

Verbreitung, Vergesellschaftung und genetische Populationsdifferenzierung des Berg-Steinkrautes (*Alyssum montanum* L.) auf Schwermetallstandorten im östlichen Harzvorland

Andreas GERTH, Dirk MERTEN, Henryk BAUMBACH

5 Abbildungen und 8 Tabellen

Abstract

GERTH, A., MERTEN, D., BAUMBACH, H.: Distribution, community context, and genetic population structure of *Alyssum montanum* L. on metalliferous soils in the eastern foreland of the Harz Mountains. - Hercynia N. F. 44 (2011): 73 – 92.

The distribution pattern and the community context of *Alyssum montanum* L. (Brassicaceae) on copper shale spoil heaps in the eastern foreland of the Harz Mountains (Saxony-Anhalt, Central Germany) were investigated with regard to edaphic and climatic factors. Therefore, we installed transects on six spoil heaps with a total of 28 permanent plots. In the upper soil layer of all permanent plots the total amount of metals and pH-value were analysed.

Alyssum montanum becomes rarer from the Saale river valley to the west and reaches its western border of distribution in the east of Gerbstedt. In the investigated successional stage *Scabiosa ochroleuca* and *Euphorbia cyparissias* also follow this gradient. The vegetation relevés show a strong differentiation of the *Armerietum halleri* in the variation with *A. montanum* which is mainly characterised by the absence of *Minuartia verna*, the character species of the class *Violetea calaminariae*. The regional distribution gradient of *A. montanum* corresponds to the gradients of precipitation and temperature, however it seems to be not (exclusively) determined by them.

In the upper soil layer of spoil heaps with occurrence of *A. montanum* we found high concentrations of metals (max. 27 906 mg/kg Pb, 7636 mg/kg Cu, 18 591 mg/kg Zn, 138 mg/kg Ni, 78 mg/kg Cd, 151 mg/kg Co, 116 mg/kg Cr). Therefore, *Alyssum montanum* has to be classified as a facultative metallophyte. Whether the species also (hyper)accumulates metals has to be proven.

The AFLP (amplified fragment length polymorphism) analysis of the genetic population structure shows a geographical differentiation corresponding to regional groups of populations. Populations within these groups show only moderate genetic differentiation. This general pattern is caused by isolation by distance. Nevertheless, there are some exceptions explainable only by occasional long distance dispersal events associated with the genesis of habitats in the post-mining landscape.

The current distribution pattern of *A. montanum* is most likely caused by epizoochory and hemerochory in the post-mining landscape from east to west starting in the Saale river valley from primary, non-metalliferous habitats. Apparently, the distance between spoil heaps is too large at the western range margin to allow further spread of *A. montanum*.

Key words: metallophytes, metalliferous soils, AFLP, post-mining landscape, copper shale spoil heaps

1 Einleitung

Metallhaltige Böden stellen hohe Anforderungen an die physiologische Leistungsfähigkeit höherer Pflanzen. Diese werden nicht nur durch den hohen Metallgehalt verursacht, sondern meist auch durch die Trockenheit und Nährstoffarmut der Standorte. Aufgrund der energetisch aufwendigen physiologischen Anpassungen sind Pflanzen, die diesen Bedingungen erfolgreich begegnen, schwache Konkurrenten. Sie sind an diese Extremstandorte gebunden, an denen die Konkurrenz durch andere Arten gering ist (ERNST et al.

1992). Die meisten Arten, die solche Standorte besiedeln, sind obligate oder fakultative Metallophyten und weisen wegen der zerstreuten Lage der Erzbergbaugebiete in Mitteleuropa ein disjunktes Areal mit regionalen Verbreitungsschwerpunkten auf. Zu diesen charakteristischen und in den letzten Jahren zum Teil sehr intensiv untersuchten Taxa gehören *Minuartia verna* ssp. *hercynica*, Ökotypen von *Silene vulgaris* und *Armeria maritima* s. l. (BAUMBACH 2005, BAUMBACH & HELLOWIG 2007), *Viola calaminaria* und *V. guesstphalica* (HILDEBRANDT et al. 2006), *Thlaspi caerulescens* (KOCH et al. 1998, GARCIA GONZALEZ & CLARK 1989) und *Cardaminopsis halleri* (FABISZEWSKI 1986). Die durch diese Arten und wenige stete Begleiter gebildeten Schwermetallrasen der Klasse *Violetea calaminariae* BR. BL. et R. TX. 1943 gehören zu den in ökologischer Hinsicht besonders interessanten Vegetationseinheiten Mitteleuropas. Einen ihrer im europäischen Maßstab bedeutenden Verbreitungsschwerpunkte hat die Schwermetallvegetation in Sachsen-Anhalt auf den Kupferschieferhalden des östlichen und südöstlichen Harzvorlandes. Die dort vorkommende Assoziation der Schwermetallrasen ist das *Armerietum halleri* LIBB. 1930 (Kupfer-Grasnelkenflur) mit den Charakterarten *Armeria maritima* s. l., *Silene vulgaris* und *Minuartia verna* (SCHUBERT 1953/54, ERNST 1974).

Eine besondere Ausprägungsform dieser Assoziation, in denen das Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* L., Brassicaceae) offenbar die gleiche ökologische Nische besetzt wie sonst die Frühlingsmiere, wurde von den Saalehöhen zwischen Könnern und Wettin von SCHUBERT (1952) als *Armerietum halleri* saalense beschrieben. *A. montanum* kommt aktuell nur auf den Halden östlich der Saale und im nordöstlichen Bereich der Mansfelder Mulde vor, nimmt aber dort nach Westen hin schnell ab und erreicht östlich von Gerbstedt die westliche Verbreitungsgrenze im Gebiet. Gegenläufig verhält sich *M. verna*, die von Hettstedt in östlicher Richtung abnimmt und etwa auf der gleichen Länge wie *A. montanum* ihre – allerdings östliche – Verbreitungsgrenze erreicht. Interessanterweise kommen beide Arten auf einer einzigen Kleinhalde östlich der Saale bei Könnern gemeinsam vor.

