

Wilfried H.O. Ernst¹, Friedhart Knolle², Sylvia Kratz³, Ewald Schnug³

Aspekte der Ökotoxikologie von Schwermetallen in der Harzregion – eine geführte Exkursion

Aspects of ecotoxicology of heavy metals in the Harz region – a guided excursion

Zusammenfassung

Der Harz ist reich an Metallerzen und weist zahlreiche Spuren ehemaliger Bergbauaktivitäten auf. Der Erzbergbau hat sowohl im Gebirge selbst als auch in den Flusstälern, deren Gewässer aus dem Harz gespeist werden, zu örtlich extremer Schwermetallkontamination geführt. Die heutige Vegetation des Gebietes spiegelt dies wider. Dieser Exkursionsführer beschreibt eine Route durch die Harzregion, entlang derer Spuren des Bergbaus sowie die dadurch geprägte Vegetation studiert werden können. Im Gebiet um Langelsheim haben sich typische Schwermetallpflanzengesellschaften (*Armerietum halleri*) auf Schlackehalden entwickelt, bei Wildemann auf Abraumhalden des Metallerzbergbaus. Der Einfluss von Emissionen aus der ehemaligen Silber- und Bleihütte "Frankenscharrnhütte" ist noch immer an der Vegetation zu erkennen. In St. Andreasberg kann im Silbererzbergwerk Samson die letzte funktionstüchtige "Fahrkunst" der Welt besichtigt werden. In der Umgebung finden sich anschauliche Beispiele einer an arsenreiche Böden angepassten Vegetation. Ein Stop an den Flussufern der Oker gibt die Möglichkeit, eine gut entwickelte und sehr diverse Variante des *Armerietum halleri* auf schwermetallangereicherten Fluss-Sedimenten zu studieren. Westlich von Oker legen ehemalige Absatzbecken ein dauerhaftes Zeugnis der Erzverarbeitung von hoher ökotoxikologischer Relevanz ab.

Stichwörter: *Armerietum halleri*, Arsen, Blei, Cadmium, Eisen, Erzbergbau, Harz, Hyperakkumulator, Kupfer,

Mangan, Schwermetallkontamination, Schwermetallpflanzengesellschaften, Vegetation, Zink

Abstract

The Harz Mountains are rich in metallic ores and show many remnants of former mining activities. Mining has caused extreme heavy metal pollution in the mountain area as well as in the valleys of rivers discharging from it. This is mirrored in the vegetation found here today. This excursion guide describes a route through the Harz mountain area along which remnants of mining activities and related vegetation can be studied. Near Bredelem, a Bronze Age smelting site is visited. On slag heaps, a poly-metallic soil has developed, which only allows for the growth of some specialised plant species. The area around Wildemann shows a typical heavy metal plant community (*Armerietum halleri*) on mine tailings, and gives insight into the impact of aerial emissions from the former lead smelter at Frankenscharrnhütte on the surrounding vegetation. At St. Andreasberg, the Samson silver mine displays the last original and fully functional "Fahrkunst" of the world. Around this area, there are fine examples of typical vegetation on arsenate-enriched soils. A stop at the river banks of the river Oker allows to study a well developed and quite diversified version of the *Armerietum halleri* on metal-enriched river sediments. West of Oker City, flotation waste ponds bear a permanent witness of high ecotoxicological relevance to the mining and ore processing activities.

Institut

Vrije Universiteit, Amsterdam¹

Nationalpark Harz, Wernigerode²

Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig³

Kontaktanschriften

Prof. Dr. W.H.O. Ernst, Vrije Universiteit Amsterdam, E-Mail: wilfred.ernst@falw.vu.nl; Dr. Friedhart Knolle, Nationalpark Harz, Presse, Marketing & Regionalentwicklung, Lindenallee 35, 38855 Wernigerode, E-Mail: info@nationalpark-harz.de; Dr. Sylvia Kratz und Prof. Dr. mult. Ewald Schnug, Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: sylvia.kratz@jki.bund.de; ewald.schnug@jki.bund.de

Zur Veröffentlichung angenommen

April 2009

Key words: Harz, mining, heavy metal contamination, vegetation, plant communities

Einleitung

Die marin-paläozoischen Ablagerungen des Harzes wurden bei der variskischen Gebirgsbildung gefaltet und als Pultscholle seit der Jura-/Kreideperiode aus der Umgebung herausgehoben. Der höchste Teil mit dem Brocken (1141 m über dem Meeresspiegel) ist durch magmatische und metamorphe Gesteine (Granit, Gabbro, Hornfels, Gneis) gekennzeichnet. Der Westharz, der in dieser Exkursion besucht wird, besteht vor allem aus devonischen und unterkarbonischen Schiefern und Grauwacken mit einer intensiven Gangerzmineralisation und zeigt viele Reste des ehemaligen Metallergbergbaus sowie die damit verbundenen Umweltprobleme (Abb. 1). Im südwestlichen und südlichen Teil des Harzes streichen Schichten des Perms an der Oberfläche aus, so dass Gips, Anhydrit und Dolomit sichtbar werden. Metallergbergbau hat nicht nur im Harz selbst erhebliche Umweltbelastungen verursacht, sondern auch die in den Bergbaugebieten strömenden Flüsse und ihre Täler mit Metallen befrachtet. Der Oberboden in den Tälern von Oker, Innerste, Leine und Aller ist stark mit As, Cd, Cu, Pb, Tl und Zn kontaminiert. Menschen und Tiere waren und sind über Jahrhunderte einem Übermaß an Metallen ausgesetzt und haben Schäden erlitten (KNOLLE und KNOLLE, 1983; KNOLLE, 1989).

1 Die Vegetation auf Böden mit einer natürlichen und/oder anthropogenen Anreicherung von Schwermetallen in der Harzregion

Die chemischen Komponenten der vor allem sulfidischen Erze des Harzes sind u. a. Arsen, Blei, Cadmium, Eisen, Gold, Kobalt, Kupfer, Mangan, Quecksilber, Thallium und Zink in verschiedenen Kombinationen und sehr unterschiedlichen Konzentrationen. Die Schwermetalle ha-

ben oft einen größeren Einfluss auf die Vegetation als der Überschuss an Schwefel. Nach dem Ende der letzten Eiszeit (vor ca. 12000 Jahren) hat ein starker Klimawechsel stattgefunden, der auf fast allen Böden Mitteleuropas inklusive der Harzregion die Entwicklung von Wäldern und waldnaher Vegetation ermöglichte, bevor der Mensch eingegriffen hat (BEUG et al., 1999). Böden mit einem hohen Schwermetallgehalt dahingegen waren für die sich ausbreitenden Populationen von Nadelbäumen und Laubbäumen zu toxisch, so dass sich hier örtlich eine baumlose Vegetation mit schwermetallresistenten Gräsern und Kräutern entwickeln und überleben konnte. Das Fehlen von Schatten spendenden Bäumen hat es einigen periglazialen, schattenempfindlichen Pflanzenarten ermöglicht, auf diesen schwermetallreichen Böden bis zur heutigen Zeit zu überleben, soweit sie in ihrem Genom Gene für Schwermetallresistenz besaßen. Eine dieser als Glazialrelikt ausgewiesenen Arten ist die Frühlingsmiere (*Minuartia verna*), die im mitteleuropäischen Flachland und Bergland auf Dolomit-, Serpentin- und Schwermetallböden beschränkt ist (VERKLEIJ et al., 1989). Die Wurzeln dieses Nelkengewächses (Caryophyllaceae) haben keine Assoziation mit einer arbuskulären Mykorrhiza und werden damit direkt mit dem pflanzenverfügbaren Teil der Schwermetalle im Boden konfrontiert. Die spezifische Beziehung dieser Pflanzenart zu Schwermetallböden wurde bereits im Mittelalter durch THALIUS (1588) erkannt und als Indikator für Erzböden im Harz beschrieben. Allerdings hat dieses mehrjährige, niederwüchsige Kraut keine hohe Konkurrenzkraft und kann sich in einer geschlossenen Vegetation nicht gegen höherwüchsige, schwermetallresistente Pflanzenarten durchsetzen; darum bieten nur offene Bodenbereiche der Frühlingsmiere eine Überlebenschance (Abb. 2 und 3).

Möglicherweise ist die Galmei-Grasnelke (*Armeria halleri*) auch ein Glazialrelikt, allerdings schließt die derzeit noch stets umstrittene Taxonomie (LEFÈBVRE, 1974; VEKEMANS et al., 1996) nicht aus, dass die als selbstständige Arten beschriebenen Grasnelken nur schwermetallresistenten Ökotypen des Grasnelken-Komplexes (*Armeria*



Abb. 1. Luftbild des ehemaligen Erzausstrichs und Erzabbaus am Rammelsberg bei Goslar und der damit verbundenen schwermetallbelasteten Böden (historische Ansichtskarte).



Abb. 2. Die geringe Wettbewerbsfähigkeit des schwermetallresistenten Ökotyps der Frühlingsmiere (*Minuartia verna*) lässt das Glazialrelikt allein auf Böden mit einer lockeren Schwermetallvegetation überleben (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 3. Blühende Pflanzen der Frühlingsmiere (*Minuartia verna*) in einem Schwermetallrasen bei Langelsheim (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 4. Ein Aspekt der Schwermetallvegetation eines *Armerietum halleri* mit den Kräutern *Armeria halleri*, *Minuartia verna* und *Silene vulgaris* und den Gräsern *Agrostis capillaris* und *Festuca ovina* (Foto: ERNST, 2003)

maritima s.l.) und daher evolutionär gesehen jünger sind (BAUMBACH und HELLWIG, 2007). Eine andere Pflanzenart mit einer möglich glazialen Vergangenheit ist der Taubenkropf (*Silene vulgaris*); dieses Nelkengewächs hat in der kühlgemäßigten Zone Europas als Pionier viele hoch spezialisierte Ökotypen mit Resistenzen gegen Blei, Cadmium, Kobalt, Kupfer, Mangan und Zink entwickelt (ERNST, 2003). Viele andere Pflanzenarten dürften die Schwermetallböden in späteren Phasen des Postglazials erobert haben. Auf durch menschliche Aktivitäten schwermetallkontaminierten Böden können innerhalb weniger Jahre schwermetallresistente Ökotypen aus einer zuvor unbelasteten Vegetation selektiert werden, wenn der Selektionsdruck auf die Vegetation hoch ist, wie weit außerhalb des Verbreitungsgebietes von Schwermetallpflanzen in England, Deutschland und Polen festgestellt wurde (BRADSHAW, 1976; ERNST, 1976; BREJ, 1998). Neben den bereits erwähnten Pflanzenarten haben auch viele andere Arten mit einer großen ökologischen Amplitude schwermetallresistente Ökotypen entwickelt (ERNST, 1974), unter ihnen sind die Kräuter Gewöhnliche Schafgarbe (*Achillea millefolium*), Kleiner Sauerampfer (*Rumex acetosella*), Sand-Thymian (*Thymus serpyllum*), Scharfer Hahnenfuß (*Ranunculus acris*), Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*), Wiesen-Glockenblume (*Campanula rotundifolia*), Wiesen-Sauerampfer (*Rumex acetosa*) und Wiesen-Schaumkresse (*Arabidopsis halleri* = *Cardaminopsis halleri*) sowie die Gräser Blaues Pfeifengras (*Molinia caerulea*), Geschlängelte Schmieie (*Deschampsia flexuosa* = *Avenella flexuosa*), Hunds-Straussgras (*Agrostis canina*), Roter Schwingel (*Festuca rubra*), Rotes Straussgras (*Agrostis capillaris*), Schaf-Schwingel (*Festuca ovina* s.l.) und Weißes Straussgras (*Agrostis stolonifera*). Alle schwermetallresistenten Ökotypen dieser Pflanzenarten haben sich im Harz zum Schwermetallrasen "*Armerietum halleri*" zusammengefunden, der zum ersten Mal durch LIBBERT (1930, 1939) von den Steinfeldern der Oker beschrieben wurde (Abb. 4 und 5).



Abb. 5. *Armerietum halleri* mit *Armeria halleri*, *Festuca ovina* und *Plantago lanceolata* (Foto: ERNST, 2003).

Die meisten Wuchsorte mit ungestörtem Schwermetallrasen über ausbeißenden Erzadern sind durch den Erzbergbau seit der späten Bronzezeit – ca. 1000 Jahre vor Christus – zerstört worden (SEGERS-GLOCKE, 2000). Die übriggebliebene Schwermetallvegetation ist als Folge menschlicher Aktivitäten stark überformt. Die Erzgewinnung und Erzverarbeitung im Harz erforderte große

Holzmenge und hat die erste Zerstörung der Harzwälder verursacht. Im Mittelalter ist dieser Eingriff in die Wälder mit der Modernisierung des Erzbergbaus, insbesondere im Gebiet des Rammelsberges, intensiviert worden. Das Rösten von sulfidischen Erzen erforderte 1,3 t Holz und das Schmelzen der Erze nochmals 0,7 t Holz je t (Tonne) Blei- und Kupfererz. Bereits im Mittelalter war es billiger, Erze zu bewaldeten Flächen zu transportieren, als sie an Ort und Stelle zu verarbeiten. Hierdurch entstanden neue schwermetallreiche Standorte fernab der Erzlagerstätten.

