etwas weniger grosse Variationen auf, sind aber dennoch sehr heterogen in ihrer chemischen Zusammensetzung.

Diese starken Schwankungen sind auf die Aufbereitung der Erze zurückzuführen. Abbildung 5 zeigt, wie das Erz in Trachsellauen aufbereitet worden ist. Das abgebaute Erz wurde zuerst geklaubt, durchgelassen und geschieden und dann im Pochwerk gepocht, d.h. zerkleinert.

	BTS 118-4	BTS 119-1	BTS 119-2	BTS 119-3	BTS 1 14-1A	BTS 114-1B	BTS 114-2	BTS 114-3	BTS 115/116-1	BTS 115/116-2	BTS 1 15/116-3	BTS 115/116-4
	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat	Sulfat
	unangereicherter Galenit	Galenit, reine Fraktion	Galenit, mittlere Fraktion	Galenit, tiefer Bleigehalt	Galenit, reine Fraktion, Goldwäscherieb	Galenit, reine Fraktion	Galenit, mittlere Fraktion	Galenit, tiefer Bleigehalt	Galenit, reine Fraktion	Galenit, mittlere Fraktion	Galenit, tiefer Bleigehalt	Galenit, tiefer Bleigehalt
	29.08	0.63	1.84	84.89	5.86	0.51	2.74	56.53	39.11	26.03	14.48	20.45
	0.78	0.17	0.10	2.52	0.77	0.15	0.40	4.25	2.85	1.96	1.19	1.90
	0.03	nd	nd	0.07	0.04	nd	nd	0.225	0.102	nd	nd	nd
	0.19	0.14	0.37	0.28	0.87	0.05	0.37	1.55	0.91	0.49	0.43	0.76
	1.13	nd	0.08	1.14	1.24	0.13	0.23	4.66	0.40	0.20	0.09	0.35
	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	0.00	nd	0.00	0.01	nd	nd	nd	0.04	0.02	0.01	nd	nd
	57.86	82.67	56.38	1.03	76.97	86.36	82.25	19.07	14.17	11.23	6.57	5.17
	1.29	3.64	29.50	5.57	0.70	0.14	1.20	3.39	26.98	41.45	56.47	49.66
	nd	0.08	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	0.39	0.02	0.03	0.92	0.47	0.03	0.15	2.15	0.84	0.38	0.14	0.34
	9.05	12.25	10.20	-	12.61	12.52	12.53	7.74	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	13.33	16.51	18.46	19.46
	nd	nd	nd	0.07	nd	nd	nd	0.10	nd	nd	nd	nd
	<b>99.80</b>	<b>99.59</b>	<b>98.50</b>	<b>97.76</b>	<b>99.53</b>	<b>99.89</b>	<b>99.87</b>	<b>99.70</b>	<b>98.71</b>	<b>98.27</b>	<b>97.83</b>	<b>98.09</b>
	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	nd	nd	nd	nd	105	nd	nd	nd	nd	nd	nd	27
	216	75	75	17	234	72	55	68	nd	nd	nd	nd
	510	525	4200	1780	87	nd	122	874	217	266	345	581
	nd	nd	nd	34	nd	nd	nd	81	nd	nd	nd	nd
	320	1000	3260	731	440	nd	190	1360	707	9610	11900	10700
	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	nd	nd	nd	nd	310	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	87	211	239	nd	nd	115	nd	nd	nd	90	61	nd
	nd	nd	585	nd	nd	48	82	nd	202	416	437	280
	91	nd	485	nd	nd	154	103	nd	155	202	138	158

Labor angereichert. Die mit -1, -2, -3 und -4 bezeichneten Proben sind die verschiedenen reichen Bleifractionen einer Probe.

Die Grösse der gepochten Erzbrocken ist wichtig für die folgenden Anreicherungsphasen: das Schlämmen und Waschen, d.h. die Trennung der schwereren von den leichteren Mineralien im fließenden Wasser. Für diese Trennung spielen zwei Faktoren eine wichtige Rolle. Erstens die Heterogenität des gepochten Erzes: Ist das gepochte Erz zu gross, besteht das einzelne Korn aus mehreren Mineralien, die nicht voneinander getrennt werden können, da sie eine Einheit bilden; sind die Körner zu klein, werden sie zu leicht weggeschwemmt, der Verlust wird gross und die Trennung schlecht (siehe aufbereitete Erzprobe BTS 115/116). Dazu kommt, dass Bleiglanz sehr brüchig ist und deshalb schneller zerkleinert wird als Quarz, der härter und schockresistenter ist. Nach Goldenberg liegt die ideale Pochgrösse bei 0,5 cm,<sup>5</sup> persönliche Versuche ergaben, dass eine Trennung Bleiglanz-Ganggestein am einfachsten bei einer Korngrösse von höchstens einem Millimeter möglich ist. Je kleiner die Korngrösse, desto grösser der Trennaufwand. Die in Trachsellaunen

verwendete Korngrösse ist nicht bekannt. Zweitens haben die einzelnen Mineralien Dichteunterschiede: Je grösser der Unterschied der spezifischen Dichte der einzelnen Mineralien ist, umso besser ist die Trennung. Demzufolge ist der Bleiglanz (Dichte: 7,4–7,6) einfacher von Quarz (Dichte: 2,65), Zinkblende (3,9–4,1) und Kalzit (2,71) zu trennen als von Baryt (4,6) und Pyrit (5,02). Dies ist der Grund, weshalb das Erz besonders grosse Schwankungen im Bariumgehalt zeigt, der im Baryt enthalten ist, und im Gehalt an Eisen, der wegen dem Pyrit relativ hoch ist.