Die Gattung *Alyssum* L. ist reich an Metallophyten. Von den 70 europäischen Vertretern der Gattung (BALL & DUDLEY in TUTIN et al. 1993) kommen mindestens 14, überwiegend im östlichen Mittelmeergebiet, auf dem Balkan, in Norditalien aber auch auf der Iberischen Halbinsel verbreitete Arten als Hyperakkumulatoren auf metallhaltigen Standorten vor (BROOKS & RADFORD 1978, BROOKS et al. 1979, DUDLEY 1986a, b). *A. montanum* ist von mitteleuropäischen Schwermetallstandorten bisher nicht untersucht. Die Art hat ein disjunktes Areal mit meridional-submeridionalen Verbreitungsschwerpunkt und kommt auch in der temperaten Florenzone in collinen Lagen vor (MEUSEL et al. 1965). Die im Untersuchungsgebiet ausschließlich vorkommende subsp. *montanum* ist eine Sippe der Trockenrasen und Felsfluren auf trockenwarmen, flachgründigen Steinböden. Außer im unteren Saaletal ist *A. montanum* im Mitteldeutschen Trockengebiet auch im mittleren Saaletal bei Naumburg, auf der Bottendorfer Höhe, am Kyffhäuser und im Thüringer Becken verbreitet (ZÜNDORF et al. 2006). Weitere Vorkommen gibt es im nördlichen Harzvorland sowie an der Elbe bei Magdeburg und bei Dresden (BENKERT et al. 1996, HARDTKE & IHL 2000, LAU 2009).

Gegenstand dieses Beitrags, dem die Staatsexamensarbeit des Erstautors zugrunde liegt (GERTH 2010), ist die Verbreitung, Vergesellschaftung und molekulare Charakterisierung von *A. montanum* auf Haldenstandorten im östlichen Harzvorland.

Folgende Fragestellungen sollen untersucht werden:

- (1) Wie entstand der Verbreitungsgradient der Art *A. montanum*, dem der Verbreitungsgradient von *M. verna* entgegenläuft?
- (2) Wie kann in diesem Zusammenhang das gemeinsame Vorkommen der beiden Arten in Könnern gedeutet werden?
- (3) Folgen auch andere Arten diesem Gradienten?
- (4) Welchen Beitrag zur Erklärung der Verbreitung von *A. montanum* im Untersuchungsgebiet kann eine populationsgenetische Charakterisierung liefern?

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchte Art

Alyssum montanum ist ein 5 – 20 cm hoher krautiger Chamaephyt mit am Grund leicht verholzenden, reich verzweigten und liegend-aufsteigenden Stängeln (Abb. 1). Die Früchte sind 3 – 5 mm lange, kreisrunde bis ovale, ein- bis viersamige Schötchen, deren Klappen dicht sternhaarig und wenig gewölbt sind. Die Samen, die keine besonderen Anpassungen im Dienst der Verbreitung aufweisen, sind eiförmig, ca. 2 mm lang, braun und schmal hautrandig (0,2 – 0,4 mm). Die Hauptblütezeit liegt im April bis Mai, im Herbst kann eine weitere Blüte erfolgen (HEGI 1986, BALL & DUDLEY in TUTIN et al. 1993). Die Art kann bereits im Jahr der Keimung zum ersten Mal blühen und fruchten und erreicht ein Alter von maximal 4 – 5 Jahren (PARTZSCH et al. 2011). *A. montanum* ist insektenbestäubt. Die Chromosomenzahl der untersuchten subsp. *montanum* wird mit $2n = 16$ angegeben (JÄGER & WERNER 2005).

2.2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im östlichen Harzvorland (Sachsen-Anhalt) und erstreckt sich entlang der Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke von Hettstedt im Westen über die Saale hinweg nach Dobis



Abb. 1 Blühaspekt von *Alyssum montanum* L. auf einer Kupferschieferhalde.

Fig. 1 Flowering aspect of *Alyssum montanum* L. on a copper shale spoil heap.

und Golbitz (Abb. 2). Die Wuchsorte aller untersuchten Populationen liegen im Mitteldeutschen Trockengebiet. Die mittlere Jahresniederschlagsmenge in Hettstedt beträgt 504,1 mm, in Könnern 456,9 mm (30-jähriges Mittel 1960 – 1990, DEUTSCHER WETTERDIENST). Dies bedeutet eine Abnahme um 9,4 % zwischen Hettstedt und Könnern. Die nur für wenige Stationen vorliegenden Jahresmitteltemperaturen lassen keine Aussagen über lokalklimatische Differenzierungen des Gebietes zu. Entscheidender dürfte auf den untersuchten Standorten das von Exposition und Substrateigenschaften bedingte Mikroklima sein, das bereits von ALTEHAGE (1937) für die Saalehänge bei Rothenburg und Könnern als „Mikroklima extrem-trockenen Charakters“ beschrieben wurde.

