

7. ÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN VON PRÄHISTORISCHEN KUPFERSCHLACKENHALDEN IN DER EISENERZER RAMSAU

Barbara Emmerer, Elisabeth Steinlechner, Peter Trinkaus & Werner Gössler

Abstract

Title: Ecological Analysis of Prehistoric Copper Smelting Sites in the Valley of the Eisenerzer Ramsau, Styria, Austria

The heavy metals copper, iron, zinc, arsenic, and cadmium show, in contrast to lead, a significant reduction of the concentrations in dependency on the distance of the slag heaps of Bronze Age copper smelting sites in the valley of the Eisenerzer Ramsau in the Eastern Alps.

In the most contaminated areas (copper concentrations of the soils: 23.000 mg/kg) only mosses and lichens exist. In lower contaminated areas a coexistence of mosses and vascular plants could be observed. Two species of vascular plants *Rumex acetosella* ssp. *acetosella* und *Saxifraga stellaris* ssp. *robusta* show a high resistance against high copper concentrations.

Significantly higher concentrations of lead, zinc and cadmium than in soil were observed in the dominating earthworm species *Dendrobaena attemsi*.

Zusammenfassung

Bei den Elementen Kupfer, Eisen, Zink, Arsen und Cadmium ist im Gegensatz zum Blei eine signifikante Abnahme der Werte mit zunehmender Entfernung zu Halden von prähistorischen Kupferschmelzplätzen in der Eisenerzer Ramsau in den Ostalpen festzustellen.

In den am stärksten von Schwermetallen kontaminierten Bereichen (Kupfergehalt der Böden: 23.000 mg/kg) sind nur Moose und Flechten überlebensfähig.

In weniger kontaminierten Haldenbereichen kommen neben den Moosen auch Gefäßpflanzen vor. Die Arten *Rumex acetosella* ssp. *acetosella* und *Saxifraga stellaris* ssp. *robusta* erweisen sich hierbei als besonders resistent.

Eine deutlich über den Bodengehalt hinausgehende Konzentration von Schwermetallen konnte bei der dominierenden Lumbricidenart *Dendrobaena attemsi* für die Elemente Blei, Zink und Cadmium nachgewiesen werden.

7.1 Einleitung

Bei der Gewinnung von Erzen bleiben Taubgestein und Erze mit geringem Metallgehalt zurück, die meist in der unmittelbaren Umgebung des Abbaues verhaldet werden. Auch die bei der Weiterverarbeitung und Verhüttung der Erze entstehenden Produktionsabfälle (Schlacken etc.) werden in der Regel im Nahbereich der Hüttenanlagen in Form von Halden abgelagert.

Da die Entwicklung der Bodenfauna und damit der Bodenbildungsprozess im Bereich von Schwermetallstandorten nur sehr langsam abläuft, fehlt auf Halden häufig über lange Zeit eine Vegetationsbedeckung.

Die gesicherte zeitliche Zuordnung, die vergleichsweise große Anzahl und die leichte Zugänglichkeit zu Probenmaterial, lassen die Schlackenfundplätze der prähistorischen Kupfererzverhüttung in der Eisenerzer Ramsau für umfassendere interdisziplinäre Untersuchungen besonders geeignet erscheinen (KLEMM in diesem Bd., Kap. 2.4; KLEMM, RESCH † & WEINEK in diesem Bd.).

Diese Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Kulturlandschaftsforschungsprojektes „Perspektiven zur Gestaltung und Nutzung von Bergbaufolgelandschaften“ (KATTER & al. 2000). Von den anderen Habitaten in der Eisenerzer Ramsau heben sich diese Kupferschlackenhalden deutlich ab. Folgende Gründe sind hierfür ausschlaggebend:

- die extremen abiotischen Bedingungen (sehr hohe Kupfergehalte – siehe Ergebnisse der Bodenuntersuchungen)

und die daraus resultierende Einzigartigkeit dieser Habitate,

- die sehr geringe bis extrem geringe Artenvielfalt an Gefäßpflanzen, bedingt durch die physiologisch extremen Bedingungen,
- die in den meisten Halden zu beobachtende Dominanz von Kryptogamen (zumeist Moose, seltener Flechten)
- und schließlich die insgesamt geringe Flächenausdehnung dieser Schwermetallstandorte.

Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich in bodenkundliche, vegetationskundliche und faunistische Arbeiten untergliedern.

7.2 Methodik

Die in dieser Arbeit angeführten bodenkundlichen Daten beziehen sich auf den Fundpunkt FP 60104.007 beziehungsweise das Umfeld dieser Schlackenhalde (KLEMM in diesem Band). Die Probenahme für die Untersuchung der Kupfergehalte und der Bleigehalte erfolgte am 21. September 1999 mit Hilfe von Bodenstechern, wie sie beispielsweise auch für Nmin-Untersuchungen verwendet werden. Mit diesen Bodenstechern wurden pro Beprobungspunkt 10 Einstiche bis in eine Tiefe von 20 Zentimetern vorgenommen und dann zu einer Mischprobe vereinigt. Pro Probepunkt wurden 3 Paralleluntersuchungen als Basis für eine prüfstatistische Auswertung durchgeführt. Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Beprobungspunkte erfolgt unter Punkt 4.