Das Erz ist nicht sehr silberreich (ungefähr 250 ppm, d.h. 0,025% Ag), im Vergleich zu silberreichen Lagerstätten wie zum Beispiel diejenigen von Peiloz im Val de Bagnes (VS), in denen ein Silbergehalt von mindestens 0,25% Ag

5 Goldenberg 1996.

Arbeitsort	Arbeitsprozess	Quantitäten im Jahr 1787	im Jahr 1790
BERGWERK (Gnadensonne, Gute Hoffnung, Frisch Glück)	Erz		
mit Schlitten	geklaubt, durchgelassen, geschieden		
POCHWERK	gepocht, geschlämmt, gewaschen		
	nasser Schlich	116 Zentner 11 Pfund	
	trockener Schlich	102.5 Zentner	110 Zentner
4 RÖSTÖFEN	rösten		
	gerösteter Schlich		
	Zusatz		
FEINBRANDOFEN im SCHMELZGEBÄUDE	schmelzen		
	Blei	19.68 Zentner mit 2.5 Lot Ag/Zentner	33 Zentner und 49.21 Zentner
	abtreiben		
	Herdglätte	10.8 Zentner Herdglätte und 24.5 Lot Silber	126 Lot Silber
	Silber		

Abb. 5: Prozesskette der Blei- und Silberverhüttung in Trachsellaunen. Links sind die einzelnen Prozessschritte aufgeführt. Bis auf die Zugabe von Barium sind alle Schritte historisch beschrieben (Saheurs 1974). Rechts werden für zwei Verhüttungsprozesse, die in den historischen Texten beschriebenen Mengen angegeben. 1 Zentner = 100 Pfund = 1600 Unzen = 3200 Lot = 52,01 kg.

gemessen wurde. Die Erzanalysen von Trachsellaunen haben zudem gezeigt, dass der Silberanteil mit dem Bleigehalt tendenziell variiert: Bleireiche Proben sind ärmer an Silber als weniger angereicherte Erzproben. Dies wird auch in den historischen Texten erwähnt:

«Man wollte einen Versuch machen, ob durch hohes Treiben der Schliche, wegen sauberm Auswaschen auf dem Heerde, nicht etwa die feinsten Theile mit dem Sand in den Bach gejagt werden moechten, wodurch der Silbergehalt, welcher ohnedem klein, noch niedriger werden koennte. Man trieb darum den Schlich so nieder als man konnte; so dass beym Schmelzen nicht mehr als zehn bis elf Pfund Bley herauskam. Nachher wurde auch im kleinen eine Probe gemacht, wie viel ein Centner Bley an Silber halten moege, und man fand wirklich, dass nach jener Methode auf ein Centner Bley  $\frac{1}{2}$  Loth Silber mehr an Gehalt herauskomme, als wenn der Schlich hoch getrieben wird; hingegen braucht man bey der ersteren Methode mehr

Kohlen zum Schmelzen, welches dann das sonst zu gewinnende  $\frac{1}{2}$  Loth Silber wieder gaenzlich aufzehrt.»<sup>6</sup>

Um diese Variation im Silbergehalt erklären zu können, wurden an sechs verschiedene Erzen, die während der letzten Verhüttungsperiode am Ende des 18. Jahrhunderts gesammelt wurden, mit der Mikrosonde Punktanalysen durchgeführt. Von über 100 Messungen zeigten nur gerade 6 etwas Silber an! Es ist deshalb anzunehmen, dass das Silber nicht im Kristallgitter des Bleiglanzes zu finden ist, sondern als mineraler Einschluss, zum Beispiel als Fahlerz. Fahlerz hat eine spezifische Dichte zwischen 4,6 und 5,1. Bei mittelguter Anreicherung wird das silbertragende Mineral wegen seines geringen Dichteunterschiedes nicht vom Bleiglanz getrennt, im Gegensatz zum sehr reichen Erz. Ganz reiches Erz ist demzufolge ärmer an Silber als weniger gut angereichertes Erz!

### 1.3 Vergleich Erz–Schlacken: die Bleiproduktion

Wenn man die Analysen der Schlacken betrachtet, fällt auf, dass sie in den meisten Fällen weniger als 1% Blei enthalten. Daraus kann man schliessen, wie weiter unten noch rechnerisch bestätigt wird, dass der Ertrag dieser Bleiverhüttungsmethode nahe bei 100% liegt, d.h. dass nahezu alles Blei, das im Bleiglanz enthalten war, gewonnen werden konnte. Es ist jedoch schwieriger, die Ergiebigkeit abzuschätzen, d.h. die Quantität erzeugten Bleis im Vergleich zum Erz – Bleiglanz und Begleitmineralien inbegriffen –, das in den Ofen gegeben wurde. Dafür müssen die Verhüttungsvorgänge genauer bekannt sein, insbesondere muss herausgefunden werden, ob irgendwelche Zuschläge gemacht wurden und wie gross der Einfluss der Ofenwand, des Brennmaterials usw. im Verhüttungsprozess war.

Die Art der Zuschläge bei der Bleiverhüttung ist bis anhin noch nicht genau untersucht worden. Nach Goldenberg ist ein oft praktizierter Zuschlag derjenige von Eisenerz oder Abfalleisen.<sup>7</sup> Dieses Eisen soll eine wichtige Rolle für die Reduktion des Bleis haben, denn das Eisen hat eine grosse Affinität zum Schwefel, wodurch das Blei direkt aus dem sulfidischen Erz ausgeschieden werden kann. Diese Technik wurde in Trachsellaunen offenbar nicht angewandt, denn das Verhältnis Si:Fe ist in Erz und Schlacke fast konstant (Abb. 6).

Ein Zuschlag von Kalzium, wie er bei der Eisenverhüttung im Hochofenverfahren<sup>8</sup> gebräuchlich ist, ist auszuschliessen, da das Verhältnis Si:Ca in Erz und Schlacke gleich bleibt (Abb. 6).