Drei verschiedene Typen anthropogener Schwermetallböden können in der Harzregion ausgewiesen werden:

- Schlacken und andere Reste des Schmelzprozesses wurden in der Nähe der Schmelzen an vielen Stellen im Harz zu Halden aufgehäuft (GUNDLACH und STEINKAMP, 1973). Diese Standorte sind durch ein gut entwickeltes *Armerietum halleri* gekennzeichnet (ERNST, 1965, 1974). Die Weiterverwendung dieses Haldenmaterials für den Straßenbau hat viele dieser Schwermetallrasen seit der Mitte der 1960er Jahre vernichtet.
- Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden die gewonnenen Erze zerkleinert (sog. Pochen) und die Schwermetalle vom tauben Material durch Waschen geschieden. Diese Erzwäsche hat Flüsse in der Harzregion mit Schwermetallen angereichert, da der Wirkungsgrad der (vor)mittelalterlichen Aufbereitungs-

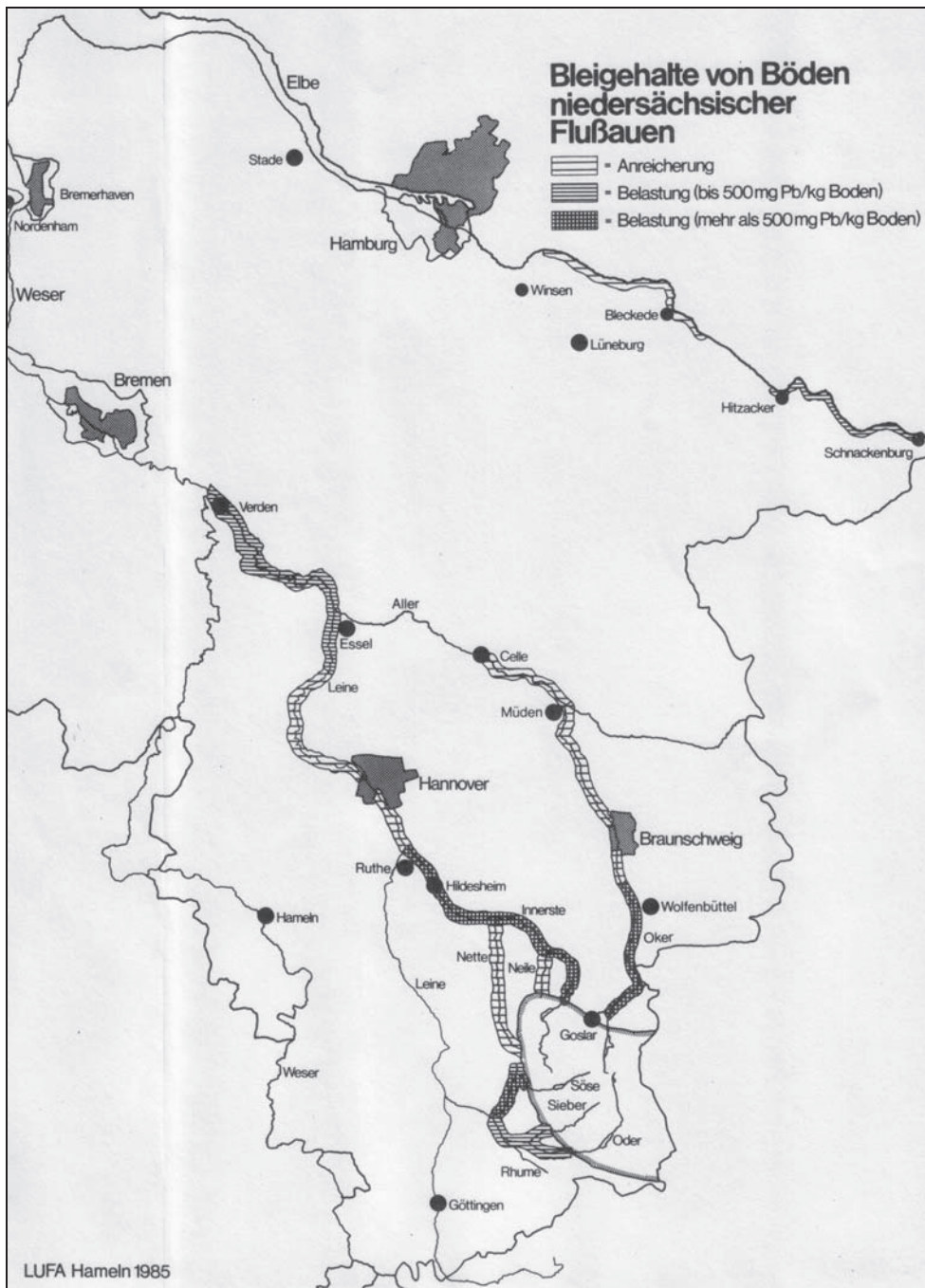


Abb. 6. Bleikonzentrationen auf den Uferterrassen entlang der mit der Harzregion verbundenen Flusstäler in Niedersachsen. Der Einfluss der Erzgewinnung und Erzverarbeitung im Harz ist bis zu 200 km talabwärts noch in den Böden der Flussauen nachzuweisen. In der Karte sind drei Bleikonzentrationsbereiche angezeigt: Eine Erhöhung des Bleigehaltes im Boden (breite Streifensignatur), eine Belastung bis zu 500 mg Pb/kg Boden (enge Streifensignatur) und eine Belastung mit mehr als 500 mg Pb/kg Boden (ausgefüllte Flächensignatur). Aus KÖSTER und MERKEL (1985).

und Verhüttungsverfahren nicht sehr hoch war. Bei der Verarbeitung von Bleierzen ging 25% Blei verloren (KRAUME, 1948). Das schwermetallbelastete Wasser und die schwermetallreichen Rückstände des Pochprozesses (Pochsande) wurden durch die Flüsse bis zu 200 km talabwärts transportiert und bei Hochwasser auf den Uferterrassen abgesetzt (EMMERLING und KOLKWITZ, 1914; ERNST, 1965, 1974; BAUMANN, 1984). Hier entstanden dann anthropogene Schwermetallböden (Abb. 6). Mit den Flüssen wurden auch Samen der ursprünglichen Schwermetallvegetation talabwärts transportiert, so dass sich auf den schwermetallkontaminierten Uferterrassen eine neue Schwermetallvegetation entwickeln konnte. Heute tragen diese Flächen die am besten konservierten, anthropogenen Schwermetallrasen. Wo die Landwirtschaft die Auenböden der Uferterrassen genutzt hat, wurden die Kulturpflanzen mit Schwermetallen kontaminiert. Diese Vergiftung wurde erstmals 1822 durch MEYER erkannt und dauert bis heute fort (EMMERLING und KOLKWITZ, 1914; ERNST, 1974; VON HODENBERG und FINCK, 1975). Mit der Vollendung der Innerste- und Oker-Talsperren wurde die Hochwassergefahr für die Flussterrassen aber erheblich herabgesetzt und damit auch die Zufuhr schwermetallbelasteter Sedimente aus dem Flussoberlauf eingeschränkt. Aufgrund natürlicher geohydrogener Prozesse wird an Stellen, an denen Quellen in Kontakt mit Erzkörpern stehen, noch stets schwermetallhaltiges Quellwasser in die Bäche eingespeist (Tab. 1) und dann unter anderem in die Flüsse Innerste und Oker weitergeleitet (NOWAK und PREUL, 1971; KNOLLE, 1989). Die Wasserabfuhr ist z. T. verantwortlich für die starke Schwankung im Metallgehalt der Innerste.

c: Obwohl Holzangel im 19. und 20. Jahrhundert nicht mehr der Hauptgrund für die Wahl von Standorten für Erzschmelzen und erzverarbeitenden Industrien war, wurden noch immer solche Betriebe am Rand des Harzes bei Langelsheim, Oker und Harlingerode angesiedelt. Unzureichende Filterung der Prozessluft führte zu einer weiteren Emission von Metallen und luftverunreinigenden Gasen (SO₂, NO_x, Dioxin). Diese Emis-

sionen beschädigten die Vegetation im Umkreis von einigen Kilometern und verursachten die sog. "Hüttenrauchschäden", nicht nur im 19. Jahrhundert (VON SCHROEDER und REUSS, 1983), sondern auch noch im 20. Jahrhundert, mindestens bis zum Jahr 1978, als die Frankenscharnhütte geschlossen wurde. Die Zinkhütte in Oker wurde zwar technisch modernisiert, aber emittiert weiterhin Schwermetalle von primären und sekundären Verarbeitungsprozessen. Durch die Verpflichtung des Europäischen Registers der Emissionen schädlicher Stoffe, EPER (<http://www.eper.de>), ist bekannt geworden, dass die metallverarbeitende Industrie um Goslar-Oker im Jahr 2001 noch die folgenden Schwermetallmengen emittiert hat: 222 kg Cd, 11500 kg Pb (Harz-Metall GmbH) und 4640 kg Zn (Metalleurop GmbH Niederlassung Harzer Zinkoxide). Als Konsequenz wurden die Böden in dieser Region mit Blei, Cadmium und Zink erheblich belastet (ANONYMUS, 1979).

Eine Anreicherung von Böden mit bestimmten Elementen durch Lagerstätten, Mineralisationen und anthropogene Überlagerungen kann auch durch Pflanzenanalysen festgestellt werden, wie JOHANNES und KRAUSE (1985) im Nordwestharz durch die Analyse der Asche von Fichtennadeln mit erhöhten Konzentrationen von Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sr, V und Zn zeigen konnten. Weniger bekannt ist, dass auch Tiere in der Harzregion, beispielsweise Vögel und Säugetiere, eine solche Anreicherung mit Schwermetallen aufweisen (KNOLLE und KNOLLE, 1983). Die Schwermetallbelastung der Flüsse, u. a. der Oker nördlich der Oker-Hütten, wird durch erhöhte Schwermetallgehalte in Fischen angezeigt (KOOP, 1989). HARTMANN (2000) fand in Knochen, Leber und Nieren von Fledermäusen der Harzregion signifikant höhere Bleiwerte als in Individuen aus anderen Teilen Niedersachsens (Abb. 7).

2 Metallkonzentrationen in Pflanzen und ihre Regulation

Pflanzen von schwermetallreichen Böden sind durch einen erhöhten Schwermetallgehalt in allen Pflanzenteilen mit Ausnahme der Samen gekennzeichnet (ERNST, 1974).

Tab. 1. Mineralstoffe im Wasser einiger Harzflüsse im Vergleich zu Blei- und Zinkkonzentrationen von Quellen im erzführenden Teil des Harzes. Probenentnahme aus der Abzucht und Oker erfolgte im März 2003 durch die FAL Braunschweig. Daten von SCHWÄGLER et al., (2003) sind mit einem Sternchen, diejenigen von Nowak und Preul (1971) mit zwei Sternchen gekennzeichnet. --- = nicht bestimmt

Gewässer	Elementgehalt in mg/L						
	Ca	Mg	S	Cd	Mn	Pb	Zn
Abzucht	34	7	13	0.002	0.040	0.060	1.0
Oker	19	6	13	0.004	0.202	0.005	1.0
Sieber bei Siebertal	---	---	---	0.00011*	---	<0.001*	0.060*
Söse bei Berka	---	---	92*	0.0004*	---	0.021*	0.109*
Innerste bei Langelsheim	---	---	---	---	---	0.030* - 0.750*	1.400* - 60.0*
Quellen, Minimumwert	---	---	---	---	---	0.010**	0.008**
Quellen, Maximumwert	---	---	---	----	---	1.300**	3.400**

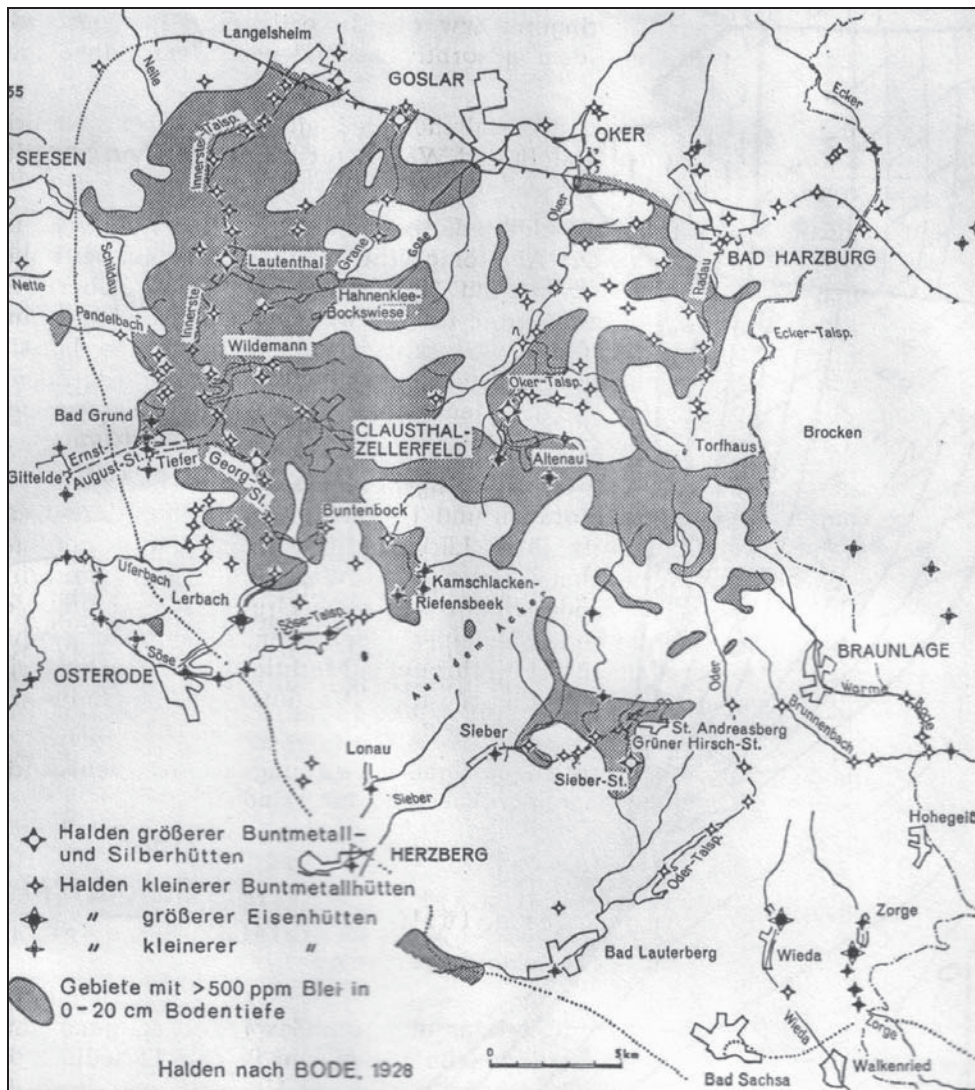


Abb. 7. Regionen mit erhöhten Bleikonzentrationen im Hochharz (aus NOWAK und PREUL, 1971).

Dabei ist die Verlagerung der Metalle von der Wurzel zum Spross spezifisch für jede Pflanzenart und jeden Ökotyp (ERNST, 1974; MACNAIR, 2002), so dass sehr unterschiedliche Schwermetallkonzentrationen in den einzelnen Pflanzenorganen vorliegen (Tab. 2). Die höchsten Werte kommen häufig in den Wurzeln, die niedrigsten in den Samen vor.

In einem Gefäßversuch wurden drei Ökotypen unter kontrollierten Bedingungen in einem Boden von der Schlackenhalde zwischen Bredelem und Langelsheim von der Keimung bis zur Ernte angezogen. Der Ökotyp "Langelsheim", der auf seinem eigenen Boden wuchs, ist gegen viele Schwermetalle resistent; der Ökotyp "Plombières" ist zwar gegen Cd, Pb und Zn resistent, aber seine Resistenz ist nicht hoch genug, um auf dem Boden der Schlackenhalde bis zur Samenreife zu überleben; der Ökotyp "Amsterdam" ist empfindlich gegen hohe Schwermetallgehalte und starb bereits 14 Tage nach der Keimung. Der schwermetallresistenteste Ökotyp "Langelsheim" kann die Aufnahme der Schwermetalle so stark einschränken, dass deren Konzentrationen in Wurzeln und Blättern im Vergleich zu den beiden anderen Ökotypen relativ niedrig ist (Tab. 2).