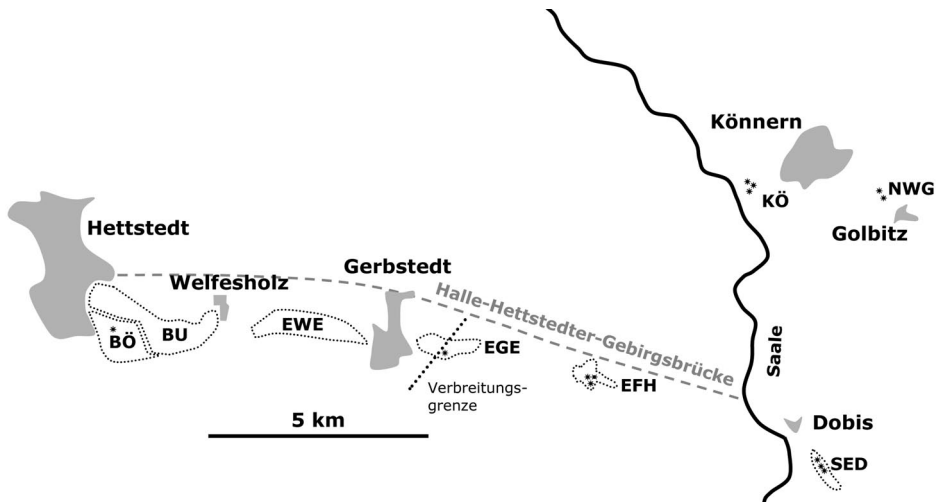


Abb. 2 Übersicht über das Untersuchungsgebiet im östlichen Harzvorland (nördliche Mansfelder Mulde und östliche Saalehöhen). Die Großbuchstaben bezeichnen die Haldengebiete des Kupferschieferbergbaus, die Sterne die Lage der untersuchten Halden. Die Verbreitungsgrenze markiert die westlichsten Vorkommen von *Alyssum montanum* und die östlichsten Vorkommen von *Minuartia verna*. Weitere Erläuterungen im Text (nach BAUMBACH 2008, verändert).

Fig. 2 Investigation area in the eastern foreland of the Harz Mountains (northern Mansfeld basin and eastern Saale hills). Bold letters: old copper shale mining areas with spoil heaps. Asterisks: locations of the studied spoil heaps. The range margin ("Verbreitungsgrenze") marks the most western populations of *Alyssum montanum* and the most eastern populations of *Minuartia verna*. For further explanations see the text (modified after BAUMBACH 2008).

2.3 Vegetationskundliche Untersuchungen

Vegetationskundlich untersucht wurden sechs ungestörte Kupferschieferhalden, auf denen jeweils ein Transekt mit vier bis sieben (insgesamt 28) Dauerbeobachtungsflächen (DBF) in verschiedenen Sukzessionsstadien eingerichtet wurde (Tab. 1, 4). Die Vegetation wurde zwischen Mai und September 2010 aufgenommen. Um das gesamte Artenspektrum zu erfassen, wurden die Flächen mindestens zweimal untersucht. Die kombinierte Abundanz-Dominanz-Schätzung erfolgte nach der modifizierten Braun-Blanquet-Skala nach DIERSCHKE (1994). Die Nomenklatur der Pflanzengesellschaften folgt SCHUBERT (2001), die der Gefäßpflanzen JÄGER & WERNER (2005) und die der Moose FRAHM & FREY (2004).

2.4 Bodenanalyse

Jeweils eine Bodenprobe wurde mit einer Schaufel an den vier Seiten der DBF ca. 10 cm tief entnommen, zu einer Mischprobe vereinigt und in PE-Tüten gefüllt. In den geöffneten PE-Tüten wurden die Boden-

proben gelagert und an der Luft getrocknet. Die pH-Messung (in CaCl₂) erfolgte nach der Vorschrift des VDLUFA (1991).

Um die totalen (Halb-)Metall-Massenkonzentrationen im Oberboden aller DBF zu untersuchen, wurde ein HF-HClO₄-Gesamtaufschluss an 100 mg der luftgetrockenen, homogenisierten Probe nach GRAWUNDER et al. (2009) durchgeführt. Die Metallverfügbarkeit wurde exemplarisch für die Bodenproben der Dauerbeobachtungsflächen der Halde KÖ1 durch die ersten beiden Schritte einer sequentiellen Extraktion nach ZEIN & BRÜMMER (1991) bestimmt. Dazu wurden die mobile Fraktion (1 m NH₄NO₃) und die leicht nachlieferbare Fraktion (1 m NH₄OAc pH 6,0) an jeweils 2 g Boden (< 2 mm Fraktion) eluiert. Die (Halb-)Metall-Massenkonzentrationen wurden mittels ICP-OES (725 OES, Varian) und ICP-MS (Series II, Thermo Fisher Scientific) bestimmt.

Tab. 1 Lage und genetische Parameter der untersuchten *Alyssum montanum*-Populationen (Pop.): süd-östlich Dobis (SED), Georgsburg bei Könnern (KÖ), nordwestlich Golbitz (NWG), östlich Friedeburgerhütte (EFH), östlich Gerbstedt (EGE), Hettstedt-Burgörmer (BÖ), Kelbra (KE), Bottendorfer Höhe (BOT). Bundesland (BL): Sachsen-Anhalt (ST), Thüringen (TH), Untersuchungsmethode (UM): populationsgenetische Untersuchung (P), Vegetationsaufnahmen (V), Habitattyp (HT): Kupferschieferhalde (CuH), Halbtrockenrasen (HTR), geschätzte Populationsgröße (N_T), Anzahl der untersuchten Pflanzen (N_P), Heterozygotie (Het.), polymorphe Loci (p. L. %), genetische Diversität mit Standardabweichung (gD ± SD); RW: Rechtswert; HW: Hochwert in GAUSS-KRÜGER Koordinaten (3° Meridianstreifen, BESSEL-Ellipsoid, Potsdam-Datum, Zentralpunkt Rauenberg). Fett gedruckt sind jeweils das Minimum und Maximum für jeden Parameter.

Tab. 1 Location and genetic parameters of the analysed *Alyssum montanum* populations: south-east of Dobis (SED), Georgsburg near Könnern (KÖ), north-west of Golbitz (NWG), east of Friedeburgerhütte (EFH), east of Gerbstedt (EGE), Hettstedt-Burgörmer (BÖ), Kelbra (KE), Bottendorf hill (BOT); federal state (BL): Saxony-Anhalt (ST), Thuringia (TH); methods of investigation (UM): population genetic analysis (P), vegetation records (V); habitat type (HT): copper shale spoil heap (CuH), semi-dry meadow (HTR); estimated population size (N_T), number of analysed plants (N_P), heterozygosity (Het.), polymorphic loci (p. L. %), gene diversity with standard deviation (gD ± SD); RW: easting, HW: northing in GAUSS-KRÜGER coordinates (3° wide strips, BESSEL ellipsoid, Potsdam datum, Rauenberg central point). Minimum and maximum value for each parameter is in bold letters.