Die Untersuchungen der Schwermetallgehalte wurden vom Institut für Analytische Chemie der Karl-Franzens-Universität Graz (Eisen, Kupfer, Zink, Arsen, Cadmium und Blei [Mikrowellenaufschlusssystem mittels konzentrierter Salpetersäure und konzentrierter Salzsäure mit Temperaturkontrolle]) durchgeführt. Die Einzelwerte sind KATTER & al. 2000 zu entnehmen.

Die statistische Auswertung der bodenkundlichen Ergebnisse erfolgte mit dem Spearman'schen Rang-Korrelationskoeffizienten und dem U-Test von Wilcoxon, Mann und Whitney (siehe RAMM & HOFMANN 1982, SACHS 1984). Die Terminologie der Signifikanzniveaus richtet sich nach RAMM & HOFMANN 1982).

Für die Bestimmung der Bodenfeuchte und der Bodenazidität wurden pro Untersuchungsfläche je 5 Einzelproben bis in eine Tiefe von 20 cm entnommen. Zur Bestimmung wurden die Methoden nach SCHINNER, ÖHLINGER & KANDELER 1991 angewendet. Dabei wird zur Bestimmung der Bodenfeuchte das Bodenmaterial bei 105 °C getrocknet und der Trockensubstanzgehalt bzw. Wassergehalt nach Differenzwägung bestimmt. Zur Bestimmung der Azidität wurde eine 0,01 M CaCl₂-Lösung verwendet.

Die Nomenklatur der Gefäßpflanzenarten erfolgte nach ADLER, OSWALD & FISCHER 1994, die der Moose nach FRAHM & FREY 1983 und die der Flechten nach WIRTH 1980. Die Ermittlung der ökologischen Zeigerwerte erfolgte nach ELLENBERG & al. 1992 und zwar mit und ohne Berücksichtigung der Abundanzen und Deckungsgrade. Die Artmächtigkeitskala nach BRAUN-BLANQUET 1964 wurde zur kombinierten Schätzung von Abundanz und Deckungsgrad verwendet.

Für die Regenwurmuntersuchungen wurde der Standort in drei, entlang eines angenommenen Schadstoffgradienten angeordnete Untersuchungsflächen unterteilt, wobei die mittlere Entfernung der Fläche I zum moosdominierten Haldenbereich ca. 3–10 m, der Fläche II ca. 150 m und der Fläche III ca. 300 m betrug. Die Fläche I entspricht dem Probepunkt 3, die Fläche II dem Probepunkt 4 und die Fläche III dem Probepunkt 5 der Bodenuntersuchungen.

Im September des Jahres 1997 sowie im Mai, August und September 1998 wurden für die Untersuchung der Populationsstrukturen auf je 5 Teilflächen der drei Untersuchungsflächen 0,25 m² Boden beprobt. Als Fangmethode wurde die Formalinaufschüttungsmethode nach SATCHELL 1969 in Kombination mit Handauslese angewendet. Die Bestimmung der Regenwürmer erfolgte im Labor unter einem Binokular. Als Bestimmungsliteratur wurde ZICSI 1965a, ZICSI 1965b und BOUCHE 1972 verwendet. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte hinsichtlich Abundanz und Biomasse, biologischer Entwicklung beziehungsweise Altersstrukturen sowie Artenspektrum.

Die auf den Flächen am häufigsten vorkommende Art, *Dendrobaena attemsi*, wurde hinsichtlich ihrer Schwermetallanreicherung untersucht. Für die Untersuchungen wurden die Regenwürmer im Untersuchungsgebiet lebend gesammelt und über zwei Wochen ohne Futtergabe am Leben erhalten. Die Probenahmen erfolgten am 21. September 1999. Die Analysen (ICP-MS Messung) wurden am Institut für Chemie – Analytische Chemie der Karl-Franzens-Universität Graz durchgeführt.

7.3 Vegetation

7.3.1 Vegetation der Kupferschlackenhalde in der Eisenerzer Ramsau

Nach den vegetationskundlichen Untersuchungen der Halden der Fundstellen FP 60104.007, 60104.008, 60104.010 und 60104.012 (siehe EMMERER 2000) wurde eine Einteilung in die folgenden Typen getroffen.

Typus a: Moose dominieren; daneben gelegentlich Flechten; Farne und Blütenpflanzen fehlen gänzlich.

Typus b: Moose dominieren; daneben gelegentlich Flechten und vereinzelt Blütenpflanzen; von den Blütenpflanzen dringt *Rumex acetosella* am weitesten in die moosdominierten Bereiche vor.

Typus c: Moose (Flechten) und Blütenpflanzen mit ähnlichen Deckungswerten.

Typus d: Blütenpflanzen vorherrschend; jedoch keine Baumschicht ausgebildet; In einigen Aufnahmen kommen *Vaccinium myrtillus* als Zwergstrauch und bei einer Aufnahme *Picea abies* in der Strauchschicht vor.

Typus e: Fichte (*Picea abies*) dominiert; Vegetation weicht von der angrenzender Wälder nicht ab und typische Zeigerarten für Schwermetallstandorte fehlen.