2.1 Regulation des Schwermetallhaushaltes unter Betrachtung der gesamten Pflanze und ihrer Organe
Für das Verständnis der spezifischen Schwermetallresistenz werden zwei verschiedene Organisationsstufen einer Pflanze, das organismische und das zelluläre Niveau, betrachtet, um solche Anpassungen der Pflanzen an schwermetallreiche Böden aufzuzeigen, die ein Überleben und den Aufbau vitaler Populationen ermöglichen. Einer der möglichen Resistenzmechanismen ist eine Einschränkung der Schwermetallaufnahme durch die Wurzeln und eine Festlegung in den Wurzeln, so dass der Schwermetalltransport von der Wurzel zum Spross eingeschränkt ist. Diese Anpassung wird durch den Ökotyp "Langelsheim" von *Silene vulgaris* realisiert (Tab. 2). Einige Pflanzenarten jedoch verfahren in entgegengesetzter Richtung: Sie vermindern weder die Aufnahme noch den pflanzeninternen Transport; vielmehr reichern sie die Schwermetalle in den Blättern zu extrem hohen Konzentrationen an. Dieser Prozess wird mit dem Begriff "Hyperakkumulation" bezeichnet (BROOKS et al., 1977). Das Schwermetallniveau, das eine Pflanze als "**Hyperakkumulator**" einordnet, ist für jedes Schwermetall spezifisch definiert worden; doch wurde immer wieder die Unter-

Tab. 2. Schwermetallkonzentrationen (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) in verschiedenen Pflanzenteilen von drei Ökotypen von *Silene vulgaris*, die sich in der Schwermetallresistenz unterscheiden. Daten von ERNST et al., (2000) und ERNST (unveröffentlicht)

Ökotyp	Pflanzenteil	Schwermetallkonzentration in mg kg ⁻¹ Trockenmasse			
		Cu	Fe	Mn	Zn
Langelsheim/D	Samen	10.8 \pm 1.9	64.2 \pm 4.5	32.4 \pm 8.8	56 \pm 14
	Blätter	80.7 \pm 17.8	191.0 \pm 30.2	917.0 \pm 84.6	3360 \pm 97
	Stengel	38.1 \pm 9.5	88.2 \pm 10.6	73.6 \pm 15.9	5760 \pm 340
	Wurzel	374.0 \pm 43.2	2966 \pm 977	287.0 \pm 53.8	3440 \pm 879
Plombières/B	Blätter	259.0 \pm 75.6	994 \pm 324	898 \pm 168	9985 \pm 3073
	Wurzel	1640 \pm 613	8530 \pm 2044	961 \pm 269	26810 \pm 5300
Amsterdam/NL	Blätter	941 \pm 257	6367 \pm 2670	1300 \pm 210	4030 \pm 1115
	Wurzel	2490 \pm 324	10050 \pm 2190	923 \pm 228	6030 \pm 987

grenze ohne jegliche physiologische Begründung erhöht (BROOKS, 1988). Im Fall des Zink weist ein Hyperakkumulator mehr als 10 g Zn/kg Trockenmasse auf, was in der Harzregion für *Arabidopsis halleri* zutrifft. Die ökologische Bedeutung dieser Hyperakkumulation ist noch umstritten, aber wird gegenwärtig bevorzugt als Verteidigung gegen blattfressende Insekten und pathogene Pilze diskutiert (COLEMAN et al., 2005). Doch ist bei der Definition des Hyperakkumulators unzureichend umschrieben, dass der entsprechende Grenzwert des Schwermetalles allein für die Pflanze am natürlichen Standort zutrifft und bei der Analyse die Blätter von aufgeweichten und aufgespritzten Bodenteilen zu säubern sind. Auf der Suche nach Pflanzen für Phytoremediation (= Einsatz von Pflanzen zur Dekontamination von Böden), werden Pflanzen in kurzfristigen physiologischen Experimenten hohen Schwermetallkonzentrationen ausgesetzt, um sie schließlich als Hyperakkumulator einzustufen. Durch eine unzureichende Begriffsabgrenzung des Hyperakkumulators versagen solche unzureichend schwermetallresistenten Ökotypen, wenn sie dann auf schwermetallreichen Böden angepflanzt werden. Wie das Beispiel vom Ökotyp "Plombières" von *Silene vulgaris* zeigt (Tab. 2), müsste dieser Ökotyp als Zn-Hyperakkumulator eingestuft werden, obwohl er keineswegs bis zur Samenreife überleben kann. Pflanzen, die unter dem Grenzwert eines Schwermetalles für einen Hyperakkumulator bleiben, werden als "Akkumulator" definiert; viele Pflanzenarten in Tab. 3 können als solche Schwermetall-Akkumulatoren eingestuft werden.

Eine andere Möglichkeit der Anpassung an hohe Schwermetallkonzentrationen des Bodens kann in der Einschränkung der Schwermetallaufnahme durch eine Assoziation der Wurzeln mit arbuskulären Mykorrhizapilzen realisiert werden. Eine solche Mykorrhisierung ist effektiv in den Kräutern *Plantago lanceolata* und *Viola calaminaria* und in allen schwermetallresistenten Gräsern. Durch noch nicht erforschte Prozesse wird der Transport

der Schwermetalle vom Boden über den Mykorrhizapilz in die Pflanzenwurzeln so stark beeinträchtigt, dass der Schwermetallgehalt dieser Pflanzen im Vergleich zu Pflanzen mit nicht-mykorrhizierten Wurzeln, u. a. *Arabidopsis halleri*, *Minuartia verna* und *Silene vulgaris*, recht niedrig ist (IETSWAART et al., 1992).

Eine weitere Möglichkeit der organismischen Schwermetallresistenz besteht darin, aufgenommene Schwermetalle so schnell als möglich wieder auszuscheiden. Diese Lösung ist bei Menschen und Tieren über Exkretion in Fäzes und Urin weit verbreitet. Ein solches Ausscheidungsverfahren für Schwermetalle ist in der Evolution von Pflanzen kaum zustande gekommen. Bei Pflanzen ist eine Schwermetallsekretion allein über Salzdrüsen und Hydathoden möglich, wenn man den Abwurf alter, schwermetallbelasteter Blätter nicht als Exkretion betrachtet. Auf schwermetallreichen Böden besitzen nur *Armeria*-Arten Salzdrüsen, z. B. *Armeria halleri*, doch ist die Effizienz der Schwermetallausscheidung sehr gering (ERNST, 1974). Hydathoden sind im Pflanzenreich relativ weit verbreitet; ihre Rolle in der Regulation des Schwermetallhaushaltes ist bisher allein bei *Minuartia verna* untersucht, wo die an Blattspitzen liegenden Hydathoden durch Ausscheidung von metallbeladenem Xylemsaft die interne Schwermetallbelastung geringfügig vermindern können (NEUMANN et al., 1997). Trotzdem bleibt der Schwermetallgehalt der Blätter dieser Caryophyllaceae hoch (ERNST, 1974; Tab. 2). All diese Anpassungen auf organismischen Niveau können jedoch nicht verhindern, dass Pflanzen auf Schwermetallböden einen Schwermetallgehalt aufweisen, der weit über demjenigen von Pflanzen bei durchschnittlicher Schwermetallversorgung der Böden liegt. In diesen schwermetallresistenten Pflanzen sind die Schwermetallkonzentrationen sehr metall- und pflanzenarten-spezifisch (Tab. 2). Eine hohe lokale Variation des Schwermetallgehaltes des Bodens (Tab. 3) sorgt noch für eine weitere Modifikation der Schwermetallgehalte.

Tab. 3. Schwermetallgehalte (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) in vollentwickelten Blättern von Pflanzenarten, die auf den Schlackenhalden zwischen Bredelem und Langelsheim wachsen (ERNST, 1974; ERNST, unveröffentlicht). ng = nicht gemessen

Pflanzenart	Schwermetallgehalt in mg/kg Trockenmasse					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
<i>Arabidopsis halleri</i>	157.0 \pm 4.50	6.99 \pm 1.91	251 \pm 20.7	1280 \pm 60.4	253.0 \pm 47.7	29230 \pm 8110
<i>Armeria halleri</i>	14.6 \pm 4.50	115.00 \pm 14.60	144 \pm 60.3	224 \pm 27.5	49.7 \pm 16.6	2021 \pm 307
<i>Minuartia verna</i>	49.5 \pm 3.37	574.00 \pm 62.30	1123 \pm 232.0	593 \pm 67.6	99.5 \pm 18.6	5427 \pm 1164
<i>Silene vulgaris</i>	23.6 \pm 4.50	80.70 \pm 17.80	191 \pm 30.2	917 \pm 84.6	180.0 \pm 45.6	3361 \pm 98
<i>Agrostis capillaris</i>	12.4 \pm 1.12	1.27 \pm 0.64	183 \pm 86.0	78 \pm 13.7	137.0 \pm 72.5	118 \pm 39
<i>Festuca ovina</i>	11.2 \pm 1.12	7.63 \pm 3.81	119 \pm 38.5	80 \pm 18.7	82.9 \pm 6.2	1144 \pm 255
<i>Molinia caerulea</i>	ng	13.30 \pm 3.18	329 \pm 92.2	76 \pm 14.8	ng	394 \pm 87

2.2 Regulation des Schwermetallhaushaltes auf dem zellulären Niveau der Pflanzen

Um bei einem hohen internen Schwermetallgehalt zu überleben, muss in den Pflanzenorganen eine hohe Schwermetallresistenz vorhanden sein, die physiologisch auf zellulärem Niveau gelöst werden muss. Aufgrund der vitalen Rolle vieler Schwermetalle in biologischen Systemen und der Option für eine Evolution neuer Enzyme oder anderer Eiweiße kann eine Pflanze es sich nicht erlauben, Schwermetalle von der Aufnahme auszuschließen. In der Wurzel wird die Aufnahme der Schwermetalle über Gene gesteuert, die die Synthese von spezifischen und unspezifischen Metalltransportern regeln. Bisher sind nur wenige solcher Transporter identifiziert, wie z. B. die Zinktransporter ZNT1 und ZNT2 in schwermetallresistenten Ökotypen von *Thlaspi caerulescens* (ASSUNÇÃO et al., 2001), der Zink-Vakuolen Transporter AhMTP1 in zinkresistenten Pflanzen von *Arabidopsis halleri* (DRÄGER et al., 2004) und einige Schwermetalltransporter in nicht-schwermetallresistenten Pflanzen (CLEMENS, 2001). Sobald die Schwermetalle ein Pflanzenorgan erreichen, tritt eine weitere Verfeinerung der Metallverteilung auf, die gut in Blättern untersucht ist. Hierbei findet im Blatt eine bevorzugte Akkumulation von Cadmium, Nickel und Zink in den photosynthetisch inaktiven Zellen der unteren und oberen Epidermis statt (CHARDONNENS et al., 1999b). Einmal in der Zelle, werden die für den Stoffwechsel notwendigen Schwermetallmengen auf die schwermetall-bedürftigen Komponenten im Cytosol und in den Zellorganellen verteilt. Jeder Überschuss an Schwermetallen und alle physiologisch funktionslosen Schwermetalle (u. a. As, Cd, Hg, Pb) müssen so schnell wie möglich in der Zelle physiologisch inaktiviert und mit Hilfe von anderen Transportern in die physiologisch weniger aktiven Zellkompartimente, d. h. Vakuole und Zellwand, verfrachtet werden. Für Zink und Nickel wird für die Inaktivierung im Cytosol eine Komplexbildung mit organischen Säuren diskutiert (MATHYS, 1977; KRÄMER et al., 2000; SARRET et al., 2002). Kupfer wird in kupferresistenten Pflanzen an Metalloproteine (MT) des MT-2b Typs gebunden (VAN HOOFF et al., 2001) und Nickel in einigen Ni-resistenten Pflanzenarten an Histidin (KRÄ-

MER et al., 1996). In Pflanzen, die an ein Übermaß an Arsen und Cadmium angepasst sind, findet eine erhöhte Synthese von Phytochelatinen im Cytosol statt, bevor der Cd-Komplex über einen spezifischen Transporter in die Vakuole gebracht wird (DE KNECHT et al., 1995; HARTLEY-WHITAKER et al., 2001; ERNST et al., 2008). Der Vorteil von schwermetallresistenten Pflanzen besteht darin, dass sie im Gegensatz zu schwermetallempfindlichen Pflanzen überschüssige Schwermetallmengen schneller in die Vakuole transportieren (CHARDONNENS et al., 1999a).

Sobald die zelluläre Regulation dem Schwermetallangebot nicht mehr gewachsen ist, findet auch in schwermetallresistenten Pflanzen eine Vergiftung statt, deren Symptome mit dem bloßen Auge bereits als Chlorosen (bleichgrüne Blätter) und erhöhte Anthocyangehalte (blaugrüne Blätter) wahrgenommen werden können. Die Ursache der Toxizität liegt in einer metallspezifischen Störung von Stoffwechselprozessen. Eine Chlorose kann ursächlich auf verschiedene Prozesse zurückgeführt werden. Blei blockiert die Aktivität der delta-Aminolävulin-säure, so dass unzureichende Mengen an Protochlorophyll synthetisiert werden. Ein Übermaß an Zink beeinträchtigt den Transport von Magnesium in das Chlorophyllmolekül und erhöht den Zinkgehalt im Chloroplasten so stark, dass schließlich die Photosynthese mit 90% vermindert wird (VAN ASSCHE und CLIJSTERS, 1986). Daneben kann eine unzureichende Schwermetallresistenz zu morphologischen Veränderungen wie Zwergwuchs oder Kleinblättrigkeit führen (ERNST, 1999).

3 Besuch von Standorten mit einer Schwermetallvegetation

In Abb. 8 ist die Lage der besuchten Standorte angegeben.

3.1 Schlackenhalde auf der Schmelze südlich von Bredelem (51°58'N, 10°21'E)

Das Gebiet der Schlackenhalde steht unter Naturschutz. Die Schlackenhalde bei Bredelem stammen aus der frühen Neuzeit nach 1500 (mdl. Mitt. Dr. L. KLAPPAUF, Ar-

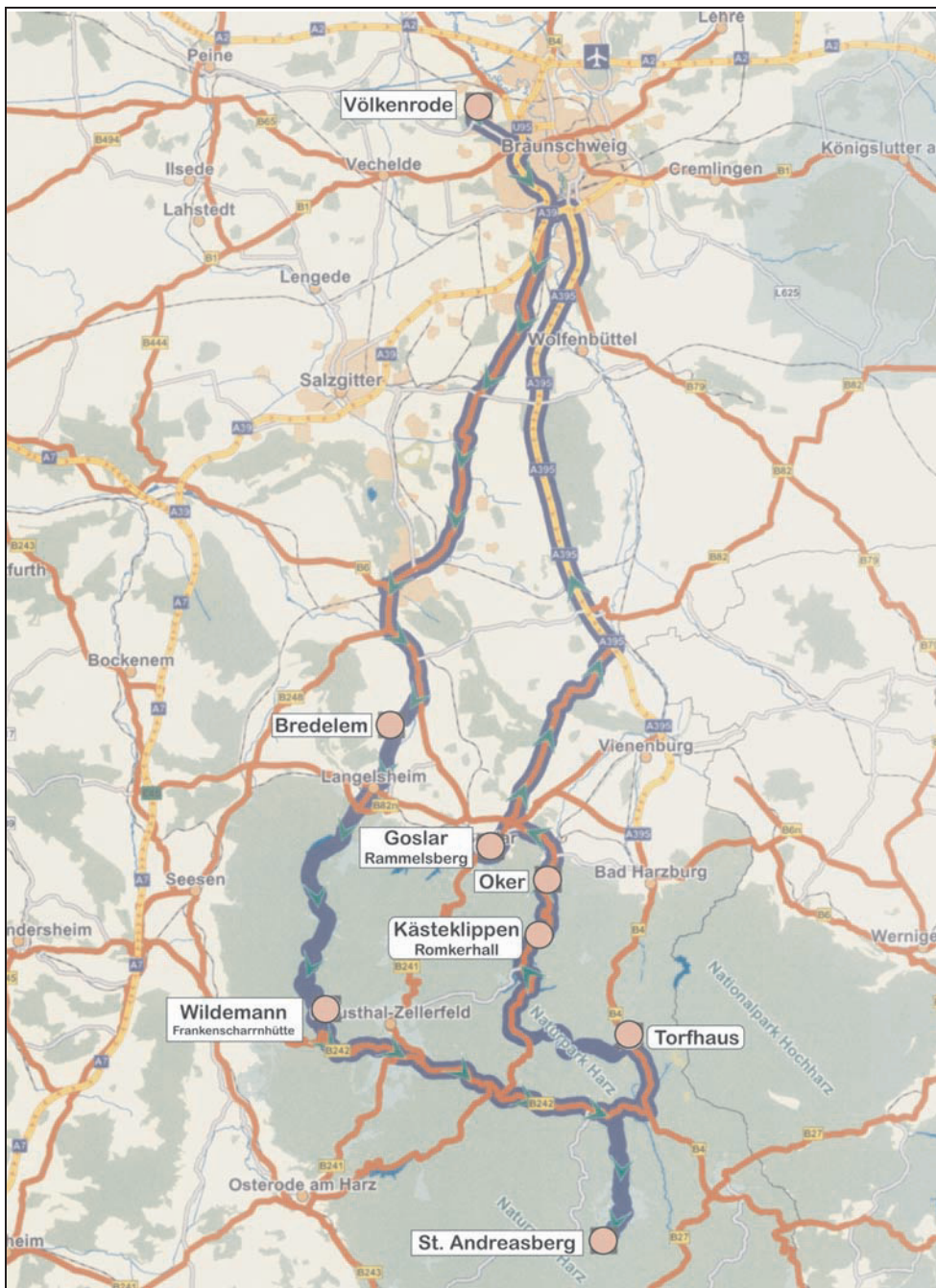


Abb. 8. Lage der besuchten Standorte mit einer Schwermetallvegetation.

beitsstelle Montanarchäologie des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege). Seinerzeit waren die mit Holzkohle betriebenen Schmelzen nicht sehr effektiv und es fand eine relativ einseitige Metallselektion statt. Dadurch ist der Schwermetallgehalt der Schlackenhalde extrem hoch, besonders reich sind sie an Blei, Eisen, Mangan und Zink (Tab. 4).