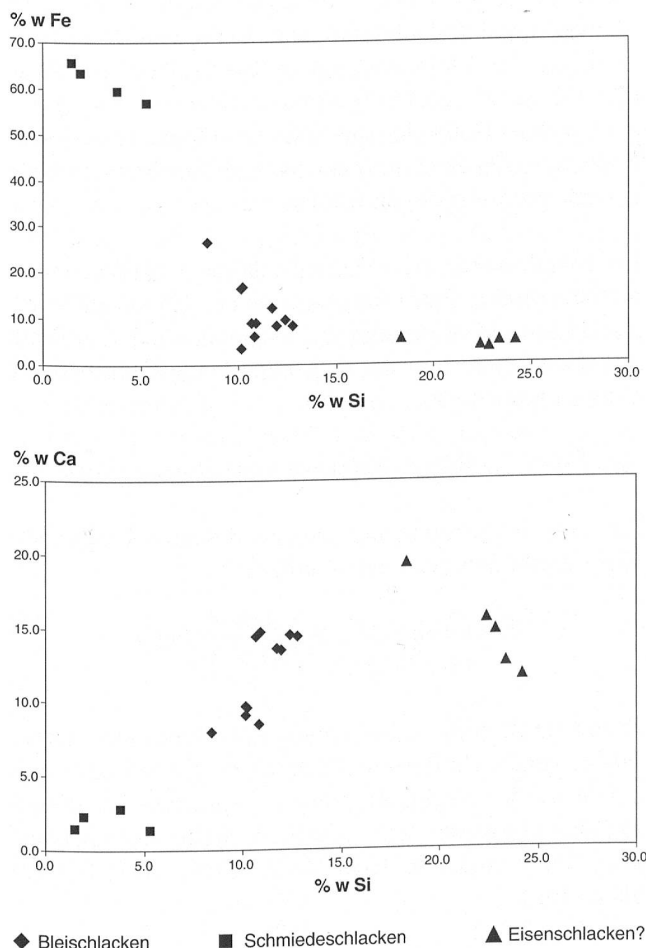


Abb. 6: Diagramm Si:Ca versus Si:Fe. In diesem Diagramm wird deutlich sichtbar, dass das Verhältnis Si:Ca in Schlacke und Erz konstant ist und sich das Verhältnis Si:Fe nur gering ändert. Die Abweichung im zweiten Fall ist darauf zurückzuführen, dass kleine Mengen an Eisen reduziert wurden und sich im metallischen Blei angereichert haben. Der Einfluss der Ofenwand ist vernachlässigbar. «Arch. Erz» = Erz, das geröstet wurde und in der Nähe des Verhüttungsofens gefunden wurde. «Geol. Erz» = Erz, das auf den Halden der Bergwerke gefunden wurde.

6 N.34: Quartal Reminiscere, vom 1. Christmonat 1790 bis 28. Horn. 1791, transkribiert in Saheurs 1974, 112.

7 Goldenberg 1996.

8 Doswald et al. 1997.



Abbildung 4 zeigt, dass das Erz – ob archäologisch oder geologisch und angereichert – mit einer durchschnittlichen Zusammensetzung von  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{BaO} = 72,8:15,5:13,7$  nur bei sehr hohen Temperaturen, d.h. bei ungefähr  $1490\text{ }^\circ\text{C}$  schmilzt, die Schlacken sich aber bei einer Schmelztemperatur zwischen  $1120$  und  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  gebildet haben. Das Verhältnis  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  bleibt also im Erz (= 4,7) und in der Schlacke (= 5,3) annähernd konstant, verändert sich aber stark für  $\text{SiO}_2:\text{BaO}$  (Erz:  $\text{SiO}_2:\text{BaO} = 5,3$ ; Schlacke 0,75). Der Gehalt an Barium steigt in der Schlacke um ein mehrfaches an, was auf einen Zuschlag von Barium (in Baryt enthalten) hinweist.

Die Ofenwand (chemische Zusammensetzung s. Tab. 3) hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Zusammensetzung der Schlacken, da ja das Verhältnis  $\text{Si}:\text{Ca}$  und  $\text{Si}:\text{Fe}$  konstant in Erz und Schlacke ist.

### Ofenwand

	X-BTS 232.1	X-BTS 232.2	X-BTS 233.3	X-BTS 225.2
interpretiert als	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid
	Ofenwand	geschmolzene Ofenwand	geschmolzene Ofenwand	verschlackte Ofenwand
<b>[g/kg] mass</b>				
SiO <sub>2</sub>	66.76	67.17	61.28	47.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.76	16.48	13.71	12.22
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.59	0.48	0.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.65	4.69	5.00	6.85
CaO	1.41	1.37	3.46	5.94
MgO	1.30	1.14	1.08	1.25
MnO	0.06	0.05	0.08	0.09
Pb	1.30	0.66	1.10	1.49
Ba	0.16	0.17	6.49	15.56
Na <sub>2</sub> O	0.46	0.49	0.62	0.99
K <sub>2</sub> O	6.21	6.49	5.46	3.43
S	–	0.28	0.62	0.81
SO <sub>3</sub>	0.26	–	–	–
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.09	0.13	0.16
CO <sub>2</sub>	0.38	0.15	0.07	1.95
<b>Total</b>	<b>99.44</b>	<b>99.82</b>	<b>99.57</b>	<b>99.21</b>
<b>% w</b>				
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	188	159	74	nd
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	64	49	nd	nd
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	42	49	nd	nd
NiO	19	14	nd	nd
CuO	55	62	15	nd
ZnO	141	169	673	827
Rb <sub>2</sub> O	228	225	176	132
SrO	149	198	2050	4180
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41	27	29	nd
ZrO <sub>2</sub>	226	252	276	288
Ag <sub>2</sub> O	nd	nd	22	48
SnO <sub>2</sub>	nd	nd	nd	nd
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	nd

Tab. 3: Chemische Zusammensetzung der Ofenwand.

In Trachsellaunen wurden Lignit und Holzkohle zum Heizen des Ofens gebraucht wie Schlackeneinschlüsse beweisen. Deren Asche, die in verschiedenen Verhüttungsprozessen bewusst als Zuschlag beigegeben wurde, kann einen Einfluss auf die Zusammensetzung der Schlacken haben. In den Schlacken von Trachsellaunen ist der Gehalt an Sr stark angestiegen im Vergleich zum denjenigen der Erze. Dies könnte eventuell auf den Einfluss der Holzkohle am Schlackenbildungsprozess zurückzuführen sein.