Pop.	BL	UM	RW	HW	m NN	HT	N _i	N _p	Het. [%]	p. L. [%]	gD	±SD
SED8	ST	P+V	⁴⁴ 84480	⁵⁷ 19015	99	CuH	600	11	17,7	58,0	0,226	±0,12
SED10	ST	P	⁴⁴ 84535	⁵⁷ 18943	98	CuH	800	11	19,0	61,4	0,224	±0,12
SED12	ST	P+V	⁴⁴ 84548	⁵⁷ 18855	95	CuH	2200	11	21,5	66,2	0,242	±0,13
KÖ1	ST	P+V	⁴⁴ 82803	⁵⁷ 25742	85	CuH	3000	9	22,7	65,2	0,280	±0,15
KÖ2	ST	P	⁴⁴ 82750	⁵⁷ 25920	92	CuH	1200	11	20,3	63,8	0,252	±0,13
KÖ3	ST	P	⁴⁴ 82973	⁵⁷ 25781	100	HTR	250	11	20,8	65,7	0,249	±0,13
NWG1	ST	P	⁴⁴ 85942	⁵⁷ 25657	99	CuH	1200	10	17,1	51,2	0,191	±0,10
NWG2	ST	P	⁴⁴ 85976	⁵⁷ 20959	101	CuH	1500	8	15,4	45,4	0,191	±0,11
EFH20	ST	P	⁴⁴ 79022	⁵⁷ 21187	141	CuH	2300	10	18,2	54,1	0,208	±0,11
EFH32	ST	P+V	⁴⁴ 78898	⁵⁷ 21083	135	CuH	500	10	18,7	58,9	0,229	±0,12
EFH33	ST	P	⁴⁴ 78948	⁵⁷ 20959	136	CuH	1000	10	20,3	60,9	0,236	±0,13
EGE209	ST	V	⁴⁴ 75452	⁵⁷ 21739	149	CuH	-	-	-	-	-	-
BÖ9	ST	V	⁴⁴ 67417	⁵⁷ 22324	205	CuH	-	-	-	-	-	-
KE1	TH	P	⁴⁴ 28905	⁵⁶ 99163	139	Gips	300	10	17,5	59,9	0,218	±0,12
BOT1	TH	P	⁴⁴ 59021	⁵⁶ 86462	186	CuH	300	10	18,2	57,0	0,212	±0,11
BOT2	TH	P	⁴⁴ 58703	⁵⁶ 86714	192	HTR	900	11	17,4	53,6	0,205	±0,11

2.5 Molekulare Analyse

Die populationsgenetische Untersuchung erfolgte durch eine AFLP-Analyse (amplified fragment length polymorphism, Vos et al. 1995), die zu den DNA-fingerprint-Methoden gehört.

Untersucht wurden im Gebiet elf Populationen, davon zehn auf Haldenstandorten und eine im Halbtrockenrasen (Tab. 1, Abb. 2) sowie zum Vergleich drei Populationen in Nordthüringen:

KE1: Schlossberg bei Kelbra (Nordwestrand des Kyffhäusergebirges): Gips

BOT: Bottendorfer Höhe an der Unstrut: Kupferschiefer (BOT1), Zechsteinkalk und Stinkschiefer (BOT2).

In den 14 Populationen wurde jeweils Blattmaterial von 8 – 11 Individuen entnommen (Tab. 1), wobei die Individuen einer Halde als Population angesehen wurden.

Das Pflanzenmaterial wurde zufällig verteilt über die gesamte Population entnommen, über Silicagel getrocknet und anschließend bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert. 50 mg des getrockneten Pflanzenmaterials wurde in 1,5 ml Mikroreaktionsgefäßen mit je 4 Glaskugeln (Durchmesser = 3 mm) 5 min bei 30 Hz in einer Laborschwingmühle (Typ MM 200, Retsch) zerkleinert. Die genomische DNA wurde mit dem QUIAGEN plasmid mini kit nach dem Protokoll von HELLOWIG et al. (1999) extrahiert, mittels Agarosegel-Elektrophorese qualitativ geprüft und bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufbewahrt. Die DNA-Konzentration wurde mit einem Spektralphotometer (Gene Quant II, Pharmacia Biotech) bei 260 nm bestimmt.

Die AFLP-Analyse folgt dem Protokoll von BAUMBACH & HELLOWIG (2007). Für die Analyse wurden drei Primerkombinationen verwendet: I) *EcoRI-AGG/MseI-CTG* (81 Loci, 76 – 654 bp), II) *EcoRI-ACG/MseI-CCA* (42 Loci, 98 – 707 bp) und III) *EcoRI-AGG/MseI-CCA* (84 Loci, 82 – 768 bp). Somit konnten in einem Fragmentgrößenbereich von 76 – 768 bp insgesamt 207 Loci ausgewertet werden, die es ermöglichen, alle 143 Pflanzen als separate AFLP-Phänotypen zu charakterisieren.

Die Überführung der Bandenmuster in einen binären Code (0/1-Matrix) erfolgte mit dem Programm Saga Generation 2 (LI-COR INC., 2001).

Die Auswertung auf Individuenebene erfolgte durch eine Hauptkoordinatenanalyse (NTSYSpc Ver. 2.1, APPLIED BIostatistics Inc. 2002). Auf Populationsebene erfolgte die Auswertung mittels UPGMA-Clusteranalyse (TFPGA, MILLER 1997), Structure-Analyse (Structure 2.2, PRITCHARD et al. 2000, FALUSH et al. 2007) und Analyse der molekularen Varianz (AMOVA, Arlequin ver. 3.5, EXCOFFIER & LISCHER 2010). Das Programm Structure wurde verwendet, um die Anzahl von genetischen Clustern (K) im vorliegenden Datensatz zu testen und um die untersuchten Individuen diesen Clustern zuzuordnen. Dazu wird dem Programm ein Wertebereich für K vorgegeben und getestet, welches K die höchste geschätzte log-Wahrscheinlichkeit (log-probability) der Daten ergibt. Für jedes mögliche K von 2 bis 14 wurden fünf unabhängige Durchläufe mit jeweils 100 000 Wiederholungen (50 000 burn ins, 50 000 data collection repetitions) berechnet. Alle Iterationen wurden unter der Annahme gemischter Abstammung der Individuen (admixture model) sowie korrelierter Allelfrequenzen berechnet. Die graphische Darstellung der Structure-Analyse erfolgte mit der Software Distruct (ROSENBERG 2004).