Spätestens seit dem Mittelalter findet durch die oben beschriebene Belastung der Innerste mit Pochsanden, die bei Hochwasser auf der Uferterrasse abgelagert werden, eine Zunahme der Schwermetallmengen statt. Als Resultat dieser Jahrhunderte andauernden Kontamination sind polymetallische Böden in diesem Gebiet entstanden, wobei die Schwermetallkonzentrationen im Boden un-

gleichmäßig mosaikartig verteilt sind. Auf einigen Kleinfächen ist die Anreicherung so hoch geworden, dass sie die Schwermetallresistenz der Arten des *Armerietum halleri* übertreffen und darum vegetationsfrei geblieben sind (ERNST et al., 2000; ERNST und NELISSEN, 2000). Auf anderen Flächen erlaubt der gemäßigte Schwermetallgehalt die Entwicklung einer geschlossenen Vegetationsdecke des *Armerietum halleri* (Abb. 9), und bei sehr niedriger Belastung selbst das Überleben schwach schwermetallresistenter Birken und Kiefern (Abb. 10).

3.1.1 Schwermetalle in höheren Pflanzen. Als Konsequenz der hohen Schwermetallgehalte der Schmelzrückstände und der späteren Anreicherung mit kontaminierten

Tab. 4. Mit Königswasser (HNO₃/HCl, 3:1) extrahierbare Schwermetalle (Mittelwert ± Standardfehler [S.E.]) aus der Schlackenhalde südlich von Bredelem. Die Bodenwerte der Pionierphase des Schwermetallrasens mit *Armeria halleri* und *Silene vulgaris* sind übernommen aus ERNST und NELISSEN (2000), diejenige des zwergwüchsigen *Betula pendula*-Bestandes aus ERNST und NELISSEN (2006)

Mikrohabitat	Schwermetallkonzentration des mit Schlackendurchsetzten Bodens in mg/kg trockener Boden					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
<i>Armeria</i> -Stadium	18.0 ± 1.12	6927 ± 1017	126800 ± 48500	8020 ± 3626	18650 ± 2694	36360 ± 11180
<i>Silene</i> -Stadium	16.9 ± 1.12	5910 ± 1462	63950 ± 13910	5770 ± 1760	16370 ± 4144	28445 ± 4773
<i>Betula</i> -Bestand	7.4 ± 1.46	1093 ± 32	42610 ± 559	8571 ± 220	9324 ± 1658	5950 ± 327

Pochsanden ist der Schwermetallgehalt der Pflanzen besonders hoch. Mit Ausnahme von Kupfer hat der Zn-Hyperakkumulator *Arabidopsis halleri* die höchsten Schwermetallgehalte in seinen Blättern (Tab. 3). Die Vitalität von *Armeria halleri*, einer Pflanzenart mit hoher Resistenz gegen Cd, Cu, Pb und Zn, ist ein guter Indikator für die pflanzenverfügbare Schwermetallkonzentration: je höher die Zahl toter Blätter in einer Rosette ist, desto grösser ist die Ökotoxizität des Wuchsortes. Die Wuchsform der mykorrhizierten Gräser *Agrostis capillaris* und *Avenella flexuosa* lässt das geübte Auge ebenfalls die Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle eines Bodens erkennen. Sehr kleine und offene Polster zeigen einen hohen Schwermetallgehalt des Bodens an, während eine geschlossene Vegetationsdecke ein Indiz für eine gemäßigtere Bodenbelastung ist (Abb. 11).

Auf mäßig schwermetallbelasteten Böden haben einige Populationen von Hängebirken (*Betula pendula*) eine bescheidene Schwermetallresistenz erworben, die durch eine Symbiose mit dem Ektomykorrhizapilz (*Paxillus involutus*) (OTT et al., 2002) verstärkt wird (Abb. 12). Auch in Hängebirken kann der Schwermetallgehalt in den

Blättern stark erhöht sein, wobei die Zn-Konzentration im Birken-Blutungssaft bereits im Frühjahr eine guter Indikator für die im Spätsommer und Herbst zu erwartenden Zinkbelastungen vollentwickelter Blätter ist (Tab. 5).

Die Besiedlung schwermetallreicher Flussterrassen hängt nicht nur vom Schwermetallgehalt, sondern auch von anderen Umweltbedingungen ab. Ein grobkörniger Boden hält die Feuchtigkeit schlechter fest als ein feinkörniges Substrat. Darum müssen Pflanzen auf schotterreichen Uferterrassen an sommerliche Trockenperioden angepasst sein oder durch ein tiefreichendes Wurzelsystem die Trockenheit der oberen Bodenschichten vermeiden. Daher prägen Unterschiede im Wurzelsystem das Vegetationsmosaik solcher Standorte. Pflanzenarten mit bis zu 3 Metern tief reichenden Wurzeln, z. B. *Armeria halleri* und *Silene vulgaris* (Abb. 13), haben auch während der Trockenperioden noch Zugang zum Grundwasser. Darüber hinaus haben diese Pflanzenarten noch einen konstitutiv hohen Prolingehalt, der einen zellulären Schutz gegen Austrocknung bietet (SCHAT et al., 1997). Oberflächlich wurzelnde Pflanzen wie *Arabidopsis halleri*



Abb. 9. Eine Übersicht über die Uferterrasse der Innerste mit Resten der Schlackenhalde südlich von Bredelem. Das mehrjährige Kraut *Armeria halleri* und die langlebigen Individuen der Gräser *Agrostis capillaris* und *Festuca ovina* besiedeln Flächen mit hohen Schwermetallkonzentrationen. Die Wuchsmöglichkeiten von *Molinia caerulea* (die Horste im Hintergrund) werden durch die hohen Ansprüche dieses Grasses an eine sehr gute Wasserversorgung auf die ufernahen Flächen beschränkt. Auf etwas höher gelegenen und damit nicht überfluteten Böden sind die Schwermetallkonzentrationen so niedrig, dass sich Pappeln, Weiden und Kiefern angesiedelt haben (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 10. Im Vordergrund ein geschlossenes *Armerietum halleri* auf schwermetallreichen Pochsanden, in der Mitte ein offenes *Armerietum halleri* auf Schmelzresten, im Hintergrund ein Gebüsch mit mäßig schwermetallresistenten Hängebirken und halbrechts ein kleiner Kiefernbestand auf schwermetallarmem Boden im Bereich der Schmelze südliche von Bredelem (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 11. Die Wuchsformen von *Agrostis capillaris* und *Avenella flexuosa* ermöglichen eine erste Beurteilung der Schwermetalltoxizität eines Bodens (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 12. Hängebirken können dank einer bescheidenen Zinkresistenz auf Böden mit einer gemäßigten Schwermetallbelastung überleben (Foto: ERNST, 2003).

sind dagegen an Mikrohabitate gebunden, deren Boden eine hohe Wasserkapazität besitzt. Die nadelförmigen Blätter von *Minuartia verna* bieten genügend Resistenz gegen eine längere Trockenperiode, aber diese Pflanze erträgt keine Staunässe, so dass sie auf verdichteten Böden fehlt.

3.1.2 Schwermetalle und Flechten. Auf offenen Böden von Halden und Pochsandflächen hat sich eine artenreiche, epigäische (auf dem Boden aufliegende) Flechtenflora mit vielen Strauchflechten entwickeln können, u. a. mit *Cladonia alpicornis*, *Cladonia arbuscula*, *Cladonia chlorophaea*, *Cladonia floerkeana*, *Cladonia furcata*, *Cladonia mitis*, *Cladonia pyxidata*, *Cladonia rangiformis*, *Cladonia verticillata*, *Cetraria aculeata*, *Stereocaulon dactylophyllum* und *Stereocaulon vesuvianum* (ERNST, 1965, 1974; DIERSCHKE, 1969). Durch den sehr geringen Bodenkontakt dieser Strauchflechten wird deren Schwermetallgehalt fast ausschließlich durch die Schwermetalle im Niederschlag und im aufspritzenden Regenwasser bestimmt. Darum ist das Schwermetallniveau dieser Flechten sehr niedrig (LANGE und ZIEGLER, 1963; ERNST, 1974). Die Regulation des Schwermetallhaushaltes dieser Flechten ist noch unzureichend bekannt. In jedem Fall scheint Cadmium durch Bindung an Phytochelatine detoxifiziert zu werden (PAWLIK-SKOWRONSKA et al., 2002).

Auf den Schlackenstücken hat sich eine sehr spezifische sog. epilithische (auf Steinen wachsende), erzielende (orophile) Flechtengesellschaft entwickelt, die in Deutschland erstmals durch SCHADE (1933) als *Acarosporium sinopicae* von den sächsischen Bergwerkshalden beschrieben wurde. Diese Krustenflechten sind auch auf den Schlackenhalde im Harz weit verbreitet (Abb. 14 und 15).

Eine Analyse von *Lecidea fuscoatra* (L.) Ach. von den Schlackenhalde südlich von Bredelem zeigt, dass deren Schwermetallgehalt mit demjenigen von anderen orophilen Flechtenarten vergleichbar ist (Tab. 6). Der enge Kontakt dieser Krustenflechten mit den schwermetallhaltigen Schlacken und Steinen resultiert in standort- und artspezifischen Schwermetallkonzentrationen. *Lecanora fuscoatra* enthält viel weniger Kupfer als *Acarospora sinopica* von den Schlackenhalde bei Bredelem und *Lecanora polytropa* von einem kupferreichen Felsen in Grönland (ALTRUP und HANSEN, 1977). Der Bleigehalt von *Lecanora fuscoatra* muss als extrem hoch angemerkt werden. Der Eisengehalt dieser Flechte ist dagegen ebenso hoch wie derjenige anderer orophiler Flechten. Auch andere Arten des *Acarosporium sinopicae* können reich an Kupfer und Eisen sein. Das Kupfer ist vor allem in den Pilzhyphen des Flechtenthallus nachgewiesen, wo es an Oxalat (PURVIS, 1984) und/oder an Norstictinsäure, eine spezifische

Tab. 5. Schwermetallkonzentrationen (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) im Blutungssaft vor dem Blattaustrieb im Frühjahr und in reifen Blättern der Hängebirke im Spätsommer und Herbst im Bereich der Schmelze südlich von Bredelem (ERNST und NELSEN, 2007)

Pflanzenorgan	Schwermetallkonzentration					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Blutungssaft (mg/L)	0.05 \pm 0.01	0.27 \pm 0.07	0.33 \pm 0.16	7.97 \pm 0.99	0.13 \pm 0.03	40.7 \pm 8.04
Blätter (mg/kg Trockenmasse)	1.12 \pm 0.12	12.7 \pm 2.50	160 \pm 29.0	357 \pm 290	20.7 \pm 2.67	1975 \pm 333



Abb. 13. Die mehr als tausendjährige Anschwemmung von Pochsanden aus den flussaufwärts gelegenen Bergbaugebieten hat die Innersteterrasse mit mehr als 2 Meter dicken schwermetallreichen Sedimentlagen bedeckt. *Armeria halleri* kann mit der starken Hauptwurzel durch diese Sedimente hindurchwachsen und so den Wasserspiegel des Flussbettes erreichen, um längere Trockenperioden zu überleben (Foto: ERNST, 2003).

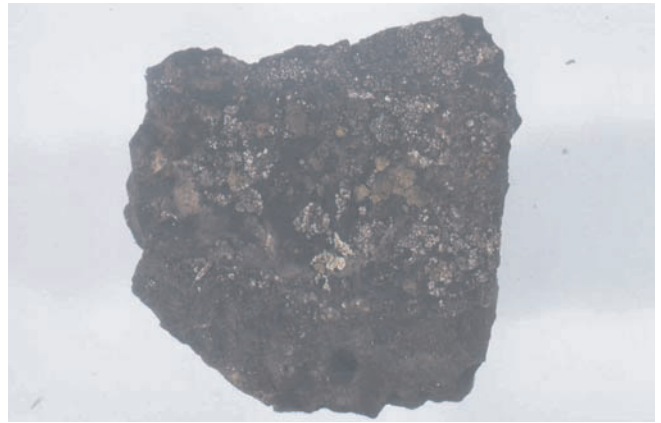


Abb. 14. Die epilithische Flechtengesellschaft des *Acarosporetum sinopicae* mit *Acarospora sinopica*, *Lecanora epanora* und *Lecidea fuscoatra* auf einem schwermetallreichen Schlackenstück (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 15. *Lecidea*-Arten in der epilithischen Flechtengemeinschaft des *Acarosporetum sinopicae* auf schwermetallreichen Steinen südlich von Bredelem (Foto: ERNST, 2003).

Flechtensäure (PURVIS et al., 1987), gebunden ist. Die Bindung von anderen Schwermetallen an organische Zellkomponenten ist noch nicht untersucht.