Vereinfacht kann die Verhüttung des Bleierztes mit folgender Gleichung beschrieben werden:

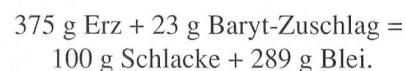


Da das Verhältnis  $\text{Si}:\text{Ca}$  in Erz und Schlacke gleich ist, und da dies Elemente sind, die nur bei sehr hohen Temperaturen reduziert werden, d.h. in die metallische Form gehen, kann davon ausgegangen werden, dass keine Zuschläge von Si und Ca gemacht wurden, und dass sämtliches Ca und Si aus dem Erz in die Schlacke übergeht. Diese zwei Elemente sind deshalb ideal, um die Produktion und die Ausbeute der Bleiproduktion in Trachsellaunen annähernd abzuschätzen. Der Einfluss der Ofenwand ist gering, derjenige der Holzkohle für diese zwei Elemente nicht von Bedeutung. Die Funktion der Gase kann mit einem rechnerischen Trick umgangen werden.<sup>9</sup>

Die Tabelle 4 drückt das Verhalten dieser zwei Elemente in mathematischer Form aus und rechnet zugleich auch den Zuschlag von Barium und die Menge produzierten Bleis aus. Dabei wird von der folgenden vereinfachten Gleichung ausgegangen:



Für eine Berechnung nur anhand des archäologischen Erzes ergibt dies (vgl. Tab. 4 unten):



Damit die Verhüttungsbedingungen ideal sind, muss ungefähr 3,6-mal mehr Barium ( $23,05/(3,75 \cdot 1,7) = 3,62$ ) zugegeben werden als im Ausgangserz enthalten ist. Dieses Resultat stimmt mit den grafisch ermittelten Werten überein (Abb. 4: in der Schlacke hat es 3,7-mal mehr Barium als im Erz).

Die Ausbeute kann auf zwei verschiedene Arten berechnet werden:

<sup>9</sup> Eschenlohr/Serneels 1991.

1. Die Ergiebigkeit, d.h. die Menge metallisches Blei im Verhältnis zum angereicherten Erz:

$$\text{Ergiebigkeit} = \text{Menge metallisches Blei} / \text{Menge Erz} = 289 \text{ g} / 375 \text{ g} = 77,1\%$$

2. Die Ausbeute, d.h. die Menge metallisches Blei im Verhältnis zum Blei, das im Erz enthalten ist:

$$\text{Ausbeute} = \text{Menge metallisches Blei} / \text{Menge Blei im Erz} = 289 / (3,75 * 77,52) = 289 / 290,7 = 99,4\%$$

Und wenn man in der Berechnung nicht nur die archäologischen Erze, sondern auch die geologisch angereicherten Erze mit einbezieht (unterer Teil der Tab. 4), ergeben sich folgende Zahlen:

$$500 \text{ g Erz} + 23,5 \text{ g Baryt-Zuschlag} = 100 \text{ g Schlacke} + 426,6 \text{ g Blei.}$$

$$\text{Ergiebigkeit} = \text{Menge metallisches Blei} / \text{Menge Erz} = 427 \text{ g} / 500 \text{ g} = 85,4\%$$

$$\text{Ausbeute} = \text{Menge metallisches Blei} / \text{Menge Blei im Erz} = 427 / (5,00 * 85,64) = 427 / 428,2 = 99,7\%$$

Man kann feststellen, dass die Zugabe von Barium in Form von Baryt sehr wichtig für den Verhüttungsprozess ist, denn damit werden die Schmelztemperaturen um 300 bis 400 °C gesenkt. Die Ergiebigkeit des im Labor angereicherten Erzes ist grösser (85%) als in den archäologischen Erzproben (77%). Der Unterschied ist nicht gross. Die Berechnungen basieren einzig auf chemischen Analysen, die effektive Ergiebigkeit ist sicher kleiner, da Erzstücke im Aufbereitungsprozess verloren gehen können und reduziertes Blei ungenügend von der Schlacke getrennt wurde und somit in ihr verloren geht. Gemäss historischen

Texten, die von Saheurs<sup>10</sup> transkribiert wurden, scheint die Ergiebigkeit auch viel kleiner gewesen zu sein. In zwei Fällen wird genau beschrieben, wie viel Erz verhüttet wurde und wie viel Blei damit gewonnen wurde. Im folgenden Kapitel werden die historischen Angaben mit den oben errechneten Resultaten verglichen.

#### 1.4 Vergleich mit der historischen Überlieferung

In Abbildung 5 (linke Seite) ist die Prozesskette von Trachsellauen dargestellt, wie sie von einem Zeitgenossen beschrieben wurde. Sie gibt Auskunft darüber, wie das Erz angereichert, verhüttet und kupelliert wurde, und macht Angaben zu den gebrauchten Mengen. Diese Zusammenstellung zeigt die Ergebnisse der Verhüttung von zwei verschiedenen Jahren, nämlich den Jahren 1787 und 1790.

Im Jahre 1787 wurde 102,5 Zentner Schlich, d.h. angereichertes, noch nicht geröstetes Erz verhüttet und 19,7 Zentner Blei gewonnen. Das ergibt eine Ergiebigkeit von 19% (Ergiebigkeit = Menge Metall. Blei / Menge Erz = 19,7 Z / 102,5 Z). Im Jahre 1790 wurde 110 Zentner Schlich verhüttet und 33 Zentner Blei gewonnen. Das ergibt eine Ergiebigkeit von 30% (= 33 Z / 110 Z). Diese Werte weichen bei oberflächlicher Betrachtung stark von den theoretisch errechneten Werten (77% und 85%) ab: Die errechnete Ergiebigkeit ist ungefähr zwei- bis dreimal grösser als die wirklich praktizierte. Gemäss einer historischen Quelle war aber das verhüttete Erz viel weniger gut aufbereitet worden, als für die theoretischen Berechnungen angenommen wurde:

<sup>10</sup> Saheurs 1974.

Element	Archäologisches Erz	+	Zuschlag	=	Schlacke	+	Metallisches Blei	X	Y	P
Si	X*2.95		-	=	10.93		-	3.71	-	-
Ca	X*3.15		-	=	11.84		-	3.76	-	-
Ba	X*1.70	+	Y	=	29.42		-	3.75 <sup>1)</sup>	23.05	-
Pb	X*77.52		-	=	1.62	+	P	3.75 <sup>1)</sup>	-	289.08

Element	Archäologisches und geologisches Erz	+	Zuschlag	=	Schlacke	+	Metallisches Blei	X	Y	P
Si	X*2.45		-	=	10.93		-	4.46	-	-
Ca	X*2.11		-	=	11.84		-	5.61	-	-
Ba	X*1.19	+	Y	=	29.42		-	5.0 <sup>1)</sup>	23.47	-
Pb	X*85.64		-	=	1.62	+	P	5.0 <sup>1)</sup>	-	426.58

<sup>1)</sup>ungefährer Mittelwert der zwei oben errechneten Zahlen

Tab. 4: Grundberechnungen zum Auswerten der Menge zugegebener Zuschlag, der Ergiebigkeit und der Ausbeute. X steht für den Erzfaktor, Y für die Menge Zuschlag und P für die Menge produzierten Bleis. Die Lösung für diese drei Variablen steht auf der rechten Tabellenseite.