Mittels der AMOVA wurden – aufbauend auf den Ergebnissen der Structure-Analyse und der Hauptkoordinatenanalyse – 15 verschiedene Thesen zur Verteilung der genetischen Variation im Gesamtdatensatz getestet, in denen die Populationen zu verschiedenen geographischen und edaphischen Gruppen zusammengefasst wurden. Zur Abschätzung des Geflusses ($N_{em} = 1/4(1/\Phi_{ST}-1)$) in regionalen Populationsgruppen wurden Teildatensätze ohne definierte Gruppenstruktur mit der AMOVA getestet (Tab. 7).

Die Distanzmatrix für die Hauptkoordinatenanalyse und die Clusteranalyse basiert auf den genetischen Distanzen nach NEI (1972) (Annahme des HWG), für die AMOVA auf den quadrierten euklidischen Distanzen. Korrelationen zwischen intervallskalierten Daten wurden nach PEARSON (r_p), Korrelationen zwischen Matrizen nach MANTEL (1967) berechnet.

Da die AFLP-Methode dominante Marker erzeugt, können der homozygot-dominante und der heterozygote Merkmalszustand visuell nicht unterschieden werden, sondern müssen durch eine allelische Interpretation des Datensatzes unter Annahme des Hardy-Weinberg-Gleichgewichtes (HWG) berechnet werden. Als Parameter der genetischen Variabilität wurden Heterozygotiegrad (unter HWG-Annahme), Anteil polymorpher Loci (direkte Zählung) und genetische Diversität (basierend auf den quadrierten euklidischen Distanzen, Arlequin) berechnet. Da die Heterozygotie und der Anteil polymorpher Loci stark positiv korreliert sind ($r_p = 0,90$, $p < 0,01$), ebenso Heterozygotie und genetische Diversität ($r_p = 0,93$, $p < 0,01$) sowie Anteil polymorpher Loci und genetische Diversität ($r_p = 0,89$, $p < 0,01$), kann davon ausgegangen werden, dass die Annahme des HWG zur allelischen Interpretation des Datensatzes im vorliegenden Fall keine unzulässige Annahme darstellt.

3 Ergebnisse

3.1 Bodeneigenschaften der Haldenstandorte

Die pH-Werte aller DBF liegen im neutralen bis leicht alkalischen Bereich (Tab. 2). Der höchste Wert wurde auf BÖ9.5, der niedrigste auf EGE209.2 gefunden. PH-Werte unter 7 wurden auf den Flächen EFH32.3 und BÖ9.3, die eine schon fortgeschrittene Humifizierung des Bodens zeigen, sowie auf allen Flächen der Halde EGE festgestellt. Auf allen Untersuchungsflächen mit Vorkommen von *Alyssum montanum* liegen die pH-Werte über 7,0. *Minuartia verna* findet sich auf Flächen mit einem pH-Wert von 6,5 bis 7,5. In beiden Fällen ist kein Zusammenhang von pH-Wert und Deckungsgrad zu erkennen.

Die Gehalte der Bodenproben an Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Co, As, Ni und Mn schwanken beim Vergleich der Dauerbeobachtungsflächen einer Halde stark (Tab. 2). Mit Ausnahme von Mn, dessen Massenanteile meist denen normal versorgter Böden entsprechen, liegen die Metallgehalte aller Proben deutlich über denen normal versorgter Böden (vgl. ERNST 1974, BLUME et al. 2010). So sind die Werte von Cd, Cu, Pb und Zn um das 10- bis über 100-fache erhöht. Die höchsten Pb-Konzentrationen treten auf den Halden bei Dobis und einigen Flächen bei Friedeburgerhütte auf. Die relativ niedrigen Metall- und Halbmetallgehalte der Fläche EFH32.3 sind durch die fortgeschrittene Sukzession und Pedogenese zu erklären.

Tab. 2 pH-Werte (CaCl₂) und Gesamtgehalte [mg/kg TS] an Cu, Zn, Pb, Mn, Ni, Co, Cr und Cd im Oberboden (0 – 10 cm) der untersuchten Dauerbeobachtungsflächen auf Kupferschieferhalden. NB: Vergleichswerte von Normalböden (*ERNST 1974). Methoden: ICP-OES (Cu, Zn, Mn) oder ICP-MS (Ni, Co, Cr, Cd) nach HF-HClO₄-Gesamtaufschluss. Fett gedruckt ist jeweils der Maximalwert einer Halde, unterstrichen der Maximalwert aller Proben.

Tab. 2 pH-values (CaCl₂) and contents (mg/kg dry weight) of Cu, Zn, Pb, Mn, Ni, Co, Cr, and Cd in upper soil samples of the investigated relevés (DBF) on copper shale heaps. Methods: HF-HClO₄-pulping, ICP-OES (Cu, Zn, Mn) or ICP-MS (Ni, Co, Cr, Cd). NB: references of normal soils according to *ERNST (1974). The maximum value of one heap is in bold letters, the total maximum is underlined.