Sehr scharf ist die Abgrenzung zwischen denjenigen Bereichen, in denen Phanerophyten, nämlich Fichten, dominieren und denjenigen, in denen Vertreter dieser Lebensformengruppe fehlen. In diesen Randbereichen ist der Zustand der Fichten als ausgesprochen schlecht zu bezeichnen (Nadelvergilbungen, viele abgestorbene Exemplare). Auch viele der in der Krautschicht angrenzender Wälder vorkommende Arten, wie zum Beispiel *Homogyne alpina*, *Lycopodium annotinum* und *Calamagrostis arundinacea* sind in den Typen a, b, c und d zuzuordnenden Flächen nie anzutreffen. In den an die von Phanerophyten dominierten Bereiche angrenzenden Haldenbereichen zeigen diese Arten zumeist deutliche Schadsymptome (Pilzbefall und vorzeitigen Blattverlust bei *Vaccinium myrtillus*, Absterben von Sprossen bei *Lycopodium annotinum*).

Gefäßpflanzenarten, die in den an die Halden angrenzenden bodensauren Fichtenwäldern mehr oder weniger stetig anzutreffen sind, aber auf den Halden selbst fehlen sind *Blechnum spicant*, *Calamagrostis arundinacea*, *Dryopteris filix-mas*, *Gymnocarpium dryopteris*, *Hieracium murorum*, *Homogyne alpina*, *Huperzia selago*, *Luzula luzuloides*, *Luzula sylvatica*, *Lycopodium annotinum*, *Maianthemum bifolium*, *Nardus stricta*, *Oxalis acetosella*, *Rubus idaeus*, *Sorbus aucuparia* und *Veratrum album*.

Gefäßpflanzenarten, die in den an die Halden angrenzenden bodensauren Fichtenwäldern stetig anzutreffen sind, aber auf den Halden zumeist nur in Einzelexemplaren auftreten, sind *Avenella flexuosa*, *Larix decidua* (Einzelexemplar in der Krautschicht, wenig vital), *Melampyrum pratense* (Einzelexemplar; wahrscheinlich auf *Vaccinium myrtillus* parasitierend), *Picea abies* (auf den Halden meist nur in Krautschicht – nur in einem Einzelfall in der Strauchschicht; wenig vital und absterbend), *Vaccinium myrtillus* (wenig vital, teilweise blattlos).

Gefäßpflanzenarten, die auf den Halden stetig oder mit vergleichsweise hohen Deckungsgraden vorkommen, je-

doch in den an die Halden angrenzenden bodensauren Fichtenwäldern fehlen, sind *Saxifraga stellaris* ssp. *robusta* und *Rumex acetosella* ssp. *acetosella* (Abb. 1 und 2).

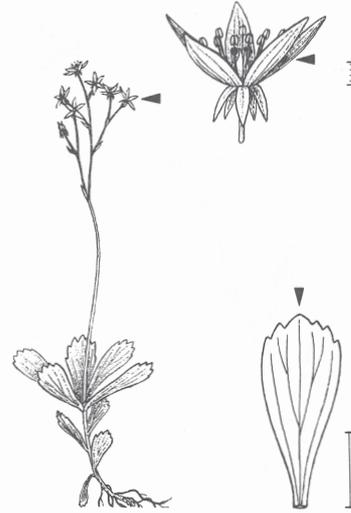


Abb. 1: *Saxifraga stellaris* ssp. *robusta* – Gewöhnlicher Stern-Steinbrech (nach JÄGER & WERNER 1995).

Von der arktisch-alpinen Art *Saxifraga stellaris* unterscheiden ADLER, OSWALD & FISCHER 1994 zwei Subspecies, nämlich den Gewöhnlichen Stern-Steinbrech (subsp. *robusta*) und den im Blütenstand zahlreiche Brutknospen bildenden Brut-Stern-Steinbrech (subsp. *prolifera*). Von den beiden Unterarten konnte im Untersuchungsgebiet nur *Saxifraga stellaris* subsp. *robusta* angetroffen werden (Abb. 1). Dort allerdings mit einem auffallend hohen Deckungsgrad. Nach ELLENBERG & al. 1992 zeichnet sich *Saxifraga stellaris* nicht durch Schwermetallresistenz aus. Allerdings führen PUNZ & ORASCHE 1995 für Kupferstandorte auf nichtkalkigem Substrat folgende stetig vorkommende Gefäßpflanzenarten an: *Silene vulgaris*, *Picea abies*, *Larix decidua*, *Alnus alnobetula*, *Acer pseudoplatanus* und *Saxifraga stellaris*. Auch wird diese Art nach SAUKEL 1980 als Pionier bei der Besiedlung von feuchten bis nassen, extrem Cu-belasteten Böden beschrieben (PUNZ & KÖRBER-ULRICH 1993). Außer auf den Kupferhalden ist *Saxifraga stellaris* im Untersuchungsgebiet häufig in Quellfluren und auch auf Forststraßenanrissen anzutreffen.

Die Sammelart *Rumex acetosella* agg. ist in Österreich mit drei Subspecies (siehe ADLER, OSWALD & FISCHER 1994) vertreten, nämlich subsp. *pyrenaeicus*, subsp. *acetosella* und subsp. *acetoselloides*. Bei den auf den Kupferhalden angetrof-

fenen Pflanzen handelt es sich durchwegs um *Rumex acetosella* subsp. *acetosella* (Abb. 2).