«Die den Sommer über gewonnen Erze wurden zu Schlich gezogen und an trockenem Gewichte 110 Zentner erhalten, welche zugleich geschmolzen wurden. Aus dem Zentner Schlich wurde 30 Pfund Blei erhalten, d.h. das Erz-konzentrat enthielt 30% Blei.»<sup>11</sup>

Das gebrauchte Erz bestand demzufolge aus ungefähr 30% Blei und 70% sterilem Ganggestein. Für die Berechnungen wurde von zwischen 65% und 85% Blei und weniger als 35% Ganggestein ausgegangen. Das historische Erz-konzentrat war also zwei- bis dreimal weniger bleihaltig als das im Labor angereicherte Erz, die theoretischen Berechnungen stimmen deshalb mit den historischen Werten überein!

Das Hauptziel des Bleierzabbaues war die Gewinnung von Silber. Bis anhin konnten keine Überreste dieser Produktion (z.B. Bleiglätte) identifiziert werden. Diese scheint auch in Wirklichkeit nicht sehr gross gewesen zu sein, denn Saheurs vermerkt, dass «Deggeller [Anm: Vorsteher der Abbautätigkeiten von 1782 bis 1792], auf Grund der mir zugänglichen Dokumente, in der langen Bergbau-perioden von Trachsellauen als Einziger wirklich auch Silber produzierte. Die totale belegbare Silberproduktion unter Deggeller betrug 150.5 Lot oder rund 2300 Gramm!»,<sup>12</sup>

## 2. Eisengewinnung?

Nebst den grau-bräunlichen Schlacken, die eindeutig der Bleiverhüttung zugewiesen werden konnten, konnten glasierte Schlacken identifiziert werden (Abb. 7). Sie haben eine flaschengrüne Farbe, sind rund und eierförmig und ungefähr 4 x 4 x 6 cm gross. Die Unterseite ist auskristallisiert und zeigt Spuren von Holzkohle. Im Anschnitt sind sie mikrokristallin und wenig porös. Unter dem Mikroskop (Abb. 8) sind garbenförmige Minerale sichtbar. Sie haben die gleiche Zusammensetzung wie die Matrix und bestehen hauptsächlich aus Silizium, Aluminium, Kalzium und etwas wenig Eisen.

Tabelle 5 zeigt die chemische Zusammensetzung von 4 untersuchten Schlacken. Sie bestehen hauptsächlich aus Silizium (SiO<sub>2</sub>: 39,1–51,5%), Aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 18,9–20%), Kalzium (CaO: 16,2–27%), Eisen (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 5,2–7,9%) und nur wenig Barium und Blei.

Diese Schlacken unterscheiden sich durch ihre chemische Zusammensetzung, durch das Verhalten einiger chemischer Elemente und durch ihre physikalischen Eigenschaften von den oben beschriebenen Bleischlacken. Sie sind deutlich reicher an Silizium und Aluminium, zeigen etwas höhere Gehalte für Kalzium und wesentlich geringere Gehalte für Barium und Blei. Die Anteile an Eisen sind ungefähr gleich gross. Der Unterschied im chemischen Verhalten ist sehr deutlich für Silizium und Kalzium, wie in Abbildung 1 dargestellt ist: mit steigenden SiO<sub>2</sub>-Werten

nimmt der Anteil an CaO in den glasigen Schlacken ab im Gegensatz zu den Bleischlacken. Die chemische Zusammensetzung ist bestimmend für die Schmelztemperaturen: Gemäss theoretischen Werten (Phasendiagramm SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO)<sup>13</sup> bilden sich die glasigen Schlacken zwischen 1600 und 1700 °C, d.h. bei 400 bis 500 °C höheren Schmelztemperaturen als die oben beschriebenen Bleischlacken.

Die glasigen Schlacken sind demzufolge Überreste eines anderen Verfahrens als die Bleischlacken. Für deren Er-

### Glasige Schlacken

	X-BTS 218	X-BTS 219	X-BTS 220	X-BTS 221	X-BTS 224
interpretiert als	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid
	glasige Schlacke	glasige Schlacke	glasige Schlacke	glasige, zweiphasige Schlacke	glasige, zweiphasige Schlacke
[g/kg] mass					
SiO <sub>2</sub>	47.67	51.47	49.73	39.05	48.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.24	19.91	20.07	19.48	18.91
TiO <sub>2</sub>	0.873	0.909	0.921	0.757	0.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.63	7.08	7.04	7.87	5.24
CaO	21.65	16.18	17.53	26.94	20.46
MgO	3.28	2.44	3.05	3.85	3.56
MnO	0.125	0.106	0.12	0.163	0.11
PbO	0.0054	0.0014	0.0078	0.0052	0.00
BaO	0.0394	0.0422	0.05	0.0311	0.09
Na <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	nd	0.39
K <sub>2</sub> O	0.734	0.788	0.709	0.677	0.77
S	0.0426	0.0389	0.0344	0.049	0.05
SO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0285	0.0378	0.0341	0.258	0.05
CO <sub>2</sub>	0.23	0.60	0.26	0.29	0.71
<b>Total</b>	<b>99.55</b>	<b>99.60</b>	<b>99.56</b>	<b>99.42</b>	<b>99.57</b>
ppm					
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1420	1270	96	2480	1200
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	799	677	816	1120	684
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	nd	29	nd	26	46
NiO	nd	nd	nd	nd	nd
CuO	nd	nd	nd	29	nd
ZnO	22	19	nd	15	nd
Rb <sub>2</sub> O	34	35	33	33	33
SrO	473	434	452	396	426
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91	73	96	98	71
ZrO <sub>2</sub>	642	612	682	570	508
Ag <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	nd	nd
SnO <sub>2</sub>	nd	nd	nd	nd	nd
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	nd	nd

Tab. 5: Chemische Zusammensetzung der glasigen Schlacken.