Halde	DBF	pH	Cu	Zn	Pb	Mn	Ni	Co	Cr	Cd
BÖ9	BÖ9.1	7,32	14894	9187	2173	980	161	200	107	31
	BÖ9.2	7,16	6999	17644	7085	1116	135	84	105	65
	BÖ9.3	6,84	3030	18693	9439	1284	145	34	123	74
	BÖ9.4	7,13	3319	18816	9721	1449	161	44	127	72
	BÖ9.5	7,53	15314	12785	5667	1472	203	149	134	42
EGE209	EGE209.1	6,75	2222	15742	7090	1458	121	63	124	54
	EGE209.2	6,52	2370	11999	6100	1340	101	60	108	48
	EGE209.3	6,74	1945	10859	5453	1434	93	41	104	37
EFH32	EFH32.1	7,12	6359	11798	10742	2191	110	95	98	25
	EFH32.2	7,04	5378	10195	11208	1997	98	83	47	23
	EFH32.3	6,92	1874	5265	4179	1363	45	31	22	19
	EFH32.4	7,16	8647	14103	15578	1780	138	120	65	26
	EFH32.5	7,05	7484	15479	9091	2004	132	151	35	51
KÖ1	KÖ1.1	7,10	5395	6180	7109	1692	94	39	96	30
	KÖ1.2	7,07	6820	6873	7623	1875	93	40	93	29
	KÖ1.3	7,05	5536	6701	7844	1813	98	48	98	32
	KÖ1.4	7,09	6391	7002	7890	1724	96	58	94	29
	KÖ1.5	7,18	6215	5901	8121	1881	95	51	97	31
	KÖ1.6	7,19	7636	6530	8104	1790	93	50	94	31
	KÖ1.7	7,28	7181	6595	8730	1723	97	46	98	31
SED8	SED8.1	7,15	4170	18591	21931	2008	137	46	116	78
	SED8.2	7,09	2665	16758	18976	2039	124	41	110	74
	SED8.3	7,27	4268	14166	23138	2301	126	59	114	50
	SED8.4	7,17	2613	12915	17906	2039	111	38	49	67
SED12	SED12.1	7,20	3649	12854	20759	2050	122	49	41	65
	SED12.2	7,20	2458	10895	15369	1758	97	37	33	51
	SED12.3	7,25	5196	12669	27906	2285	126	65	43	44
	SED12.4	7,31	3228	5699	27724	2537	118	58	33	24
NB			22*	167*	104*	1800*	39*	16*	19*	2*

Die untersuchten Halden, auf denen nur *A. montanum* vorkommt (SED8, SED12, EFH32), weisen deutlich höhere Blei-gehalte auf als die Flächen mit *M. verna*-Vorkommen. In Könnern, wo beide Arten gemeinsam vorkommen, sind die Bleiwerte durchweg geringer als auf den Halden, die nur *A. montanum*-Vorkommen zeigen. Andere Metalle zeigen kein Muster erhöhter Gehalte, welches einen Zusammenhang mit der Verbreitung der beiden Arten haben könnte.

Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion zeigen, dass nur ein Bruchteil des im Substrat vorhandenen Gesamtmetallgehaltes bioverfügbar ist (s. Tab. 3). Die Bioverfügbarkeit der mobilen Fraktion im Haldenrohboden kann wie folgt klassifiziert werden: Cr < Pb < Ni ≤ Co < Mn ≤ Zn < Cu < Cd. Etwas anders sind die Verhältnisse in der leicht nachlieferbaren Fraktion: Cr < Ni < Co < Mn < Zn ≤ Cu < Pb < Cd (Tab. 3). Am besten bioverfügbar ist Cadmium, am schlechtesten Chrom. Flächen mit fortgeschrittener Pedogenese und Sukzession zeigen eine geringere Bioverfügbarkeit von Cu, Zn, Pb, Ni und Cd, aber eine höhere Bioverfügbarkeit von Mn und Co. Cr ist generell schlecht verfügbar.

Tab. 3 Ergebnisse der sequentiellen Extraktion nach ZEIEN & BRÜMMER (1991) von Oberbodenproben der vier Dauerbeobachtungsflächen am Südhang der Halde KÖ1. I: mobile Fraktion (NH₄NO₃), II: leicht nachlieferbare Fraktion (NH₄OAc), jeweils angegeben in Prozent der Gesamtgehalte (vgl. Tab. 2). Analytik: ICP-OES (Cu, Zn, Pb, Mn) bzw. ICP-MS (Ni, Co, Cr). HF: Haldenfuß, UH: Unterhang, MH: Mittelhang, OH: Oberhang, DG: Deckungsgrad der Vegetation.

Tab. 3 Results of the sequential extraction according to ZEIEN & BRÜMMER (1991) of upper soil samples of the four relevés at the spoil heap KÖ1 (south-slope). I: mobile fraction (NH₄NO₃), II: specifically adsorbed fraction (NH₄OAc), in percent of total contents (compare table 2). Methods: ICP-OES (Cu, Zn, Pb, Mn), ICP-MS (Ni, Co, Cr). HF: foot of the heap, UH: lower slope, MH: middle slope, OH: upper slope, DG: vegetation cover.

%	DG	[%]	Cu		Zn		Pb		Mn		Ni		Co		Cr		Cd	
			I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
KÖ1.1	HF	90	3,4	10,4	1,6	14,2	0,4	23,5	4,3	16,6	0,7	2,8	2,6	11,5	0	0,1	8,1	43,5
KÖ1.2	UH	65	5,3	15,1	1,9	13,5	0,4	25,1	2,4	13,7	1,0	3,0	2,4	9,7	0,1	0,1	10,7	42,0
KÖ1.3	MH	50	8,4	21,7	2,2	16,9	0,5	26,4	1,9	14,5	1,1	3,2	1,8	8,9	0	0,1	10,2	41,5
KÖ1.4	OH	40	8,2	21,8	2,5	20,6	0,5	27,3	2,2	15,3	1,3	4,0	1,5	7,9	0	0,1	11,6	44,3