Abb. 2: *Rumex acetosella* ssp. *acetosella* – Kleiner Sauerrampfer (nach JÄGER & WERNER 1995).

Rumex acetosella konnte in fast allen Halden und zwar oftmals mit hohem Deckungsgrad angetroffen werden, während diese Art in den angrenzenden Wäldern vollkommen fehlt. Nach ELLENBERG & al. 1992 wird *Rumex acetosella* subsp. *acetosella* (wie auch *Rumex acetosa*) als „mäßig schwermetallresistent“ eingestuft. Außer auf den Kupferhalden ist *Rumex acetosella* im Untersuchungsgebiet nur sehr selten, und zwar sporadisch als Pionier auf Forststraßenanrissen, zu finden.

In den am stärksten kontaminierten Haldenbereichen fehlen Gefäßpflanzen gänzlich. Von den dort vorherrschenden Moosen wurden 10 Arten festgestellt, die bereits in der Literatur (BRAUN-BLANQUET 1964, GAMS 1966, ZECHMEISTER & PUNZ 1990, PUNZ & al. 1994) als schwermetallresistente Arten beschrieben sind (siehe Tabelle 1).

7.3.2 Vegetation des Fundpunktes FP 60104.007

Die Lage des Fundpunktes FP 60104.007: Österreich, Steiermark, Eisenerzer Alpen, Eisenerzer Ramsau W von Eisenerz, N-Flanke des Ochsenbodens, am orographisch linken Hang über dem Halsbach, ca. 1400 m, 47°30'30"N / 14°48'55"E, oberer, ca. 15° geneigter Teil einer Kupfer-

Tab. 1: Auflistung von in den Kupferschlackenhalde in der Eisenerzer Ramsau vorkommenden Moosen, die bereits in anderen Arbeiten über Schwermetallvegetation erwähnt wurden.

<i>Bryum capillare</i>	„Moos auf schwermetallreichen Standorten“, Kalkgrusmoos (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Campyllum calcareum</i>	(<i>C. chrysophyllum</i> : „Moos auf schwermetallreichen Standorten“ – Klassenkennmoos der Kalkfelsesmoose) – ZECHMEISTER & PUNZ 1990.
<i>Cephaloziella</i> sp.	<i>C. phyllacantha</i> : chalkophiles Moos (ZECHMEISTER & PUNZ 1990, GAMS 1966, BRAUN-BLANQUET 1964).
<i>Encalypta streptocarpa</i>	„Moos auf schwermetallreichen Standorten“, Klassenkennmoos der Kalkfelsesmoose (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Nardia scalaris</i>	„Kupfermoos“ oder eines seiner Begleiter, gehört zu den Kennarten des Pogonatum urnigeri; Hygrophyt mit größerer Schwermetallresistenz als andere Arten u. kommt daher auch an den klassischen Kupferstandorten vor (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Oligotrichum hercynicum</i>	„Kupfermoos“ oder eines seiner Begleiter, gehört zu den Kennarten des Pogonatum urnigeri (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Scapania</i> cf. <i>scandica</i>	<i>S. obcordata</i> : Moos auf schwermetallreichen Standorten (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Cephalozia bicuspidata</i>	„Kupfermoos“ oder eines seiner Begleiter (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Sanonia uncinata</i>	steter Begleiter der Kalkfelsesmoose auf den Halden (ZECHMEISTER & PUNZ 1990).
<i>Pohlia drummondii</i>	„Kupfermoos“ oder ein Begleiter von „Kupfermoosen“, Hygrophyt mit größerer Schwermetallresistenz als andere Arten und kommt daher auch an den klassischen Kupferstandorten vor (ZECHMEISTER & PUNZ 1990). Angabe für einen Fund auf einem urgeschichtlichen Kupferschmelzplatz (Villanderer Alpe) und Verweis auf den Kupferstandort Schwarzwand/Großartal in Salzburg (PUNZ & al. 1994).

erz-Schlackenhalde (EMMERER 2000; KLEMM in diesem Bd., Kap. 2.4; KLEMM, RESCH † & Weinek in diesem Bd.).

Es handelt sich hier um eine große Schlackenhalde mit mehreren Flächen bedeckt von charakteristischer Vegetation. Das Umfeld des Haldenkomplexes ist ein bodensaurer Fichtenforst mit vereinzelt Lärchen. Die orographisch am weitesten rechts liegende Fläche dieser Halde ist die markanteste im Untersuchungsgebiet (Klemm, Resch † & Weinek in diesem Band). An einen oberen, eher leicht geneigten Bereich (ca. 15°) schließt nach einem deutlichen Abbruch ein steiler Abhang mit lockerem, stark bewegtem Untergrund an. Der Boden der gesamten Halde ist sehr flachgründig, locker und rutscht scheinbar immer wieder nach. Weiters ist er mit Ausnahme eines Randbereiches an der linken Haldenseite sehr gut durchfeuchtet. Die Grenze der Halde zu ihrem Umfeld ist durch einen plötzlichen Wechsel der Vegetationszusammensetzung ganz deutlich zu erkennen (Abb. 3).