11 N. 30: Quartal Reminiscere, vom 1. Chrismonat 1789 bis Horn. 1790; transkribiert in Saheurs 1974, 111.

12 Saheurs 1974.

13 Verein Deutscher Eisenhüttenfreunde 2001.

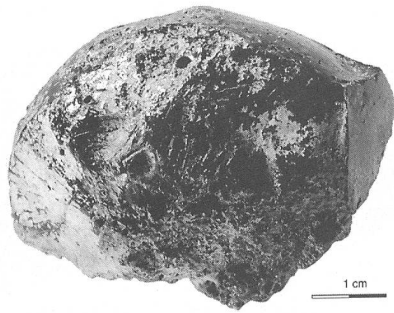


Abb. 7: Makroskopische Abbildung einer glasigen Schlacke.

zeugung gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder sind es Bleischlacken, die mit einer anderen Technik erzeugt wurden, oder es sind Schlacken aus der Eisenverhüttung. Verschiedene Angaben sprechen eher gegen diese erste Möglichkeit. Zum Beispiel der Bariumgehalt: Der tiefe Gehalt an Barium würde auf eine gute Erzaufbereitung hinweisen, die jedoch nicht so hohe Schmelztemperaturen benötigt; oder dann die Werte für Blei: Sie sind sehr tief, was auf eine vollständige Bleiextraktion hinweisen würde.

Diese Schlacken lassen sich am ehesten der Eisenverhüttung im Hochofenverfahren zuschreiben. Im Vergleich zu anderen Hochofenschlacken<sup>14</sup> zeigen diese jedoch etwas hohe Werte für BaO und PbO. Es ist auch recht erstaunlich, Eisenverhüttungsschlacken an einem Bleiverhüttungsort anzutreffen. Eine Möglichkeit wäre, dass diese Schlacken als Zuschlag oder als Ofenbaumaterial für die Bleiverhüttung gebraucht worden sind. Zum aktuellen Zeitpunkt der Forschung gibt es jedoch weder einen archäologischen noch einen metallurgischen Hinweis für einen solchen Anwendungszweck. Diese Schlacken scheinen nicht bearbeitet (verkleinert) worden zu sein, wie zu erwarten wäre, wenn es sich um einen Zuschlag handeln würde. Sie haben ebenso keine chemische Verwandtschaft mit der Ofenwand.

Eine andere Möglichkeit wäre, dass in Trachsellaunen wirklich Eisen verhüttet wurde. Gemäss historischen Quellen wurde im Lauterbrunnental Eisen abgebaut, das auch in diesem Tale verhüttet wurde. In Zweilütschinen soll es einen Hochofen gegeben haben, in dem vor allem Eisen, aber auch Blei geschmolzen wurde. Man kennt Erzlagerstätten in Mürren, in Stechelberg und am Dürlocherhorn.<sup>15</sup> Letzteres ist das einzige bergbaulich erschlossene Vorkommen. Es handelt sich um Eisenolithe aus der Dogger-Formation des Sedimentmantels des Aarmassivs (sog. Blegi-Oolithe).<sup>16</sup> Aus diesem Vorkommen sind keine Analysen bekannt, die chemische Zusammensetzung ist mit grösster Wahrscheinlichkeit aber ähnlich derjenigen aus der gleichen geologischen Formation aus dem Urbachtal.<sup>17</sup> Diese zeigen ein Verhältnis V:Cr ~ = 1:1, dasjenige in den untersuchten Schlacken aber von 2:1. Damit kann ausgeschlossen werden, dass Eisenerze aus dem Lauterbrunnental in Trachsellaunen verhüttet wurden.

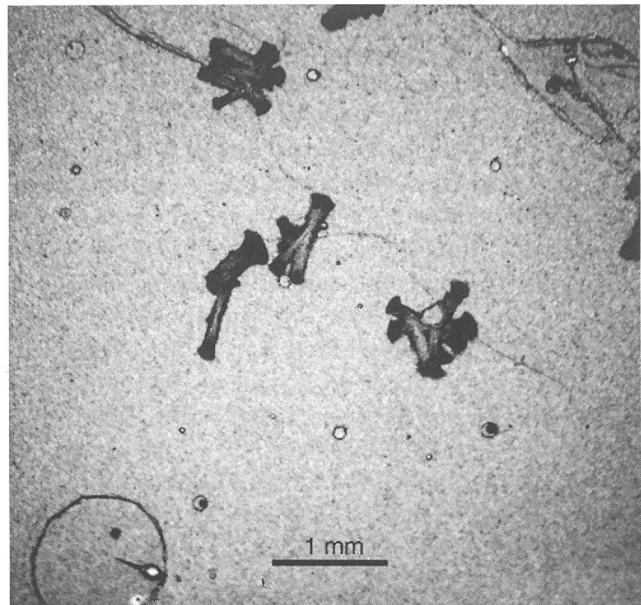


Abb. 8: Mikroskopische Abbildung der glasigen Schlacken. Die gartenförmigen Mineralien haben die genau gleiche Zusammensetzung wie die Matrix. Es sind wahrscheinlich Ca-Fe-Al-Silikate.

Bei den glasigen Schlacken handelt es sich mit grösster Wahrscheinlichkeit um Schlacken der Eisenverhüttung im Hochofenverfahren. Da nur wenige solcher Schlacken gefunden wurden, wäre es möglich, dass sie die Überreste eines Versuchs wären, Eisen zu verhütten, zum Beispiel um die Hüttenanlagen nach der Aufgabe der Bleibergwerke weiterhin zu gebrauchen. Dies würde auch die tiefen, jedoch vorhandenen Werte für Barium und Blei erklären, nämlich als Verschmutzung des vorher eingeschmolzenen Bleierzes. Die relativ hohen Eisenwerte für das Hochofenverfahren wären damit zu erklären, dass der Ofen nicht wirklich geeignet für die Eisenproduktion war, weshalb nicht mehr Eisen verhüttet wurde. Eine sichere Erklärung dieser Schlacken liegt aber im Moment nicht vor.