3.1.3 Die Relation schwermetallresistenter Pflanzen zu pflanzenfressenden Tieren. Tiere sind selten in der Lage gewesen, eine Evolution von Schwermetallresistenzen zu realisieren (BOYD und MARTENS, 1994; MARTENS und BOYD, 2002). Sie ist im allgemeinen sehr niedrig, so dass pflanzenfressende Tiere auf schwermetallarme Teile einer Pflanze, vor allem auf junge Pflanzenorgane und Samen, und auf Pflanzenarten mit einem relativ geringen Schwermetallgehalt ausweichen. Eines der herbivoren Insekten in den Schwermetallrasen Mittel- und Westeuropas ist ein Marienkäfer (*Subcoccinella vigintiquatuor-punctata* L.), der sich in Schwermetallrasen in allen Entwicklungsphasen auf junge Blätter und Blütenknospen von *Silene vulgaris* spezialisiert hat. Erstmals wurde dieser Käfer durch JACQUEMART (1958) auf *Silene vulgaris* auf den Schwermetallhalden im belgischen Plombières ge-

funden. Heute kommt er in nahezu allen Schwermetallrasen vor, insofern sie Populationen von *Silene vulgaris* besitzen. Ende April schabt das Käferweibchen die Epidermis von Blättern an der Sprossspitze ab (Abb. 16). Offensichtlich kann ein "Geschmacksfühler" Informationen über den Schwermetallgehalt der Blätter ermitteln, bevor 4 bis 8 Eier auf Blätter mit einem gemäßigten Zinkgehalt von 1635 bis 3270 mg Zn pro kg Trockenmasse gelegt werden. Die sehr bewegliche Larve verzehrt einen Teil der Epidermis und des subepidermalen Gewebes von juvenilen Blättern und von jungen Blütenknospen. Durch die Vernichtung der Epidermis vertrocknet ein Teil des Blattes, so dass beschädigte Pflanzen schon von weitem an den braunen Spross-Spitzen zu erkennen sind. Durch den Verzehr aller Blütenknospen kann die angefressene Pflanze im Frühsommer keine Blüten entwickeln und folglich auch keine Samen ansetzen. Heuschrecken beschränken sich in Schwermetallrasen auf den Verzehr junger Grasblätter, die ebenfalls schwermetallarm sind; die Ausscheidung von Schwermetallen im Fäzes ermög-

Tab. 6. Schwermetallgehalte (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) im Thallus der Flechte *Lecidea fuscoatra* von Schlackenstücken bei Bredelem im Vergleich zu *Acarospora sinopica* und *Lecanora epanora*, die LANGE und ZIEGLER (1963) an diesem Standort vor 40 Jahren gesammelt und analysiert haben, und zu *Lecanora polytropa*, die auf kupferreichen Felsen in Grönland wächst (ALTRUP und HANSEN, 1977). --= nicht gemessen

Flechtenart	Schwermetallgehalt in mg/kg Trockenmasse					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
<i>Lecidea fuscoatra</i>	16.9 \pm 12.4	83	28150	155	41850	186
<i>Acarospora sinopica</i>	---	1049 \pm 70	44345 \pm 12900	---	---	---
<i>Lecanora epanora</i>	---	222	5808	---	---	---
<i>Lecanora polytropa</i>	---	4900	26190	300	41.4	60.2

licht es, dass diese Insekten ohne den Erwerb einer Schwermetallresistenz in einer solchen Umwelt überleben können.

Samen sind aufgrund des geringen Schwermetallgehaltes (ERNST, 1974) eine andere schwermetallarme Nische in einem ansonsten schwermetallreichen Milieu. Darum sind Samen bei einigen Insektenarten als Nahrung beliebt. Wiederum sind es Populationen von *Silene vulgaris*, die von Insekten belagert werden. Schmetterlinge, die zu den Nelkeneulen (*Hadena*-Arten) gehören, bestäuben erst die Blüten des Taubenkropfes und legen danach ein Ei in die Blüte eines Blütenstandes. Durch diesen Bestäubungsakt wird garantiert, dass in der Samenkapsel 50 bis 70 Samen heranreifen können, die von der heranwachsenden Raupe verzehrt werden. Nach Erschöpfung des Samenreservoirs einer Kapsel wandert die Raupe zur nächsten Kapsel, bis sie schließlich das Puppenstadium erreicht (ERNST, 1987). Bei starkem Raupenbefall kann der Taubenkropf in manchen Jahren keine Samen produzieren, so dass die Verjüngung der Pflanzenpopulation unterbrochen wird. Raupen von *Hadena bicruris* sind selbst in der Lage, sehr junge und damit relativ schwermetallarme Blätter aufzufressen. Bei dieser

Nelkeneule bleibt durch die Ausscheidung der Schwermetalle im Fäzes der Schwermetallgehalt des Raupenkörpers niedrig. Weniger schädlich für die Populationsentwicklung von *Silene vulgaris* ist der Nelkenrüssler *Sibinia viscaria* (Curculionidae); die Entwicklung der kleinen Käferlarve beschränkt sich jeweils auf eine Samenkapsel. Andere samenfressenden Insektenarten wurden in den Fruchtständen von *Arabidopsis halleri* und *Armeria halleri* gefunden. Blüten und Fruchtstände von *Armeria halleri* werden durch Larven und Käfer vom Graselkenrüssler (*Sibinia sodalis*) befallen, die bis zu 90% der Samen vernichten können (ERNST, 2006).

3.2 Schwermetallhalden bei Wildemann (51°50'N, 10°17'E)

Der Erzbau bei Wildemann begann wahrscheinlich im frühen Mittelalter. Die Schwermetallgehalte im Haldenmaterial der Gruben sind vergleichbar mit denjenigen der oben beschriebenen Schlackenhalde. Das kaum bewachsene Haldenmaterial kann bis zu 2,3% Blei, 0,06% Cadmium, 5,4% Eisen, 1,4% Mangan, 0,1% Kupfer und 1% Zink enthalten (ERNST und NELISSEN, 2000). Durch die Beweglichkeit des Haldenmaterials kann sich

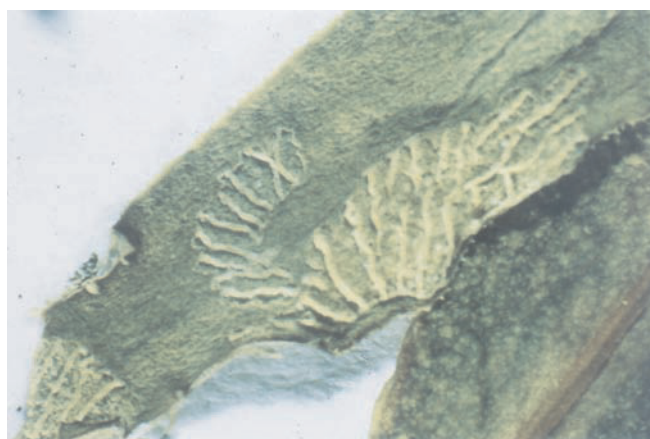


Abb. 16. Schabespuren am Blatt von *Silene vulgaris* durch Käferweibchen des Marienkäfers (*Subcoccinella viginti quattuorpunktata* L.) (Foto: ERNST, 2003)



Abb. 17. Die Halden bei Wildemann sind nicht sehr stabil. Das rutschenden Haldenmaterial behindert dadurch eine geschlossene Besiedlung mit schwermetallresistenten Pflanzen und durch die Ausspülung von Schwermetallen wird auch die Haldenbasis stets mit neuen Schwermetallmengen belastet.

nur auf den weniger rutschenden Haldenabschnitten ein artenarmer Schwermetallrasen des *Armerietum halleri* entwickeln (Abb. 17). Durch das Rutschen können die Sprosse der Pflanzen mit Haldenmaterial überschüttet und dadurch von der Versorgung mit Sonnenlicht abgeschnitten werden. Darum erfordern diese Standorte nicht nur eine Schwermetallresistenz der Pionierarten, sondern auch noch eine Resistenz gegen einen zeitlichen Lichtentzug des Sprosses und gegen mechanische Schäden. Lediglich *Silene vulgaris* hat alle diese Resistenzeigenschaften entwickelt. Sie besitzt an der Wurzelkrone viele ruhende Sprossknospen, die nach einer Überschüttung und nach einer Beschädigung des Sprosses schnell wieder aufleben können. Außerdem verlangsamen unterirdische Ausläufer die Beweglichkeit des Haldenmaterials und tragen so zu einer Haldenstabilisierung bei, die dann eine Kolonisation mit anderen Pflanzenarten ermöglicht.

Auf geringer schwermetallbelasteten ebenen Flächen keimen regelmäßig Samen von Hängebirken und Fichten (*Picea abies*), deren weitere Entwicklung trotz einer Symbiose mit metallresistenten Mykorrhizapilzen nicht sehr erfolgreich ist. Sobald der Schwermetallgehalt in den Keimlingen und Jungpflanzen zu hoch wird, entstehen zwergwüchsige Individuen mit chlorotischen Blättern und Nadeln. Die gelblich verfärbten Nadeln haben sehr hohe Eisen- und Zinkgehalte, aber sehr geringe Magnesium- und Phosphatgehalte, die auf eine Störung des gesamten Mineralstoffwechsels dieser ungenügend an Schwermetalle angepassten Bäumchen hinweisen (Tab. 7).

3.3 Einfluss der ehemaligen Frankenscharrnhütte auf ihre Umgebung (51°46'N, 10°17'E)

Die Erzschnmelze Frankenscharrnhütte (südöstlich von Wildemann nahe Clausthal-Zellerfeld) wurde um

1355 errichtet, um Silber, Blei und Kupfer zu schmelzen. Sie wurde bis Dezember 1967 betrieben (Abb. 18). Über 600 Jahre hat nicht nur die Emission von Schwermetallen, vor allem von Blei, sondern auch von Schwefeldioxid die weitere Umgebung belastet. Der Boden ist noch immer reich an Blei und übertrifft fast alle Bodenblei-gehalte der Erzgebiete des Harzes (Tab. 8). Dagegen sind die Bodengehalte an Cadmium, Kupfer und Zink nur mäßig erhöht. Nicht nur die Gesamtgehalte an Blei sind extrem hoch, sondern auch die leicht pflanzenverfügbaren Fraktionen, die mit CaCl_2 und Wasser extrahiert werden können.

Die Langzeitwirkung der SO_2 -Emissionen hat zum Absterben aller Baumarten in der Nähe der Hütte geführt. Allein eine Heide mit *Calluna vulgaris*, *Avenella flexuosa*, *Festuca ovina* und *Silene vulgaris* war fähig, der Luftverunreinigung mit Schwefeldioxid und Blei zu widerstehen (Abb. 18). Wie die Schwermetallgehalte der Pflanzen zeigen (Tab. 9), war nicht nur die Emission von Blei hoch, sondern auch diejenige von Cadmium und Zink. Die Bleikonzentration im Spross von *Minuartia verna* ist so hoch, dass die Pflanze hier die Untergrenze für einen Blei-Hyperakkumulator überschreitet.

HEIMHOLD (1987) hat 16 Jahre lang eine 150 m² große Fläche in dieser Heide untersucht und auf den Steinen die folgenden Krustenflechten festgestellt: *Huilia (Lecidea) crustulata* (Ach.) Hertel, *Huilia macrocarpa* (DC.) Hertel fo. *tuberculosa*, *Huilia macrocarpa* (DC.) Hertel fo. *contigua*, *Huilia macrocarpa* (DC.) Hertel fo. *cineroatra*, *Trapelia (Biatora) coarctata* (Sm. & Sowerby) Choisy, und *Acarospora cf. scabrida* Hedl. ex H. Magn.

Nach Schließung der Bleihütte im Jahr 1967 blieb die Belastung des Bodens mit Blei und anderen Schwermetallen als Umweltproblem weiter bestehen, während die

Tab. 7. Mineralstoffkonzentrationen (Mittelwert ± Standardfehler [S.E.]) in Nadeln und jungen Zweigen von Fichten (*Picea abies*), die auf einem Boden mit unterschiedlichen Schwermetallgehalten im Haldenbereich von Wildemann wuchsen. Das Material wurde am 15. Mai 2003 gesammelt (ERNST, unveröffentlicht)

Pflanzenteile	Farbe	Mineralstoffkonzentration in mg/ kg Trockenmasse			
		Cd	Cu	Fe	Mn
Nadeln	Bleichgelb	1.35 ± 0.11	11.8 ± 1.97	263.0 ± 30.7	183 ± 25.3
	Hellgrün	1.57 ± 0.45	9.28 ± 2.99	79.9 ± 1.12	137 ± 4.94
	Grün	1.24 ± 0.11	10.1 ± 1.46	65.3 ± 3.35	248 ± 31.9
Zweige	Bleichgelb	1.46 ± 0.34	10.5 ± 2.67	165.0 ± 46.9	179 ± 40.7
	hellgrün	1.24 ± 0.34	13.7 ± 1.40	255.0 ± 35.7	70.3 ± 13.7
	Grün	1.24 ± 0.11	13.3 ± 1.33	141.0 ± 30.2	177 ± 13.7
		Pb	Zn	P	Mg
Nadeln	Bleichgelb	18.4 ± 2.28	592 ± 92.2	777 ± 68.1	425 ± 70.5
	Hellgrün	14.7 ± 6.84	318 ± 6.54	712 ± 49.6	260 ± 4.86
	Grün	12.4 ± 1.86	146 ± 28.8	1183 ± 46.5	545 ± 70.5
Zweige	Bleichgelb	74.8 ± 3.73	512 ± 88.9	622 ± 92.9	399 ± 38.9
	Hellgrün	88.5 ± 10.2	252 ± 24.2	938 ± 130.0	382 ± 43.8
	Grün	18.2 ± 1.04	208 ± 19.0	880 ± 18.6	712 ± 7.29



Abb. 18. Auf den mit Blei kontaminierten Böden in der Umgebung der ehemaligen Frankenscharrnhütte wird die Vegetation durch Heidekraut (*Calluna vulgaris*) dominiert (Foto: Friedrich Balck 2002).



Abb. 19. Scherbenkobalt (Foto: SCHNUG, 2003).