Im oberen Haldenbereich sind nur Moose (*Nardia scalaris*, *Cephalozia bicuspidata* und *Pohlia nutans*) anzutreffen und Gefäßpflanzen fehlen gänzlich (Probepunkt 1).

An einen moosdominierten Übergangsbereich (*Nardia scalaris*, *Oligotrichum hercynicum*, *Polytrichum formosum*, *Jungermannia obovata*, *Pohlia andalusica* und *Pohlia nutans*) mit einzelnen Exemplaren von *Rumex acetosella* schließt ein Bereich mit geringeren Deckungsgraden von Moosen (*Nardia scalaris*, *Dicranum scoparium*, *Polytrichum formosum*, *Pleurozium schreberi* und *Lophozia obtusa*) und höheren Deckungsgraden von Gefäßpflanzen (*Rumex acetosella*, *Saxifraga stellaris*, *Vaccinium myrtillus*, *Melampyrum pratense*, *Larix decidua* [Krautschicht] und *Picea abies* [Krautschicht]) an (Probepunkt 2).

Im unteren, stark geneigten Teil findet man im Zentrum der Haldenfläche einen ca. 3 m² großen Bereich, der eine 100%-Deckung mit *Nardia scalaris* und *Polytrichum formosum* aufweist. Dazwischen ist wenig *Vaccinium myrtillus*, *Rumex acetosella* und *Saxifraga stellaris* und ein Einzelexemplar von *Rhododendron ferrugineum* in der Strauchschicht eingestreut.

7.4 Untersuchungen zu den Schwermetallgehalten der Böden

Der Probepunkt 1 („moosdominierter Haldenbereich“) ist durch das Fehlen von Gefäßpflanzen charakterisiert.



Abb. 3: Fundpunkt FP 60104.007 mit auffällig scharfer Abgrenzung zwischen den von verschiedenen Moosen und den von Gefäßpflanzen dominierten Bereichen.

Am Probepunkt 2 („gefäßpflanzendominierter Haldenbereich“) herrscht neben verschiedenen Moosarten *Rumex acetosella* ssp. *acetosella* vor. Die Vegetation weicht von der der angrenzenden bodensauren Fichtenwälder sehr deutlich ab.

Die Probepunkte 3 (3–10 m Entfernung vom moosdominierten Bereich), 4 (ca. 150 m Entfernung vom moosdominierten Haldenbereich) und 5 (ca. 300 m Entfernung vom moosdominierten Haldenbereich) weichen im Gegensatz dazu bezüglich der Vegetation von den bodensauren Fichtenforsten (einzige Art in der Baumschicht: *Picea abies*) in der Umgebung nicht merklich ab. Typische Schwermetallzeiger fehlen. In der Krautschicht dominieren Säurezeiger wie *Vaccinium myrtillus*, *Homogyne alpina*, *Avenella flexuosa* und *Oxalis acetosella*.

Die Kupferwerte der Halde (Mittelwert: 11.289 mg/kg), wobei zur Halde auch die Bereiche (3–10 m Entfernung vom moosdominierten Bereich) gezählt werden, die sich zwar bezüglich der Vegetation nicht von den Fichtenforsten der Umgebung abheben, wo im Boden jedoch reichlich Schlackenmaterial anzutreffen ist, liegen hochsignifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,1%) höher als die Werte in 150 und 300 Meter Distanz (Mittelwert: 238 mg/kg). Dasselbe gilt für die Eisen- und Arsengehalte der Böden. Sehr signifikant höher (Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%) liegen die Zink- und Cadmiumgehalte der Halde (Mittelwerte: Zink – 93 mg/kg; Cadmium – 0,41 mg/kg) verglichen mit den Werten in 150 und 300 Metern Distanz (Mittelwerte: Zink – 93 mg/kg; Cadmium – 0,41 mg/kg). Keine diesbezüglichen Unterschiede sind bei den Bleigehalten festzustellen.

Keine signifikanten Unterschiede sind bezüglich der Kupfergehalte der gefäßpflanzendominierten Bereiche und denen der Bereiche in 3–10 m Entfernung zu erkennen. Signifikant höher als im gefäßpflanzendominierten Bereich (Mittelwert: 4.210 mg/kg) und in 3–10 Meter Entfernung vom moosdominierten Bereich (Mittelwert: 6.357 mg/kg) liegen die Kupfergehalte der Böden jedoch im moosdominierten Bereich (Mittelwert: 23.000 mg/kg). Das selbe Phänomen ist auch bei den Elementen Zink und Cadmium festzustellen.

7.5 Untersuchungen zur Bodenfeuchtigkeit und zum pH-Wert der Böden

Diese Untersuchungen wurden parallel zu den Regenwurmuntersuchungen im Umfeld des Fundpunktes FP 60104.007 durchgeführt, da die Verteilung der Regenwürmer, aber auch die Schwermetallaufnahme sehr stark von diesen Parametern abhängt. Der Standort wird in drei ent-

lang eines möglichen Schadstoffgradienten angeordnete Untersuchungsflächen unterteilt, wobei die mittlere Entfernung der Fläche I zur Halde ca. 3–10 m, der Fläche II ca. 150 m und der Fläche III ca. 300 m beträgt.

Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei pH-Werten zwischen 3 und 4 und bei mittleren Wassergehalten zwischen 43 und 66% um einen sauren und feuchten Standort handelt. Diese Ergebnisse werden auch durch die mittleren Zeigerwerte der Gefäßpflanzen (nach ELLENBERG 1992) und der Moose (nach DÜLL 1992) auf den Kupferschlackenhalde bestätigt, und zwar mit und ohne Gewichtung (Gewichtung nach DURWEN 1982) der Deckungsgrade (siehe KATTER & al. 2000).

7.6 Regenwurmuntersuchungen

Der Boden des untersuchten Haldenstandortes wies nur epigäisch lebende Regenwurmartens (*Dendrobaena attemsi*, *Dendrobaena veydovskyi*, *Dendrobaena octaedra* und *Lumbricus spec.*) auf. Die Dominanzstruktur, die auf allen drei Untersuchungsflächen (mittlere Distanzen zur Halde: Fläche I: ca. 3–10 m; Fläche II: ca. 150 m; Fläche III: ca. 300 m) deutlich von *Dendrobaena attemsi*, einer oligoporeuten Art (WILCKE 1955), geprägt wurde (siehe Tabelle 1), kann als Hinweis auf die besondere Konkurrenzfähigkeit dieser Species unter den vorliegenden extremen Bodenverhältnissen gewertet werden. Die gefundene Artenzusammensetzung scheint eine Besonderheit dieses Standortes darzustellen, da keine vergleichbaren Ergebnisse in der Literatur gefunden werden konnten. Die Fläche II schnitt hinsichtlich aller untersuchten Populationsstrukturparameter (Artenspektrum, Besiedlungsdichten, Populationsentwicklung im Jahresverlauf) am besten ab.

Tab. 2: Regenwürmer der Flächen I, II und III unter Berücksichtigung sämtlicher Beobachtungstermine (Mittelwerte der Individuenzahlen der Adulten und Subadulten und darunter die Dominanzwerte in Prozent).

Art	Fläche I	Fläche II	Fläche III
<i>Dendrobaena attemsi</i>	115,2 [95%]	93,6 [83%]	79,2 [93%]
<i>Dendrobaena veydovskyi</i>	5,6 [5%]	11,2 [10%]	1,6 [2%]
<i>Dendrobaena octaedra</i>	–	5,6 [4,9%]	4,0 [4,7%]
<i>Lumbricus spec.</i>	–	2,4 [2%]	–

Eine über den Bodengehalt hinausgehende Konzentration von Schwermetallen konnte bei *Dendrobaena attemsi* (untersucht wurden subadulte und adulte Individuen) für die Elemente Blei, Zink und Cadmium nachgewiesen werden (siehe Tabelle 2), wobei die höchsten Akkumulationsfaktoren bei Cadmium gefunden wurden. Auch Blei wurde sehr stark angereichert. Eine so starke Akkumulation ist unter den gegebenen Milieubedingungen nichts Außergewöhnliches. So konnte IRELAND 1975 in Experimenten nachweisen, dass *Dendrobaena rubida* Bleimengen bis zu 4.160 ppm aus einer mit 1.713 ppm Blei belasteten Erde akkumulierte. ANDERSEN 1979 fand bei *Allolobophora rosea* eine Cadmiumanreicherung um den Faktor 39 gegenüber dem Bodencadmiumgehalt.

Bei Kupfer und Eisen wurden im Regenwurmgewebe deutlich geringere Gehalte nachgewiesen als im Boden.

Tab. 3: Schwermetallgehalte von *Dendrobaena attemsi* (Mittelwerte aus 3 Parallelproben; {Spannweiten}).

Regenwurmproben September 1999	Elementgehalte [mg/kg TM]				
	Eisen	Kupfer	Zink	Cadmium	Blei
Fläche I	103 {26,1}	25,6 {0,1}	184 {4,1}	4,3 {0,0}	834 {56,7}
Fläche II	129 {13,0}	7,2 {1,0}	209,5 {1,0}	4,7 {0,6}	196,5 {29,0}
Fläche III	116 {19,1}	6,7 {0,0}	216 {1,3}	5,9 {0,1}	466 {25,7}

Tab. 4: Akkumulationsfaktoren (Mittelwerte aus 3 Parallelproben).

Regenwurmproben September 1999	Zink	Cadmium	Blei
Fläche I	2,6	10,5	10,5
Fläche II	4,0	22,5	2,3
Fläche III	4,7	23,7	6,4