### 3. Die Schmiede

Unter dem archäologischen Material befanden sich kalottenförmige Schlacken (Abb. 9) und Schlackenfragmente, die schon wegen ihrer äusseren Form als Abfälle der Eisenverarbeitung gedeutet werden können. Es handelt sich um bis zu 10 cm grosse konkav-konvexe, sehr inhomogene Kalotten, die andeutungsweise schichtweise stark rostige Lagen aufzeigen und die auch Einschlüsse von Holzkohle haben. Sie sind stark magnetisch, metallisches Eisen ist makroskopisch sichtbar.

<sup>14</sup> Mahe-Le Carlier 1997.

<sup>15</sup> Cavalli et al. 1999.

<sup>16</sup> Gunzler-Seiffert 1933.

<sup>17</sup> Deverin 1945.

Die chemische Zusammensetzung wurde für vier Kalotten bestimmt (Tab. 6). Sie zeigt, dass diese Kalotten hauptsächlich aus Eisen bestehen mit Anteilen zwischen 76,5% und 90,4% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Der Anteil an SiO<sub>2</sub> beträgt zwischen 3% und 11%, Kalzium schwankt zwischen 1,8% und 3,7%. Die sehr variablen Anteile an Phosphor und Spurenelementen ermöglichen es, diese Kalottenschlacken in drei verschiedene Gruppen einzuteilen. Die erste Gruppe umfasst die Proben BTS 208 und BTS 212.2. Sie haben hohe Phosphorwerte (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 2,75–5,45%) und hohe Werte für V und Cr (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 2060–2130 ppm, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 1590–1830 ppm). Die zweite Gruppe wird durch die Probe BTS 237 gebildet mit Werten für P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 0,29, für V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 210 ppm und Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 116 ppm. Die Probe BTS 239 zeigt wieder ein anderes Spektrum mit P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 2,58%, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 1210 ppm und Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 1410 ppm.

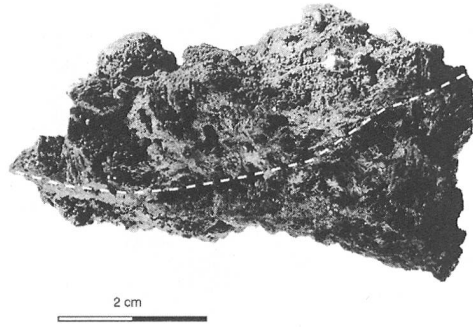


Abb. 9: Makroskopische Abbildung einer Schmiedeschlacke. Die gestrichelte Linie zeigt die kalottenartige Form.

### Schmiedeschlacken

	X-BTS 208	X-BTS 212.2	X-BTS 237	X-BTS 239
interpretiert als	Oxid	Oxid	Oxid	Oxid
	Schmiedeschlacken	Schmiedeschlacken	Schmiedeschlacken	Schmiedeschlacken
<b>[g/kg] mass</b>				
SiO <sub>2</sub>	3.13	3.81	7.97	10.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38	0.61	1.89	1.16
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.03	0.06	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90.36	83.28	81.58	76.48
CaO	1.88	2.92	3.73	1.79
MgO	0.28	0.76	0.27	0.52
MnO	0.05	0.09	0.07	0.04
PbO	0.02	0.03	0.02	0.43
BaO	0.03	0.04	0.09	2.50
Na <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	nd
K <sub>2</sub> O	0.04	0.10	0.50	0.18
S	0.36	–	–	–
SO <sub>3</sub>	–	1.72	0.13	2.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.78	5.45	0.29	2.58
CO <sub>2</sub>	nd	nd	1.62	nd
<b>Total</b>	<b>99.34</b>	<b>98.83</b>	<b>98.22</b>	<b>99.36</b>
<b>ppm</b>				
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2060	2130	201	1210
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1830	1590	116	1410
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	nd	nd	nd	nd
NiO	nd	nd	233	nd
CuO	nd	nd	95	nd
ZnO	92	57	56	1930
Rb <sub>2</sub> O	6.5	nd	9	nd
SrO	23	66	98	1360
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	8.5
ZrO <sub>2</sub>	nd	nd	11	nd
Ag <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	28
SnO <sub>2</sub>	nd	nd	nd	nd
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	nd	nd
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	nd	164	nd

Tab. 6: Chemische Zusammensetzung der Schmiedeschlacken.

Durch die chemische Zusammensetzung und die makroskopische Form können diese Reste eindeutig als Schmiedeschlacken interpretiert werden. Der extrem hohe Gehalt an Eisen und der geringe Gehalt an schlackenbildenden Anteilen zeigt, dass als Ausgangsmaterial ziemlich reines Eisen diente (keine Eisenschwämme, die zuerst ausgeheizt werden mussten). Die Gehalte an V, Cr und P lassen auf respektable Gehalte dieser Elemente im Ausgangseisen schliessen. Diese Elemente werden erst bei sehr hohen Temperaturen, d.h. ab 1300 °C bzw. 1500 °C, im Eisen legiert.<sup>18</sup> So hohe Temperaturen lassen auf eine Eisenproduktion im Hochofenverfahren schliessen. Für die erste Gruppe bedeutet dies, dass das Erz, das zur Erzeugung dieses Eisens gebraucht wurde, auch reich an V, Cr und P ist, jedoch arm an Mn. Eine solche Zusammensetzung ist sehr typisch für oolithisches Erz, das im 18. Jahrhundert im Jura oder in der Lorraine (sog. «minette») abgebaut wurde. Die zweite Gruppe, mit niedrigen Gehalten von V, Cr und P, deutet auf ein siderolithisches Ausgangserz («Bohnerz»)<sup>19</sup>. Die letzte Probe hat das typische chemische Spektrum einer Schlacke, die durch die Bleiverhüttung kontaminiert wurde. Der Gehalt an SiO<sub>2</sub> ist auf einen Zuschlag von Quarz zurückzuführen, das üblicherweise als Schweisspulver und Anti-Oxidans diente. Der hohe Anteil an SO<sub>3</sub> und CaO ist durch den Gebrauch von Holzkohle als Brennmittel bedingt.