Luftverunreinigung durch Schwefeldioxid verschwand. Darum konnten SO_2 -empfindliche, aber schwermetallresistente Pflanzen, z. B. *Minuartia verna*, wieder diese schwermetallbelasteten Böden besiedeln (Tab. 9), ohne die Dominanz des Heidekrautes in dieser Vegetation zu vermindern. Im Vergleich zu den Kräutern hat *Calluna vulgaris* einen relativ geringen Schwermetallgehalt in seinen Stengeln und Blättern, da die Symbiose mit dem eri-

coiden Mykorrhizapilz *Hymenoscyphus ericae* (Read) Korf, einem Ascomyzeten, die Translokation der Schwermetalle vom Boden in die Pflanze herabsetzt (BRADLEY et al., 1981) und dadurch eine wesentliche Komponente der Bleiresistenz des Heidekrautes ist. Innerhalb einer Pflanzenzelle hat Blei eine hohe Affinität mit den Carboxylgruppen in der Zellwand (ERNST, 1974) und ist dadurch relativ immobil. Das Resultat ist einerseits eine geringe

Tab. 8. Schwermetallgehalte (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) in Extrakten aus Böden in der Umgebung der Frankenscharrnhütte. Die Proben wurden am 15. Mai 2003 gesammelt (ERNST, unveröffentlicht)

Extraktionsmittel	Schwermetallgehalte in mg/kg trockener Boden					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
HCl/HNO ₃	0.21 \pm 1.01	288 \pm 34.40	46800 \pm 8490	442 \pm 29.7	64650 \pm 1865	1255 \pm 250
0.01 M CaCl ₂	0.11 \pm 0.11	0.51 \pm 0.13	1.06 \pm 0.28	0.77 \pm 0.05	145 \pm 25.7	1.63 \pm 0.13
H ₂ O	0.11	0.25 \pm 0.06	0.56 \pm 0.17	0.55 \pm 0.05	85.6 \pm 29.4	1.24 \pm 0.07

Tab. 9. Schwermetallgehalte (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) einiger Pflanzenarten, die auf den mit Schwermetallen kontaminierten Böden in der Umgebung der ehemaligen Frankenscharrnhütte wachsen. Die Proben wurden am 15. Mai 2003 gesammelt (ERNST, unveröffentlicht)

Pflanzenart	Pflanzenteil	Schwermetallgehalt in mg/ kg Trockenmasse				
		Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
<i>Calluna vulgaris</i>	Blätter	11.1 \pm 2.48	264 \pm 16.2	153 \pm 8.79	32.5 \pm 10.2	65.4 \pm 3.3
	obere Zweige	11.2 \pm 2.10	324 \pm 69.3	136 \pm 15.4	38.7 \pm 1.7	62.8 \pm 7.2
	untere Zweige	3.88 \pm 0.51	60.3 \pm 18.4	182 \pm 12.1	95.7 \pm 11.0	17.7 \pm 3.9
<i>Minuartia verna</i>	Sprosse	161	12370	681	3970	2106
<i>Silene vulgaris</i>	Blätter	18.2 \pm 4.77	221 \pm 65.9	291 \pm 49.8	224 \pm 35.2	994 \pm 181
<i>Rumex acetosa</i>	Blätter	25.5	230	341	179	965
<i>Viola tricolor</i>	Blätter	11.4	247	124	259	218
<i>Festuca ovina</i>	Blätter	8.9 \pm 0.57	310 \pm 87.7	114 \pm 36.9	450 \pm 95.3	37.7 \pm 1.3



Abb. 20. Fahrkunst in der Grube Samson 1953 (aus KLÄHN o.J.).

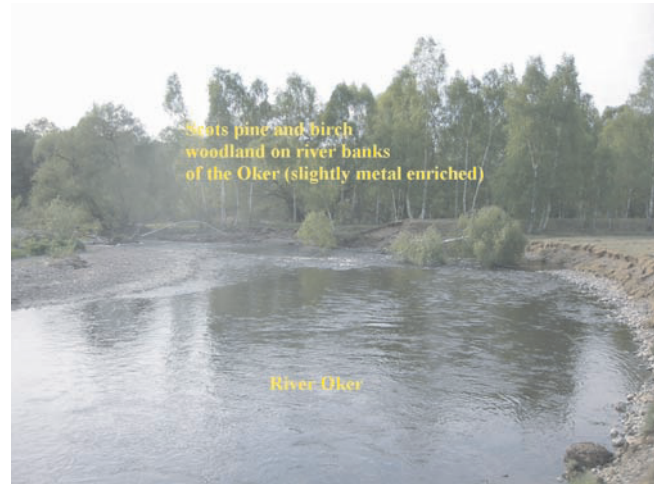


Abb. 21. Die Oker bei Goslar-Oker. Im Hintergrund wächst ein Birken-Pappel-Weiden-Wäldchen auf metallarmem Boden (Foto: ERNST, 2003).

Bleiverlagerung von der Wurzel zum Spross und andererseits eine bevorzugte Akkumulation in alten Pflanzenteilen. Dieses Verhalten von Blei steht in Kontrast zu den sehr mobilen Schwermetallen Kupfer, Eisen und Zink. Darum bestehen innerhalb des Sprosses signifikante Unterschiede im Kupfer-, Eisen- und Mangengehalt zwischen den niedrigen Gehalten in unteren, langlebigen alten Stengelteilen und den hohen Gehalten in oberen, jungen Zweigen und einjährigen Blättern. Auch in anderen Pflanzenarten tragen arbuskuläre Mykorrhizapilze zur Bleiresistenz bei, in Gräsern (HOILAND und OFTEDAL, 1980) ebenso wie in *Viola*-Arten, u. a. *Viola tricolor* und *Viola calaminaria* (HILDEBRANDT et al., 1999).

3.4 Die Grube Samson in St. Andreasberg (51°43'N, 10°31'E)

Das Silbererzbergwerk Samson war zwischen 1621 und 1910 in Betrieb. Die tiefste Abbaustrecke lag 810 m unter der Erdoberfläche. In dieser Grube wurde Silber in sehr hohen Konzentrationen, z. T. sogar als gediegenes Silber, gefunden. Daneben war Arsen in den Mineralen reichlich vertreten. Ein gutes Beispiel der Giftigkeit des Arsens ist das schalige Mineral "Scherbenkobalt" oder "Näpfchenkobalt" (Abb. 19), das von den Bergleuten als "Fliegenstein" eingesetzt wurde. Hierzu füllten sie in kleine Vertiefungen des Gesteins Wasser, das sich mit Arsen anreicherte. Sobald Fliegen das arsenhaltige Wasser tranken, starben sie.

In diesem in den oberen Bereichen für Besucher geöffneten Erzbergwerk sind die großen Wasserräder (12 m Durchmesser) eine besondere technologische Sehenswürdigkeit; sie sorgten für die nötige Energie sowohl für den Transport der Erze und der Bergleute als auch für die Erzaufbereitung und die Wasserhaltung. Im Silbererzbergwerk Grube Samson ist die letzte ursprüngliche und noch in Betrieb befindliche Fahrkunst der Welt zu besichtigen (Abb. 20). Der Stahlaufzug wurde 1837 eingebaut und ermöglichte es, die Bergleute innerhalb von 45 Minuten – zweimal so schnell als mit der alten Technik – auf die tiefen Sohlen zu bringen. Diese Anlage ist noch im-

mer funktionell und bringt heutzutage Wartungspersonal zum in 190 m Tiefe gelegenen Wasserturbinenkraftwerk.

In der Umgebung dieses Bergwerkes gedeihen auf den arsenreichen Böden nur Populationen jener wenigen Pflanzenarten, die in der Lage waren, eine Arsenresistenz zu entwickeln. Es sind vor allem die Gräser *Agrostis capillaris*, *Deschampsia caespitosa* und *Holcus lanatus*, die auf vielen arsenreichen Böden Europas zu finden sind (PORTER und PETERSON, 1975; MEHARG und MACNAIR, 1991, 1992). Eine allein für arsenreiche Böden typische Vegetation ist nicht vorhanden. Arsenat ist ein Analogon zum Phosphat und konkurriert darum mit ihm an der Wurzelplasmamembran um denselben Ionen-Transporter. Arsen-resistente Pflanzen können als ersten Schritt im Arsenresistenzmechanismus den Hoch-Affinitäts-Phosphat/Arsenat-Transport unterdrücken. Trotzdem gelangt noch genügend Arsen in die Pflanze und reichert sich in den Blättern an (PORTER und PETERSEN, 1975), so dass weitere Resistenzmechanismen entwickelt wurden, um in der Zelle das Arsen zu entgiften. Sobald das Arsenat in die Zelle gelangt, wird es durch Glutathion zu Arsenit reduziert, das seinerseits einen sehr stabilen Arsenit-Glutathion-Komplex bildet (SCOTT et al., 1993). Als weiterer Detoxifikationschritt wird durch das Arsen die Phytochelatinsynthese aktiviert, um einen Arsenit-Phytochelatinsynthese-Komplex zu bilden (SCHMÖGER et al., 2000; HARTLEY-WHITAKER et al., 2001), der mit Hilfe eines sog. ABC-Transporters aus dem Zytoplasma in die Vakuole transportiert wird. Arsenit-Phytochelatinsynthese-Komplexe sind eine wesentliche Komponente der Arsen-Resistenz von Gräsern und Kräutern und der Arsen-hyperakkumulierenden Farne der Gattung *Pteris* (SCHAT et al., 2002; ZHAO et al., 2003; BLEEKER et al., 2006).

3.5 Schwermetallreiche Uferterrassen der Oker und deren Umgebung (51°54'N, 10°29'E)

In der Vergangenheit hat die Oker (Abb. 21) große Mengen schwermetallreicher Sedimente aus den Erzbergbaugebieten des Harzes auf der Uferterrasse abgelagert. Die



Abb. 22. *Armerietum halleri* mit *Festuca ovina*, *Silene vulgaris* und *Cladonia furcata* auf der Flussuferterrasse der Oker bei Goslar-Oker (Foto: ERNST, 2003).



Abb. 23. *Arabidopsis (Cardaminopsis) halleri* im *Festuca*-reichen Schwermetallrasen auf der Oker-Terrasse bei Goslar-Oker (Foto: ERNST, 2003).

größte Zufuhr von Schwermetallen kam bis jetzt aus Emissionen der Zinkhütte Oker (ANONYMUS, 1979). Außerdem wurden am Rand der Uferterrasse noch Schlacken u. a. Hüttenprodukte auf kleinen Halden abgelagert, so dass eine sehr heterogene Schwermetallbelastung der Böden in diesem Bereich vorliegt. Die Konzentration einzelner Schwermetalle kann zwischen Mikrohabitaten um das Zehnfache auseinanderliegen (Tab. 10).

Die hohe Variabilität des Bodenschwermetallgehaltes und die Heterogenität der Bodenstruktur spiegeln sich in der Mosaikstruktur der Vegetation wider. Die geringe Wasserkapazität schotterreicher Lokalitäten erlaubt es nur tiefwurzelnden Arten des *Armerietum halleri*, z. B. *Armeria halleri* und *Silene vulgaris*, sich hier anzusiedeln (Abb. 22). Strauchflechten, z. B. *Cladonia furcata*, profitieren von vegetationsfreien Stellen; sie werden durch

den geringen Bodenkontakt kaum mit Schwermetallen konfrontiert; ihre hohe Austrocknungsresistenz verbunden mit langen physiologischen Ruheperioden erlaubt es ihnen, ihren Wasserhaushalt allein über Luftfeuchtigkeit und Regen zu decken.

An Kleinstandorten mit sehr feinkörnigen Sedimenten, die aber besonders schwermetallreich sind (EGGERS, 2004), wachsen flach-wurzelnde Arten, z. B. *Arabidopsis halleri* (Abb. 23) und *Minuartia verna*. An Stellen mit *Festuca ovina* hat sich ein Bodenprofil entwickelt, das durch den langsamen Abbau der Streulage einen relativ hohen Humusgehalt aufweist, und die Dominanz dieses Grases im Schwermetallrasen erklären kann. Infolge der Metallbindung an die Humuskomponenten wird die biologische Verfügbarkeit der Schwermetalle herabgesetzt, so dass auch Arten mit einer mäßigen Schwermetallresis-

Tab. 10. Schwermetallgehalte (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) von Böden nach Königswasserauszug in einigen Mikrostandorten am Oker-Ufer bei Goslar-Oker. Das Material des Bodens unter dem Schwermetallrasen wurde am 15. Mai 2003 gesammelt (ERNST, unveröffentlicht), das übrige Material durch Mitarbeiter der FAL Braunschweig im März 2003 entnommen (FAL, unveröffentlicht). nb = nicht bestimmt, uB = unterhalb der Bestimmungsgrenze

Herkunft des Bodens (Mikrostandort)	Schwermetallgehalt in mg/kg trockener Boden			
	Cd	Cu	Fe	Mn
Schwermetallrasen	107 \pm 15.7	985 \pm 159	2302 \pm 408	1428 \pm 330
Flussufer	28	390	nb	6100
Haldenabraum	14	4700	nb	150
Schlackenhalde	UB	3068	nb	uB
	Pb	V	W	Zn
Schwermetallrasen	5284 \pm 787	nb	6735 \pm 1504	5284 \pm 778
Flussufer	4231	120	100	3400
Haldenabraum	6400	2500	1000	15000
Schlackenhalde	2190	201	uB	30685



Abb. 24. Chlorotische Weidenblätter am Steilufer der Oker zeigen eine Schwermetalltoxizität an (Foto: ERNST, 2003).

tenz, mykorrhizierten Wurzeln und mit einer intermediären Wurzellänge, z. B. *Plantago lanceolata* und *Rumex acetosa*, auf diesen humusreicheren Böden gedeihen, die aus einer Mischung von Schotter und Feinsand bestehen (Tab. 11).

Ein Weidengebüsch mit *Salix alba*, *Salix caprea* und *Salix fragilis* hat sich an der Ufersteilkante der Oker entwickelt (BRANDES, 1992). Wenn ein Teil der Weidenwurzeln in einem Flusssediment mit so hohen Schwermetallgehalten wächst, dass eine Störung des Mineralstoffwechsels verursacht wird, dann werden die Blätter chlorotisch; dagegen bleiben die Blätter eines anderen Teils derselben Weide grün, wenn dieser Teil der Weide in einem schwermetallarmen Sediment wurzelt (Abb. 24).

Nicht nur die Flussuferterrasse der Oker, sondern viele landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Region um Goslar-Oker und Bad Harzburg sind mit Schwermetallen kontaminiert. Die ehemaligen Standorte der alten großen Hütten bei Langelsheim und Oker-Harlingerode heben sich durch die hohen Schwermetallgehalte bodenchemisch aus der Umgebung hervor (Abb. 25).