3.2 Vegetation der Haldenstandorte

Alle untersuchten Halden zeigen relativ große Flächen, die in frühen Sukzessionsstadien verharren (oder sich sehr langsam entwickeln). Diese offenen oder lückig bewachsenen Haldenbereiche werden vorzugsweise von *A. montanum* besiedelt. In der differenzierten Vegetationstabelle (Tab. 4) zeigen sich zwei Artenblöcke. Hauptsächlich unterscheiden sich die Flächen des *Minuartia*-Stadiums s. l. durch das Vorkommen von *Minuartia verna* und *A. montanum*. Da *Euphrasia*-Arten auf keiner der untersuchten Halden gefunden wurden, konnte kein *Euphrasia*-Stadium differenziert werden. Das Stadium von *M. verna* wurde daraufhin in ein frühes und ein spätes geteilt. Im frühen Stadium zeigen sich nur *M. verna* und/oder *A. montanum* und in geringer Deckung *Echium vulgare*. Im späten Stadium kommen dann *Rumex acetosa*, *Festuca rupicola* sowie als Trennarten *Scabiosa ochroleuca*, *Euphorbia cyparissias*, *Pimpinella saxifraga* und *Armeria maritima* dazu. Die Gesamtdeckung ist in diesem Stadium jedoch immer noch gering und übersteigt 75 % nicht. *S. ochroleuca* und *E. cyparissias* haben ihre Verbreitung hauptsächlich in der Armerietum halleri-Variante von *A. montanum*, während *A. maritima* und *P. saxifraga* eine hohe Stetigkeit in den Aufnahmeflächen des Armerietum halleri mit *M. verna*-Vorkommen haben.

Gemeinsam kommen *A. montanum* und *M. verna* und die o. g. Trennarten nur auf den Untersuchungsflächen der Halde KÖ1 vor. Dort erreicht *M. verna* jedoch auf der Südseite der Halde nur den Unterhangbereich, der eine stärkere Gesamtdeckung und einen höheren Feinerde- und Humusanteil aufweist. Hangaufwärts nimmt die Deckung von *M. verna* schnell ab. In den oberen Hangbereichen mit geringerer Gesamtdeckung, einem noch ausgeprägten Rohbodenprofil und guter Metallverfügbarkeit (Tab. 4) sind nur noch *A. montanum*, *Holosteum umbellatum*, *E. vulgare*, *Silene vulgaris* und *R. acetosa* vertreten.

Das Auftreten von *Dianthus carthusianorum* und *Asperula cynanchica* auf der Fläche KÖ1.1 zeigt die starke Beeinflussung durch den umgebenden kontinentalen Schwingel-Trockenrasen an.

Die Fläche EFH32.3 hat aufgrund fortgeschrittener Pedogenese und einer starken Beeinflussung durch die angrenzende Wirtschaftswiese ein für Schwermetallstandorte untypisches Artenspektrum und wurde deshalb aus der Tabelle entfernt.

3.3 Populationsgenetische Differenzierung von *Alyssum montanum*

I) Genetische Struktur

Die Hauptkoordinatenanalyse zeigt eine Differenzierung der thüringischen von den sachsen-anhaltinischen Populationen (Abb. 3A) sowie eine deutliche Auftrennung derselben in drei geographische Populationsgruppen (Abb. 3B): Friedeburgerhütte (EFH), Dobis (SED) sowie Könnern und Golbitz (KÖ und NWG). Die thüringischen Populationen lassen keine klare Separierung erkennen.

Die UPGMA-Clusteranalyse auf Basis der genetischen Distanzen (NEI 1972) zeigt eine Clusterbildung, die recht gut der geographischen Verteilung der Populationsgruppen entspricht (Abb. 4). Die genetischen Distanzen zwischen allen Populationen sind gering ($< 0,2$) und mit den geographischen Distanzen schwach positiv korreliert ($r = 0,53$, $p < 0,001$; zweiseitig).

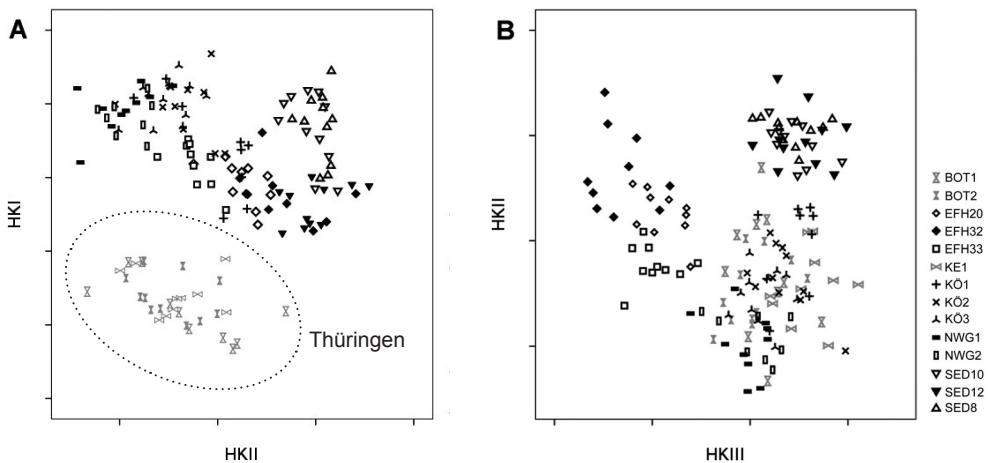


Abb. 3 Hauptkoordinatenanalyse aller *Alyssum montanum*-Phänotypen. A: HKI und HKII, B: HKII und HKIII. Geographisch nah beieinander liegende Populationen haben ähnliche Symbole. Die Eigenwerte der drei Hauptkoordinaten erklären 53 % der Gesamtvariation des Datensatzes (HKI: 28 %, HKII: 14 %, HKIII: 11 %).

Fig. 3 Principal coordinates analysis of all *Alyssum montanum* individuals. A: PCOI and PCOII, B: PCOII and PCOIII. Closely located populations are labeled with similar symbols. Variation explained by the principal coordinates: 53 % (PCOI: 28 %, PCOII: 14 %, PCOIII: 11 %).

Die Structure-Analyse (Abb. 5) ergibt die höchste Wahrscheinlichkeit für eine Clusteranzahl von $K = 7$. Auch hier bilden die thüringischen Populationen eine Gruppe mit nur geringen Anteilen der sachsen-anhaltinischen Populationen. Es ist zu erkennen, dass sich die Dobiser Populationen in zwei Gruppen (SED8 + SED10 vs. SED12) teilen. Die Populationen bei Könnern und Golbitz bilden eine relativ einheitliche Gruppe mit hoher Ähnlichkeit. Auffällig ist der große Anteil von SED12 in der Population KÖ1. Die EFH-Populationen sind deutlich voneinander differenziert. Trotz der geographischen Nähe sind die Elemente der Populationen aus unmittelbarer Nähe nicht viel stärker vertreten als Elemente der übrigen Populationen.