Die Kalottenschlacken sind Überreste einer Bergschmiede, in der das bergmännische Gezähe in Stand gehalten wurde (Reparaturen, Schweißen, Schärfen, Härten). Das eiserne Gezähe stammt aus Eisen und Stahl, der im Hochofenverfahren erzeugt wurde und dessen Herkunftserz in zwei Fällen ein oolithisches Eisenerz und in einem Fall ein siderolithisches Erz war.

<sup>18</sup> Serneels 1993.

<sup>19</sup> Eschenlohr 2001; Serneels 1999.

## 4. Schlusswort

Die Untersuchung der Bleiverhüttung von Trachsellaunen ist erst an ihrem Anfang. Sie bringt in mehrerer Hinsicht neue Resultate, denn bis heute ist die Metallurgie der Bleiherstellung nur wenig untersucht worden. Dies ist sicher darauf zurückzuführen, dass nur wenige Abfälle dieser Produktion bekannt sind, im Gegensatz zur Kupfer- und vor allem Eisenmetallurgie, die in den letzten 20 Jahren intensiv untersucht worden sind.<sup>20</sup> In der Schweiz sind einige wenige Bleiverhüttungsorte im Kanton Graubünden, in der Zentralschweiz und im Wallis bekannt, sie datieren aber vorwiegend ins Spätmittelalter oder in die Neuzeit. Im Ausland gibt es verschiedene Studien über vormittelalterliche Verhüttungsorte, es handelt sich jedoch meistens um archäologische Arbeiten<sup>21</sup> oder Studien, die auf einer Typologisierung der verschiedenen Bleiverhüttungsabfälle anhand chemischer Analysen basieren.<sup>22</sup> Unseres Wissens ist die Arbeit über Trachsellaunen die erste, die versucht, die Bleiverhüttung anhand der gefundenen Abfälle zu quantifizieren. Die Ergebnisse basieren weitgehend auf einer theoretischen Auswertung der zahlreichen chemischen Analysen, konnten aber mit den historischen Daten verglichen und dadurch in ihrer Richtigkeit bestärkt werden.

## 5. Literatur

### *Cavalli et al. 1999*

D. Cavalli/E. Haldemann/R. Kündig/D. Reber/M. Schafer/B. Hofmann/F. Jaffe/N. Meisser/R. Plancherel, Carte des matières minérales de la Suisse, 1: 2 000 000, feuille 2: Valais. Herausgegeben von der Schweizerischen geotechnischen Kommission und dem CRSFA, 1999.

### *Déverin 1945*

L. Déverin, Etude pétrographique des minerais de fer oolithiques du Dogger des Alpes suisses (Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Lieferung 12, Bd. 2), Bern 1945.

### *Doswald et al. 1997*

V. Doswald/A. Duvauchelle/L. Eschenlohr/W. Fasnacht/V. Schaltenbrand, Obrecht/M. Senn-Luder/V. Serneels, Grabungstechnik: Erze, Schlacken, Eisen. Schweizerische Arbeitsgruppe für Eisenarchäologie; Vereinigung des arch.-tech. Grabungspersonals der Schweiz (VATG), Basel 1997.

### *Eschenlohr 2001*

L. Eschenlohr, Recherches archéologiques sur le district sidérurgique du Jura central suisse (Cahiers d'archéologie romande 88), Lausanne 2001.

### *Eschenlohr/Serneels 1991*

L. Eschenlohr/V. Serneels, Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt-Les Boulies (JU/Suisse) (Cahiers d'archéologie jurassienne 3), Porrentruy 1991.

### *Gassmann/Rehren 1998*

G. Gassmann/T. Rehren, Die mittelalterlichen Bleischlacken von der «Wilden Wiese» bei Müsen, in: C. Dahm/U. Lobbedey/G. Weisgerber, Der Altenberg, Bergwerk und Siedlung aus dem 13. Jahrhundert im Siegerland, Bonn 1998, 216–228.

### *Goldenberg 1996*

G. Goldenberg, Archäometallurgische Untersuchungen zur Entwicklung des Metallhüttenwesens im Schwarzwald. Blei-, Silber- und Kupfergewinnung von der Frühgeschichte bis zum 19. Jahrhundert, in: G. Goldenberg/J. Otto/H. Steuer (Hrsg.), Archäometallurgische Untersuchungen zum Metallhüttenwesens im Schwarzwald, Sigmaringen 1996, 9–274.

### *Günzler-Seiffert 1933*

H. Günzler-Seiffert, Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000 und Erläuterungen, Blatt 395 Lauterbrunnen, 1933.

### *Kutzer 1996*

H.-J. Kutzer, Blei-Silber-Verhüttung in Trachsellaunen, Berner Oberland, in: Bergknappe. Zeitschrift über Bergbau in Graubünden und der übrigen Schweiz 78, Hefte 1–4, 20. Jahrgang 1996, 23–26 und 17–20 und 20–26 und 4–7.

### *Mahé-Le Carlier*

C. Mahé-Le Carlier, Caractérisation pétrographique et chimique d'analogues de déchets vitrifiés actuels: les scories de la métallurgie ancienne. Etude de l'altération naturelle et expérimentale. Thèse de doctorat présentée à l'Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy 1997, nicht publiziert.

### *Saheurs 1974*

J.-P. G. Saheurs, Die Blei-Zink-Baryt-Lagerstätten bei Trachsellaunen (Berner Oberland/Schweiz). Dissertation der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern 1974.

### *Serneels 1993*

V. Serneels, Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale (Cahiers d'archéologie romande 61), Lausanne 1993.

### *Serneels 1999*

V. Serneels, Les laitiers du haut fourneau de Carena TI. Premiers résultats, in: *Mineria helvetica* 19b/1999, 25–40.

### *Tereygeol 2000*

F. Tereygeol, Mode de production de plomb et de l'argent à Melle durant l'époque carolingienne, in: Association des archéologues du Poitou-Charentes 29, 2000, 47–54.

### *Verein Deutscher Eisenhüttenleute 2001*

Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Schlackenatlas, Düsseldorf 2001.

20 Serneels 1993; Senn/Eschenlohr 2001.

21 Tereygeol 2000.

22 Goldenberg 1996; Gassmann/Rehren 1998.