3.6 Flotationsbecken westlich von Goslar-Oker

Einige der problematischsten Schwermetall-Altlasten im Bergbaugbiet Goslar-Rammelsberg sind die Flotationsbecken im Bereich Gelmketal – Bollrich westlich von Goslar-Oker. Das Rammelsberger Erz ist aufgrund der geochemischen Bedingungen während der devonischen Erzbildung extrem fein verwachsen. Zur Gewinnung der Metalle musste darum das Roherz zu sehr feinem Staub (<0.04 mm) vermahlen werden. Vom Mittelalter bis zur Neuzeit wurden physische und chemische Eigenschaften für die Erzaufbereitung genutzt; die jährliche Erzförderung betrug ca. 7000 t pro Jahr (MATSCHULLAT et al., 1992). Mit der Erschließung des "Neuen Lagers" im Jahr 1860 stieg die Erzgewinnung sprunghaft an und es mussten neue Verfahren der Erzaufbereitung entwickelt werden. 1935 wurde am Rammelsberg ein modernes "Flotationsverfahren" in Betrieb genommen. Hierbei werden unter Zusatz von Chemikalien, u. a. Xanthogenaten, die Oberflächeneigenschaften so verändert, dass die sog. aktivierten Schwermetalle wasserabstoßend (hydrophob) werden und das taube Material wasserlöslich (hydrophil) wird. Durch Einblasen von Luft begann der Schaum mit den Schwermetallen sich an der Oberfläche zu sammeln und konnte dann abgeschöpft werden. Diese Flotationsanlage, eine moderne Erzwäsche, überspannt am Rammelsberg einen Höhenunterschied von 50 m und lieferte bis zu 75.000 t Erzkonzentrat pro Jahr. Zuerst wurden die Konzentrate von Kupfer, dann diejenigen von Blei und schließlich die von Zink ausflotiert. Danach kamen die Sulfide, Pyrite und Baryte an die Reihe. Das schwermetallhaltige Flotationskonzentrat wurde getrocknet und als Filterkuchen an die Hütten geliefert. Doch verlief die Trennung der Schwermetalle vom tauben Gestein unvollständig. Der Schlamm, der noch genügend hohe Schwermetallkonzentrationen enthielt, wurde in Absetz- und Klärbecken im Gelmketal gespült. Von den im Flotationsverfahren zugesetzten Chemikalien erwiesen sich die Xanthogenate als toxisch für Fische und aquatische Insekten, so dass zusätzlich zu den Schwermetallen eine weitere ökotoxikologische Belastung der Abwässer und der Flüsse zu verzeichnen ist. Diese Absetzbecken an der Oker sind ein langfristiges Umweltproblem, auch nach

Tab. 11. Schwermetallgehalte (Mittelwert \pm Standardfehler [S.E.]) in ausgewachsenen Blättern von Pflanzenarten, die auf der Flussuferterrasse der Oker bei Goslar-Oker wachsen. Das Material wurde am 15. Mai 2003 gesammelt (ERNST, unveröffentlicht)

Pflanzenart	Schwermetallgehalt in mg/kg Trockenmasse						
	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	
<i>Arabidopsis halleri</i>	138 \pm 6.74	27.3 \pm 4.45	1005 \pm 190	151 \pm 20.20	110 \pm 10.40	10986 \pm 2092	
<i>Armeria halleri</i>	6.29 \pm 1.24	16.5 \pm 1.91	212 \pm 101	35.7 \pm 5.49	26.9 \pm 4.14	791 \pm 248	
<i>Minuartia verna</i>	42.4 \pm 9.55	55.4 \pm 15.5	513 \pm 77	79.7 \pm 14.80	240 \pm 85.00	1988 \pm 333	
<i>Plantago lanceolata</i>	3.37 \pm 0.56	25.4 \pm 5.21	100 \pm 25	44.5 \pm 7.14	70.4 \pm 18.60	1314 \pm 85	
<i>Rumex acetosa</i>	21.6 \pm 6.41	14.8 \pm 4.51	237 \pm 102	57.1 \pm 15.40	141 \pm 22.80	2812 \pm 628	
<i>Silene vulgaris</i>	8.66 \pm 0.90	20.3 \pm 0.64	391 \pm 66	61.5 \pm 7.10	143 \pm 78.70	2400 \pm 268	
<i>Festuca ovina</i>	2.59 \pm 0.34	16.8 \pm 3.69	164 \pm 25	29.7 \pm 4.94	68.4 \pm 8.29	451 \pm 59	

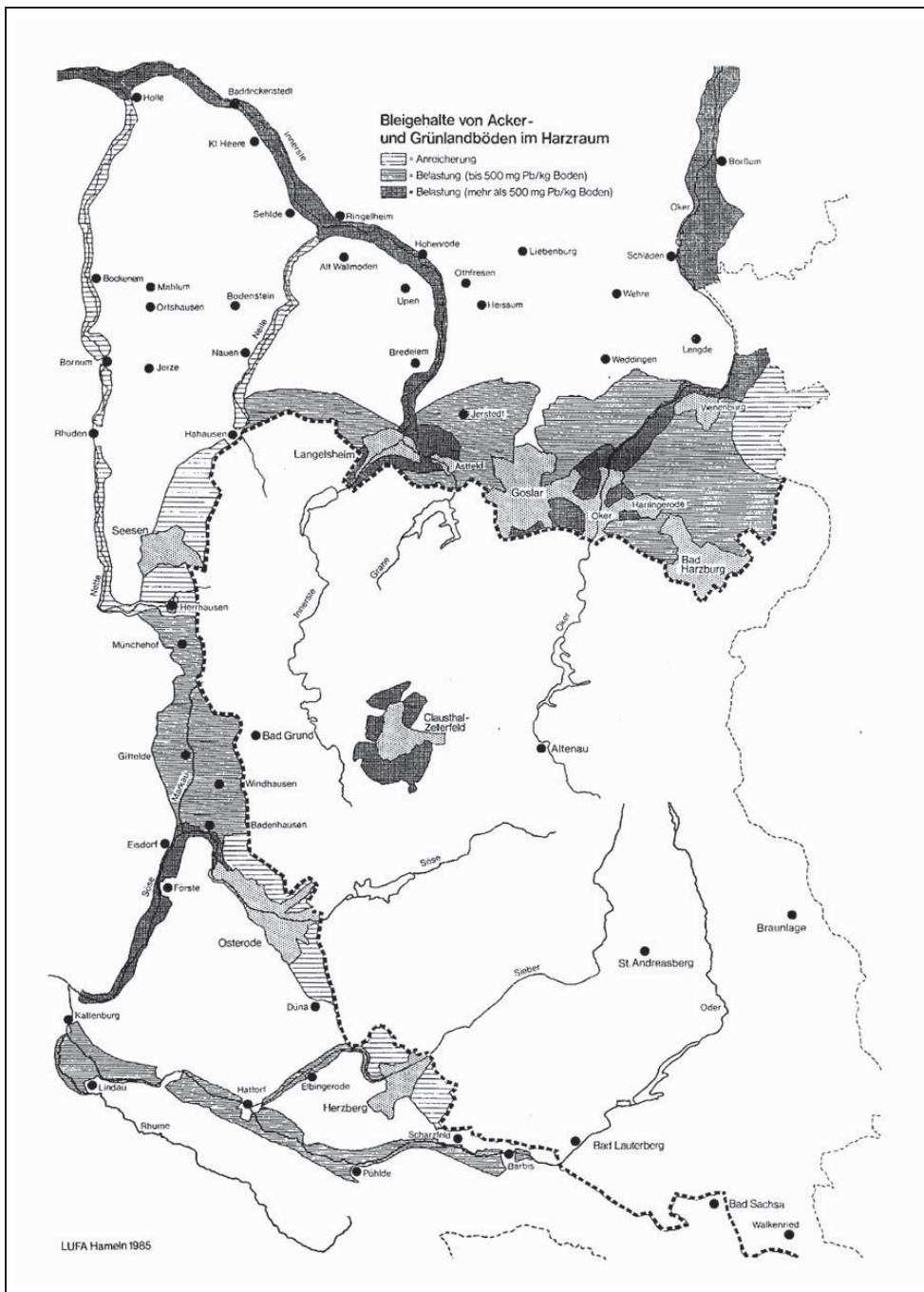


Abb. 25. Der Bleigehalt der Böden im nördlichen Harzvorland von Langelsheim bis Bad Harzburg ist durch die Emissionen der Anlagen zur Erzgewinnung und Erzaufbereitung im Vergleich zu unbelasteten Böden stark erhöht. Legende: gestreifte Signatur = Pb-Anreicherung; graue Signatur = Kontamination bis zu 500 mg Pb/kg, schwarze Signatur = > 500 mg Pb/kg trockener Boden (aus KÖSTER und MERKEL 1985).

Beendigung des Erzbergbaus. Seit 1937 wurden 7 Millionen Tonnen Abraam mit 2,5 Millionen Tonnen Blei, Eisen, Kupfer und Zink und über 2 Millionen Tonnen Bariumsulfat hier abgelagert (für mehr technische Informationen siehe <http://www.rammelsberg.de>).

4 Besuch des Weltkulturerbes Goslar-Rammelsberg

Wenn genügend Zeit auf dieser Harzroute übrig ist, ist die Kaiserstadt Goslar einen Besuch wert (siehe Routenkarte). Goslar wurde 922 von Heinrich I. gegründet, während der Erzbergbau am Rammelsberg schon mehr

als 3000 Jahre alt ist und die erste Siedlung aus dieser Zeit stammen dürfte. Goslar verdankte seinen Wohlstand dem Silber vom Rammelsberg und war wegen seiner reichen Erzvorkommen ein wichtiger Handelsplatz der Hanse. Der Bau der Kaiserpfalz wurde im 11. Jahrhundert durch Kaiser Heinrich II. initiiert und durch Heinrich III. mit einer Erweiterung fortgesetzt, um nahe des strategisch wichtigen Erzreichtums im Rammelsberg zu residieren. Vom 10. bis 12. Jahrhundert war Goslar ein prominenter Sitz der Kaiser des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation. Die Erzlagerstätte des Rammelsberges war nach fast 3000-jähriger Gewinnung im Jahre 1988 erschöpft und wurde daher geschlossen. Der Rammels-

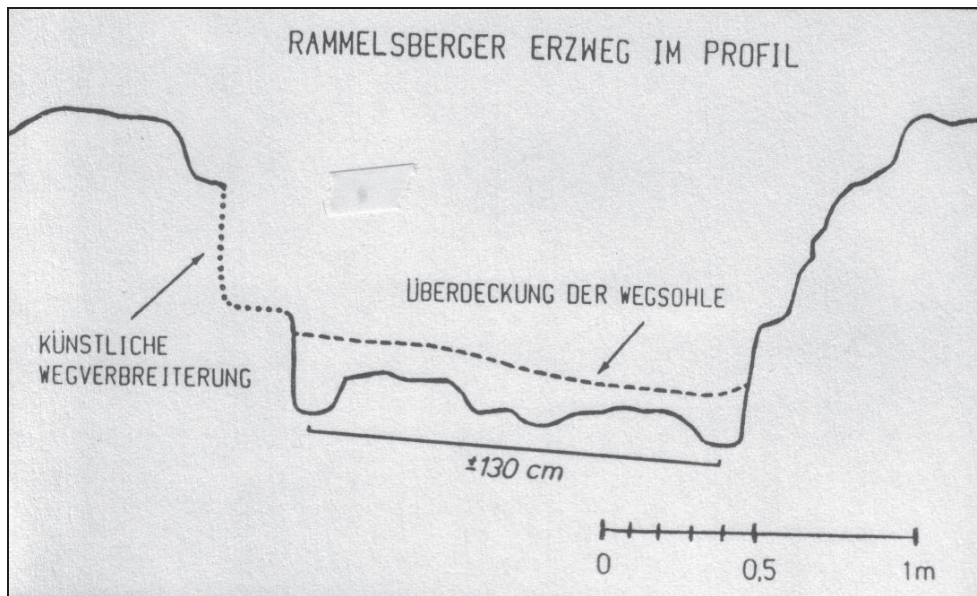


Abb. 26. Querschnitt durch einen historischen Transportpfad („Hohlweg“) am Rammelsberg (aus SPIER, 1988).

berg mit Deutschlands bedeutendstem Metallergbergwerk zeugt von einem mehr als tausendjährigen kontinuierlichen Grubenbetrieb. In diesem Bergwerk wurden fast 30 Millionen Tonnen Erze abgebaut – eine der produktivsten und reichsten Lagerstätten Europas. Sie kann sich darauf berufen, vom 1. bis zum 20. Jahrhundert die "Erste" unter den vielen Metallerggruben Europas gewesen zu sein. Seit 1989 wurde dieses geschichtlich und bergbautechnisch wichtige Monument des Metallergbergbaus zu einem Museum umgebaut, das über und unter Tage den Erzabbau und die Prozesstechnologie in authentischer Weise konserviert hat. Ein Besuch der Untertageanlagen des Rammelsberges ist nahezu eine Verpflichtung für jeden Harzbesucher. Für einen Kurzbesuch ist ein Blick in den Shop des Bergwerkmuseums und eine Fahrt oder ein Spaziergang über den Nordhang des Rammelsberges bis zum Maltermeisterturm anzuraten, wo neben einer vegetationsfreien Halde eine stark reliefierte Landschaft durchquert wird. Historisch bedeutende Hohlwege lassen hier eine Vorstellung aufkommen, wie die Erze in früheren Zeiten zu den Metallhütten transportiert wurden (Abb. 26). Ausführliche Informationen sind zu finden unter: <http://www.rammelsberg.de> und <http://www.goslar.de>. Im Dezember 1992 wurde Goslar gut erhaltenes mittelalterliches Stadtzentrum und das Erzbergwerk Rammelsberg in die Liste des UNESCO-Weltkulturerbes aufgenommen.

Literatur

- ALSTRUP, V., E.S. HANSEN, 1977: Three species of lichens tolerant of high concentration of copper. *Oikos* 29, 290-293.
- ANONYMOUS, 1979: Schwefeldioxid und Schwermetalle im Raum Oker. Eine Information des Niedersächsischen Sozialministers. *Reinholdung der Luft* 5, 1-69.
- ASSUNCAO, A.G.L., P. DA COSTA MARTINS, S. DE FOLTER, R. VOOLJS, H. SCHAT, M.G.M. AARTS, 2001: Elevated expression of metal transporter genes in three accessions of the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant, Cell and Environment* 24, 217-226.
- BAUMANN, A., 1984: Extreme heavy metal concentrations in sediments of the Oker river – A river draining an old mining and smelting area in the Harz Mountains, Germany. In: J. O. NRIAGU (ed.) *Environmental Impacts of Smelters*. J. Wiley & Sons, New York, pp. 579-591.
- BAUMBACH, H., F.H. HELLWIG, 2007: Genetic differentiation of metal-tolerant and non-metal-tolerant *Armeria maritima* (Mill.) Willd. *Taxa (Plumbaginaceae) in Central Europe*. *Plant Syst. Evol.* 269: 245-258.
- BLEEKER, P.M., H.W.J. HAKVOORT, M. BLIEK, E. SOUER, H. SCHAT, 2006: Enhanced arsenate reduction by a CDC25-like tyrosine phosphatase explains increased phytochelatin accumulation in arsenate-tolerant *Holcus lanatus*. *Plant J.* 45, 917-929.
- BOYD, R.S., S.N. MARTENS, 1994: Nickel hyperaccumulated by *Thlaspi montanum* var. *montanum* is acutely toxic to an insect herbivore. *Oikos* 70, 21-25.
- BRADLEY, R., A.J. BURT, D.J. READ, 1981: Mycorrhizal infection and resistance to heavy metal toxicity in *Calluna vulgaris*. *Nature* 292, 335-337.
- BRADSHAW, A.D., 1976: Pollution and evolution. In: T. A. MANSFIELD (ed.) *Effects of Air Pollutants on Plants*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 135-159.
- BRANDES, D., 1992: Ruderal- und Saumgesellschaften des Okertales (Ruderal and skirt communities of the Oker Valley [Lower Saxony]). *Braunschweiger Naturkundliche Schriften* 4, 143-165.
- BREJ, T., 1998: Heavy metal tolerance in *Agropyron repens* (L.) P. Bauv. populations from the Legnica copper smelter area, Lower Silesia. *Acta Soc. Bot. Pol.* 62, 325-333.
- BROOKS, R.R., 1998: Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. CAB International, Wellingford, UK.
- BROOKS, R.R., J. LEE, R.D. REEVES, T. JAFFRÉ, 1977: Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration* 7, 49-57.
- CHARDONNENS, A.N., P.L.M. KOEVOETS, A. VAN ZANTEN, H. SCHAT, J.A.C. VERKLEIJ, 1999a: Properties of enhanced tonoplast zinc transport in naturally selected zinc-tolerant *Silene vulgaris*. *Plant Physiology* 120, 779-785.
- CHARDONNENS, A.N., W. TEN BOOKUM, S. VELLINGA, H. SCHAT, J.A.C. VERKLEIJ, W.H.O. ERNST, 1999b: Allocation patterns of zinc and cadmium in heavy metal tolerant and sensitive *Silene vulgaris*. *Journal of Plant Physiology* 155, 778-787.
- COLEMAN, C.M., R.S. BOYD, M.S. EUBANKS, 2005: Extending the elemental defense hypothesis: dietary metal concentrations below hyperaccumulator levels could harm herbivores. *J.Chem. Ecol.* 31, 1669-1681.
- DE KNECHT, J.A., N. VAN BAREN, W.M. TEN BOOKUM, H.W. WONG FONG SANG, P.L.M. KOEVOETS, H. SCHAT, J.A.C. VERKLEIJ, 1995: Synthesis and degradation of phytochelatin in cadmium-sensitive and cadmium-tolerant *Silene vulgaris*. *Plant Science* 106, 9-18.
- DIERSCHKE, H., 1969: Pflanzensoziologische Exkursionen im Harz. Bericht über die Tagung der Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft in Osterode vom 14. bis 16. Juni 1963. *Mitteilungen der Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft NF* 14, 458-479.