Dendrobaena attemsi zeigte in Bezug auf Zink und Cadmium ein ähnliches Akkumulationsverhalten, ausgedrückt durch korrelierende Akkumulationsfaktoren, wobei Cadmium aber im Durchschnitt 4–5mal stärker akkumuliert wurde als Zink. WEI-CHUN MA 1982 kam bei der Art *Allolobophora caliginosa* zu ähnlichen Ergebnissen. Bezüglich der Akku-

mulationsfaktoren herrscht in der Literatur kaum Einigkeit, es wird jedoch immer wieder bestätigt, dass Cadmium bevorzugt akkumuliert wird (vgl. MARTIN & COUGHTREY 1982, IRELAND 1983, MORGAN & MORGAN 1988). Nach VAN HOOK 1974 und WRIGHT & STRINGER 1980 wird Blei in Regenwürmern nicht über den Bodengehalt hinaus angereichert. Im Gegensatz dazu konnte in den vorliegenden Untersuchungen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Autoren (IRELAND 1975, PERÄMÄKI & al. 1992, BREWER & BARRETT 1995) eine starke Akkumulation dieses Elements nachgewiesen werden. Diese divergierenden Ergebnisse sind wahrscheinlich vor allem auf Unterschiede hinsichtlich bestimmter edaphischer Faktoren der untersuchten Standorte, wie beispielsweise des pH-Wertes und des Ca-Gehaltes, die die Bleianreicherung in Regenwürmern wesentlich beeinflussen (MORGAN & MORGAN 1988, PERÄMÄKI & al. 1992), zurückzuführen.

Der Schadstoffgradient im Boden wurde nur durch Kupfer nachgezeichnet. Die Regenwürmer der Fläche II enthielten die niedrigsten Bleikonzentrationen, was möglicherweise ihr vergleichsweise gutes Abschneiden hinsichtlich der Strukturparameter erklären könnte.

7.7 Literatur

ADLER, OSWALD & FISCHER 1994
 ADLER W., OSWALD K. & FISCHER R., Exkursionsflora von Österreich. Ulmer-Verlag, Stuttgart, Wien 1994.
 ANDERSEN 1979
 ANDERSEN C., Cadmium, lead and calcium content, number and biomass in earthworms (Lumbricidae) from sewage sludge treated soil. *Pedobiologia* 19, 1979, 309–319.
 BOUCHE 1972
 BOUCHE M. P., *Lombriciens de France – Ecologie et Systématique*. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris 1972.
 BRAUN-BLANQUET 1964
 BRAUN-BLANQUET J., *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. 3. Aufl., Springer-Verlag, Wien, New York 1964.
 BREWER & BARRETT 1995
 BREWER S. R. & BARRETT G. W., Heavy metal concentrations in earthworms following long-term nutrient enrichment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 54, 1995, 120–127.

- DÜLL 1992
DÜLL R., Zeigerwerte von Laub- und Lebermoosen. In: ELLENBERG H., WEBER H. E., DÜLL R., WIRTH V., WERNER W. & PAULISSEN P., Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18, 2. Aufl.: 175–214, Verlag Erich Goltze, Göttingen 1992.
- DURWEN 1982
DURWEN K. J., Zur Nutzung von Zeigerwerten und artspezifischen Merkmalen der Gefäßpflanzen Mitteleuropas für Zwecke der Landschaftsökologie und -planung mit Hilfe der EDV-Voraussetzungen, Instrumentarien, Methoden und Möglichkeiten. Arbeitsber. Lehrst. Landschaftsökol. Münster 1982.
- ELLENBERG 1992
ELLENBERG H., Zeigerwerte der Gefäßpflanzen (ohne *Rubus*). In: ELLENBERG H., WEBER H. E., DÜLL R., WIRTH V., WERNER W. & PAULISSEN P. (Hrsg.): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18, 2. Aufl.: 9–166, Verlag Erich Goltze, Göttingen 1992.
- ELLENBERG & al. 1992
ELLENBERG H., WEBER H. E., DÜLL R., WIRTH V., WERNER W. & PAULISSEN P., Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18, 2. Aufl., Verlag Erich Goltze, Göttingen 1992.
- EMMERER 2000
EMMERER B., Zur Vegetationsentwicklung auf alten Bergbauhalden in den Niederen Tauern und den Eisenerzer Alpen. Diplomarbeit, Univ. Graz 2000.
- FRAHM & FREY 1983
FRAHM J. P. & FREY W., Moosflora. – Ulmer Verlag, Stuttgart 1983.
- GAMS 1966
GAMS H., Erzpflanzen der Alpen. – Jahrbuch des Vereins zum Schutze der Alpenpflanzen und -tiere 31, 1966, 65–73.
- HÜBSCHMANN 1986
HÜBSCHMANN A., Prodromus der Moosgesellschaften Zentraleuropas. Bryophytorum Bibliotheca 32: 1–413, Verlag J. Cramer, Berlin, Stuttgart.
- IRELAND 1975
IRELAND M. P., Metal content of *Dendrobaena rubida* (Oligochaeta) in a base metal mining area. *Oikos* 26, 1975, 74–79.
- IRELAND 1983
IRELAND M. P., Heavy metal uptake and tissue distribution in earthworms. In *Earthworm ecology: From Darwin to vermiculture*, ed. by J. E. SATCHELL, London, Chapman & Hall 1983, 247–265.
- JÄGER & WERNER 1995
JÄGER E. J. & WERNER K. (Hrg.), Exkursionsflora von Deutschland. Bd. 3, 9. Aufl., Jena 1995.
- KATTER & al. 2000
KATTER R., EMMERER B., GÜNTHER S., JÖBSTL P., KLEMM S., KOLLMANN G., KREINER D., NICOLINI M., OCENASEK C., POSCH A., PROSKE H., RINESCH CH., SCHMIDT G., STEINER G., STEINLECHNER E., TRINKAUS P. & WEINEK H., Leitschwerpunkt Kulturlandschaftsforschung: Modul MU7 Bergbaufolgelandschaften – Perspektiven zur Gestaltung und Nutzung von Bergbaufolgelandschaften (2. Arbeitsabschnitt) Bd. 1–5; JOANNEUM RESEARCH, Graz 2000.
- MARTIN & COUGHTREY 1982
MARTIN M. H. & COUGHTREY P. J., Biological monitoring of heavy metal pollution. Land and air. Applied Sci. Publ.: London & New York 1982.
- MORGAN & MORGAN 1988
MORGAN J. E. & MORGAN A. J., Earthworms as biological monitors of cadmium, copper, lead and zinc in metalliferous soils. *Environmental Pollution* 54, 1988, 123–138.
- PERÄMÄKI & al. 1992
PERÄMÄKI P., ITÄMIES J., KARTTUNEN V., LAJUNEN L. H. J. & PULLIAINEN E., Influence of pH on the accumulation of cadmium and lead in earthworms (*Aporrectodea caliginosa*) under controlled conditions. *Annales Zoologici Fennici*, 29, 1992, 105–111.
- PUNZ 1995
PUNZ W., Erzanzeigende Pflanzen im Ostalpenraum – gibt's die? *Mineralogische Rundschau* 4, 1995 11–15.
- PUNZ & al. 1994
PUNZ W., KOVACS G., KÖRBER-ULRICH S. M., THONKE A., WIELÄNDER B. & WIESHOFER I., Schwermetallvegetation im mittleren Alpenraum und ihre Vegetation – neue Befunde. *Verhandlungen der Zoologischen-Botanischen Gesellschaft in Österreich* 131, 1994, 1–26.
- PUNZ & KÖRBER-ULRICH 1993
PUNZ W. & KÖRBER-ULRICH S. M., Resistenzökologische Befunde zu schwermetallbewohnenden Pflanzen im Ostalpenraum. *Verhandlungen der Zoologischen-Botanischen Gesellschaft in Österreich* 130, 1993, 201–224.
- PUNZ & ORASCHE 1995
PUNZ W. & ORASCHE I. C., Pflanzen auf Schwermetallstandorten im Ostalpenraum und deren Häufigkeitsverteilung.