- DRÄGER, D.B., A.G. DESBROSSES-FONROUGE, C. KRACH, A. CHARDONNENS, R.C. MEYER, P. SAUMITOU-LAPRADE, U. KRÄMER, 2004: Two genes encoding *Arabidopsis halleri* MTP1 metal transport proteins co-segregate with zinc tolerance and account for high MTP1 transcript levels. *Plant J.* 38, 425-439
- EGGERS, B., 2004: Verteilung und Bindungsverhalten ausgewählter Schwermetalle in Aueböden der Oker und Ecker (Harzvorland). Dissertation Techn. Univ. Braunschweig.
- EMMERLING, O., R. KOLKOWITZ, 1914: Chemische und biologische Untersuchungen über die Innerste. Mitteilungen der Königlichen Landesanstalt für Wasserhygiene 18, 167-194.
- ERNST, W., 1965: Ökologisch-soziologische Untersuchungen in den Schwermetallpflanzengesellschaften Mitteleuropas unter Einschluss der Alpen. Abhandlungen aus dem Landesmuseum für Naturkunde zu Münster in Westfalen 27 (1), 1-54.
- ERNST, W.H.O., 1974: Schwermetallvegetation der Erde. Stuttgart, G. Fischer Verlag.
- ERNST, W.H.O., 1976: Physiological and biochemical aspects of metal tolerance. In: Mansfield, T.A. (ed.), *Effects of Air Pollutants on Plants*. Cambridge, Cambridge University Press, pp. 115-133.
- ERNST, W.H.O., 1987: Population differentiation in grassland vegetation. In: J. Van Andel, J.P. Bakker, R. W. Snaydon (eds.) *Disturbance in Grasslands*. Dordrecht, Junk Publishers, pp. 213-228.
- ERNST, W.H.O., 1999: Biomarkers in plants. In: D. B. Peakall, C. H. Walker, P. Migula (eds.) *Biomarkers: A Pragmatic Basis for Remediation of Severe Pollution in Eastern Europe*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 135-151.
- ERNST, W.H.O., 2003: Evolution of adaptation mechanisms of plants on metal-enriched soils. In: Larcher, W., *Physiological Plant Ecology*, 4th ed., Berlin, Springer Verlag, pp. 433-436.
- ERNST, W.H.O., H.J.M. NELISSEN, 2000: Life-cycle phases of a zinc- and cadmium-resistant ecotype of *Silene vulgaris* in a risk assessment of polymetallic mine soils. *Environmental Pollution* 107, 329-338.
- ERNST, W.H.O., H.J.M. NELISSEN, W.M. TEN BOOKUM, 2000: Combination toxicology of metal-enriched soils: physiological responses of a Zn- and Cd-resistant ecotype of *Silene vulgaris* on polymetallic soils. *Environmental and Experimental Botany* 43, 55-71.
- ERNST, W.H.O., 2006: Der Grasnelkenrüßler *Sibinia sodalis* GERMAR 1824 auf Schwermetallrasen in Deutschland (Col., Curculionidae). *Mitt. Arbgem. Rhein. Koleopterologen* (Bonn) 16, 7-10.
- ERNST, W.H.O., G.J. KRAUSS, J.A.C. VERKLEIJ, D. WESEBERG, 2008: Interaction of heavy metals with the sulphur metabolism in angiosperms from an ecological point of view. *Plant Cell Environ.* 31, 123-143.
- GUNDLACH, H., K. STEINKAMP, 1973: Geochemische Prospektion im Oberharz, einem alten Bergbaugebiet. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 124, 37-49.
- HARTLEY-WHITAKER, J., G. AINSWORTH, R. VOOLJS, W.M. TEN BOOKUM, H. SCHAT, A.A. MEHARG, 2001: Phytochelatins are involved in differential arsenate tolerance in *Holcus lanatus*. *Plant Physiology* 126, 299-306.
- HARTMANN, R., 2000: Deskription der Schwermetallgehalte in Knochen, Organen und Haaren von Fledermäusen (Chiroptera) im Zeitraum 1987 - 1999. Diss. Universität Göttingen, <http://webdoc.gwdg.de/diss/2001/hartmann/hartmann.pdf>
- HEIMHOLD, W., 1987: Beobachtungen über die Sukzession von Pflanzenarten auf rauchgeschädigten Böden im Bereich der ehemaligen Bleihütte Clausthal. [unveröff.]
- HILDENBRANDT, U., M. KALDORF, H. BOTHE, 1999: The zinc violet and its colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Physiology* 154, 709-717.
- HOILAND, K., P. OFTEDAL, 1980: Lead tolerance in *Deschampsia flexuosa* from naturally lead polluted area in S. Norway. *Oikos*, 34, 168-172.
- IETSWAART, J.H., W.A.J. GRIFFIOEN, W.H.O. ERNST, 1992: Seasonality of VAM infection in three populations of *Agrostis capillaris* (Poaceae) on soil with and without heavy metal enrichment. *Plant and Soil* 139, 67-73.
- JACQUEMART, S., 1958: Contribution à l'écologie des haldes calaminaires. 1. Colonisation d'un milieu neuf. Institut royal des Sciences naturelles de Belgique 34 (11), 1-28.
- JOHANNES, D., H. KRAUSE, 1985: Ergebnisse biogeochemischer Untersuchungen im Bereich des Nordwestharzes. *Erzmetall* 38 (9), 432-440.
- KLÄHN, J.O.J.,: Historisches Silber-Erzbergwerk "Grube Samson" Sankt Andreasberg/Oberharz - St. Andreasberg.
- KNOLLE, F., 1989: Harzbürtige Schwermetallkontaminationen in den Flußgebieten von Oker, Innerste, Leine und Aller. Beiträge zur Naturkunde Niedersachsens 42 (2), 53-60.
- KNOLLE, F., F. KNOLLE, 1983: Vogel- und Säugetierverluste durch Umweltbelastungen im Gebiet des Harzes. *Vogelkundliche Berichte aus Niedersachsen* 15 (2), 47-49.
- KOOP, U., 1989: Untersuchungen über die Schwermetallanreicherungen in Fischen aus schwermetallbelasteten Gewässern im Hinblick auf deren fischereiliche Nutzung. Diss. Universität Göttingen.
- KÖSTER, W., D. MERKEL, 1985: Schwermetalluntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Böden und Pflanzen in Niedersachsen. Landwirtschaftskammer Hannover, LUFÄ Hameln.
- KRÄMER, U., J.D. COTTER-HOWELLS, J.M. CHARNOCK, A.J.M. BAKER, J.A.C. SMITH, 1996: Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature* 379, 635-638.
- KRÄMER, U., I.J. PICKERING, R.C. PRINCE, I. RASKIN, D.E. SALT, 2000: Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species. *Plant Physiology* 122, 1343-1353.
- KRAUME, E., 1948: Die geschichtliche Entwicklung der Erzaufbereitung im Harz. *Erzmetall* 1, 1-12
- LANGE, O.L., H. ZIEGLER, 1963: Der Schwermetallgehalt von Flechten aus dem *Acarosporium sinopicae* auf Erzschlackenhalde des Harzes. I. Eisen und Kupfer. Mitteilungen der Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft NF 10, 156-183.
- LEFÈBVRE, C., 1974: Population variation and taxonomy in *Armeria maritima* with special reference to heavy-metal-tolerant populations. *New Phytologist* 73, 209-219.
- LIBBERT, W., 1930: Die Vegetation des Fallsteingebietes. Beiheft zu den Jahresberichten der Naturhistorischen Gesellschaft zu Hannover 2, 1-68.
- LIBBERT, W., 1937: Die Steinfelder an der Oker. *Naturschutz* 18, 183-186.
- MACNAIR, M.R., 2002: Within and between population genetic variation for zinc accumulation in *Arabidopsis halleri*. *New Phytologist* 155, 59-66.
- MARTENS, S.N., R.S. BOYD, 2002: The defensive role of Ni hyperaccumulation by plants: a field experiment. *American Journal of Botany* 89, 998-1003.
- MATHYS, W., 1977: The role of malate, oxalate and mustard oil glucosides in the evolution of zinc resistance in herbage plants. *Phytologia Plantarum* 40, 130-136.
- MATSCHELLAT, J., N. NIEHOFF, K.H. PÖRTGE, 1991: Bergbau- und Zivilisationsgeschichte des Harzes am Beispiel der Auelehmpflanze der Oker (Niedersachsen). *Neue Bergbautechnik* 8, 322-326.
- MEHARG, A.A., M.R. MACNAIR, 1991: The mechanisms of arsenate tolerance in *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. and *Agrostis capillaris* L. *The New Phytologist* 119, 291-297.
- MEHARG, A.A., M.R. MACNAIR, 1992: Suppression of the high affinity phosphate uptake system: a mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. *Journal of Experimental Botany* 43, 519-524.
- MEYER, C.F.W., 1822: Beiträge zur Chorographischen Kenntnis des Flussgebietes der Innerste in den Fürstenthümern Grubenhagen und Hildesheim mit besonderer Berücksichtigung auf die Veränderungen, die durch diesen Strom in der Beschaffenheit des Bodens und in der Vegetation bewirkt worden sind. Erste Anlage zur Flora des Königreichs Hannover. Herbst, Göttingen.
- NEUMANN, D., U. ZUR NIEDEN, W. SCHWIEGER, I. LEOPOLD, O. LICHTENBERGER, 1997: Heavy metal tolerance of *Minuartia verna*. *Journal of Plant Physiology* 151, 101-108.
- NOWAK, H., F. PREUL, 1971: Untersuchungen über Blei- und Zinkgehalte in Gewässern des Westharzes. Beihefte zum Geologischen Jahrbuch 105, 1-67.
- OTT, T., E. FRITZ, A. POLLE, A. SCHÜTZENDÜBEL, 2002: Characterization of antioxidative systems in the ectomycorrhiza-building basidiomycete *Paxillus involutus* (Bartsch) Fr. and its reaction to cadmium. *FEMS Microbiology Ecology* 42, 359-366.
- PAWLIK-SKOWRONSKA, B., L. SANITÀ DI TOPPI, M.A. FAVALI, F. POSSATI, J. PIRSZEL, T. SKOWRONSKI, 2002: Lichens respond to heavy metals by phytochelatins. *New Phytologist* 156, 95-102.
- PORTER, E.K., P.J. PETERSON, 1975: Arsenic accumulation by plants on mine waste (United Kingdom). *Science of the Total Environment* 4, 365-371.
- PURVIS, O.W., 1984: The occurrence of copper oxalate in lichens growing on copper sulphide-bearing rocks in Scandinavia. *Lichenologist* 16, 197-204.
- PURVIS, O.W., J.A. ELIX, J.A. BROOMHEAD, G.C. JONES, 1987: The occurrence of copper-norstickic acid in lichens from cupriferous substrata. *Lichenologist* 19, 193-203.
- SARRET, G., P. SAUMITOU-LAPRADE, V. BERT, O. PROUX, J.L. HAZEMANN, A. TRAVERSE, M.A. MARCUS, A. MANCAEU, 2002: Forms of zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Physiology* 130, 1815-1826.
- SCHAT, H., M. LLUGANY, R. VOOLJS, J. HARTLEY-WITAKER, P.M. BLEEKER, 2002: The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. *Journal of Experimental Botany* 53, 2381-2392.

- SCHAT, H., S.S. SHARMA, R. VOOLJS, 1997: Heavy metal-induced accumulation of free proline in a metal-tolerant and a nontolerant ecotype of *Silene vulgaris*. *Physiologia Plantarum* 101, 477-482.
- SCHMÖGER, M.E.V., M. OVEN, E. GRILL, 2000: Detoxification of arsenic by phytochelatins in plants. *Plant Physiology* 122, 793-802.
- SCHWÄGLER, U., B. SIMON-MORTH, B. OUAN, H. FAASCH, 2003: Gewässergütebericht 2003 für das Flusseinzugsgebiet der Rhume. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz – Betriebsstelle Süd. NLWK Schriftenreihe 7, 1-189.
- SCOTT, N., K.M. HATLEID, N.E. MACKENZIE, D.E. CARTER, 1993: Reaction of arsenic (III) and arsenic (V) species with glutathione. *Chemical Research in Toxicology* 6, 102-106.
- SEGERS-GLOCKE, C. (Hrsg.) 2000: Auf den Spuren einer frühen Industrielandschaft; Naturraum-Mensch-Umwelt-Harz. Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 21, Hameln.
- SPIER, H., 1988: Historischer Rammelsberg. Wieda, Verlag G. Pfeiffer & Hagenberg Verlag.
- THALIUS, J., 1588: *Sylva Hercynica, sive catalogus plantarum sponte nascentium in montibus et locis vicinis Hercynae*. Frankfurt a. M.
- VAN ASSCHE, F., H. CLIJSTERS, 1986: Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentration of zinc: effect on ribulose-1,5-bisphosphate carboxylases/oxygenase. *Journal of Plant Physiology* 125, 355-360.
- VAN HOOF, N.A.L.M., V.H. HASSINEN, H.J.W. HAKVOORT, K.F. BALLINTJN, H. SCHAT, J.A.C. VERKLEIJ, W.H.O. ERNST, S.O. KARENLAMPI, A.K. TERVAHAUTA, 2001: Enhanced copper tolerance in *Silene vulgaris* (Moench) Garcke populations from copper mines is associated with increased transcript levels of a 2b-type metallothionein gene. *Plant Physiology* 126, 1519-1526.
- VEKEMANS, X., C. LEFÈVRE, J. COLAUD, S. BLAISE, W. GRUBER, S. SILJAK-YAKOVLEV, S.C. BROWN, 1996: Variation in nuclear DNA content at the species level in *Armeria maritima*. *Hereditas* 124, 237-242.
- VERKLEIJ, J.A.C., T.F. LUGTENBORG, W.H.O. ERNST, 1989: The effect of geographical isolation on enzyme polymorphism of heavy-metal tolerant populations of *Minuartia verna* (L.) Hiern. *Genetica* 78, 133-143.
- VON HODENBERG, A., A. FINCK, 1975: Untersuchung über toxische Wachstumsschäden an Getreide und Rüben im Harzvorland. *Landwirtschaftliche Forschung* 28, 322-332.
- VON SCHROEDER, J., C. REUSS, 1883: Die Beschädigung der Vegetation durch Rauch und die Oberharzer Hüttenrauchschäden. Berlin.
- ZHAO, F.J., J.R. WANG, J.H.A. BARKER, H. SCHAT, P.M. BLEEKER, S.P. MCGRATH, 2003: The role of phytochelatins in arsenic tolerance in the hyperaccumulator *Pteris vittata*. *The New Phytologist* 159, 403-410.