- Verhandlungen der Zoologischen-Botanischen Gesellschaft in Österreich 132, 1995, 61–80.
- RAMM & HOFMANN 1982
RAMM B. & HOFMANN G., Biomathematik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1982.
- SACHS 1984
SACHS L., Angewandte Statistik. 6. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984.
- SATCHELL 1969
SATCHELL J. E., Methods of sampling earthworm populations. *Pedobiologia* 9, 1969, 20–25.
- SAUKEL 1980
SAUKEL J., Ökologische, soziologische, synsystematische und physiologische Untersuchungen an Pflanzen der Grube „Schwarzwand“ im Großarlal (Salzburg). Diss. Univ. Wien 1980.
- SCHINNER, ÖHLINGER & KANDELER 1991
SCHINNER F., ÖHLINGER R. & KANDELER E., Bodenbiologische Arbeitsmethoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1991.
- VAN HOOK 1974
VAN HOOK R. I., Cadmium, lead and zinc distributions between earthworms and soils: potentials for biological accumulation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 12, 1974, 509–512.
- WEI-CHUN MA 1982
WEI-CHUN MA, The influence of soil properties and worm-related factors on the concentration of heavy metals in earthworms. *Pedobiologia* 24, 1982, 109–119
- WILCKE 1955
WILCKE D. E., Bemerkungen über *Allolobophora ribaucourti* Bretscher 1900 und die geographische Einteilung der Lumbricidenfauna nach Michaelsen. *Zoologischer Anzeiger* 154, 1955, 312–318.
- WIRTH 1980
WIRTH V., Flechtenflora. Ökologische Kennzeichnung und Bestimmung der Flechten Südwestdeutschlands und angrenzender Gebiete. Ulmer Verlag, Stuttgart 1980.
- WRIGHT & STRINGER 1980
WRIGHT M. A. & STRINGER A., Lead, zinc and cadmium content of earthworms from pasture in the vicinity of an industrial smelting complex. *Environmental Pollution* 23, 1980, 313–321.
- ZECHMEISTER & PUNZ 1990
ZECHMEISTER H. & PUNZ W., Zum Vorkommen von Moosen auf schwermetallreichen Substraten, insbesondere Bergwerkshalden, im Ostalpenraum. *Verhandlungen der Zoologischen-Botanischen Gesellschaft in Österreich* 127, 1990, 95–105.
- ZICSI 1965a
ZICSI, A., Bearbeitung der Lumbricidensammlung des Naturhistorischen Museums von Wien. *Opuscula Zoologica, Budapest* 5, 1965, 267–272.
- ZICSI 1965b
ZICSI A., Die Lumbriciden Oberösterreichs und Österreichs unter Zugrundelegung der Sammlung Karl Wesselys mit besonderer Berücksichtigung des Linzer Raumes. *Naturkundliches Literaturblatt, Stadt Linz* 1965.