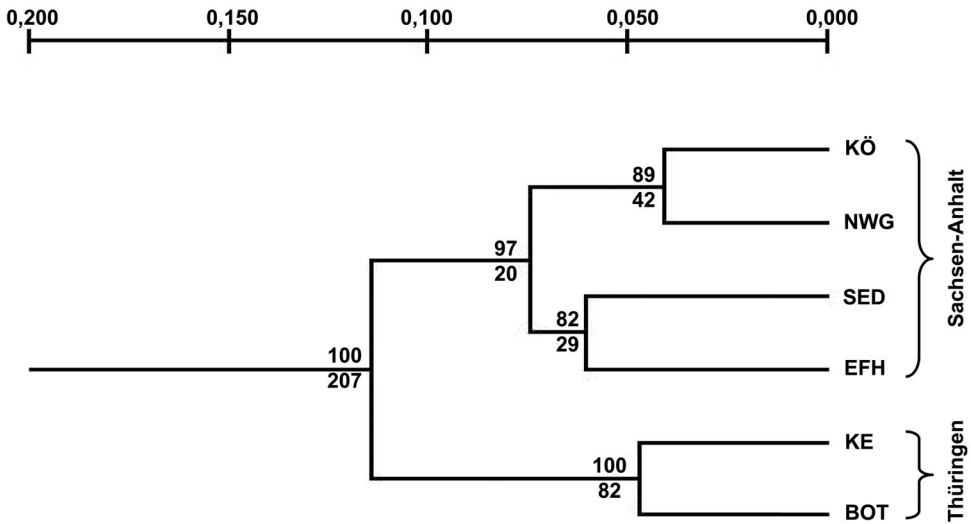


Abb. 4 UPGMA-Clusteranalyse auf Grundlage der genetischen Distanzen nach NEI (1972) zwischen den Populationsgruppen. Über den Ästen sind die Bootstrap-Werte (3000 Replikationen) angegeben, darunter die Zahl der den Knoten unterstützenden Loci.

Fig. 4 Dendrogram resulting from an UPGMA cluster analysis based on NEI's (1972) genetic distances between population groups. Bootstrap values (3000 replications, computed with TFPGA) are given above, number of loci supporting nodes below the branches.

Tab. 5 Darstellung der Gruppenstrukturen der mit der AMOVA getesteten Thesen. Die Gruppenzugehörigkeit der Populationen ist durch die Gruppennummer und gleiche Graustufen gekennzeichnet.

Tab. 5 Group structures of the tested AMOVA hypotheses. Populations of one group have equal numbers and greyscale.

	Sachsen-Anhalt										Thüringen			
	SED			KÖ			NWG		EFH			KE	BOT	
These	SED8	SED10	SED12	KÖ1	KÖ2	KÖ3	NWG1	NWG2	EFH33	EFH32	EFH20	KE1	BOT1	BOT2
I	1					2	1					2	1	2
II	1		2	3			4		5	6		7	8	
III	1		2	3			4		5	6	7	8	9	

Auch die AMOVA zeigt eine Verteilung der genetischen Variation, die die geographische Struktur regionaler Populationsgruppen widerspiegelt. Von den 15 getesteten Thesen sind hier nur die beiden Thesen mit den höchsten Variationsanteilen zwischen geographischen Gruppen (Tab. 5: These II und III) sowie die edaphische Gruppierung (Tab. 5: These I) dargestellt. Die beiden geographischen Gruppeneinteilungen sind signifikant, die edaphische Einteilung (Metall- vs. Normalpopulationen) wird hingegen nicht unterstützt (Tab. 6). Der höchste Wert für die Variation zwischen den neun geographischen Gruppen wird bei These III erreicht, die sich von These II nur dadurch unterscheidet, dass nun alle drei EFH-Populationen

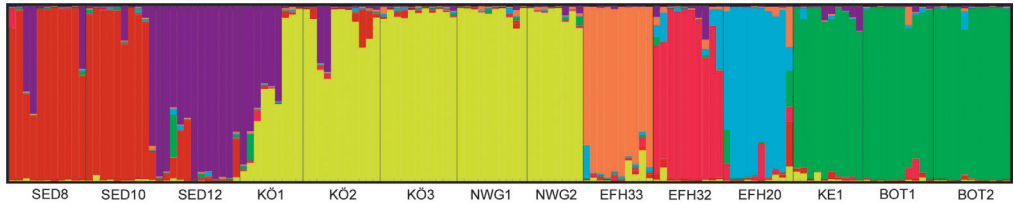


Abb. 5 Blockdiagramm der Structure-Analyse für K = 7. Jedes Individuum wird durch einen Balken repräsentiert. Die Abkürzungen der Populationen entsprechen denen in Tab. 1.

Fig. 5 Barplot of structure analysis for K = 7. Every single individual is represented by a bar. For abbreviations of populations see table 1.

als separate Gruppen betrachtet wurden (Tab. 6). Unabhängig von der hierarchischen Struktur ist die genetische Variation innerhalb der Populationen generell höher als zwischen den Populationen einer Gruppe (69 vs. 31 %). Der Genfluss ($N_e m$) nimmt innerhalb der Populationsgruppen in folgender Reihenfolge ab: NWG > KÖ > TH > EFH > SED (Tab. 7).

Tab. 6 AMOVA-Ergebnisse für den Gesamtdatensatz. Varianzkomponenten (VK): zwischen den Populationsgruppen (zw. Gr.), zwischen den Populationen innerhalb der Gruppen (zw. Pop.) und innerhalb der Populationen (in Pop.) und Fixierungsindizes (Φ_{CT} , Φ_{SC} , Φ_{ST}). Signifikanzniveau (1023 Permutationen): ***p < 0,001. Für die Nummern der getesteten Thesen vgl. Tab. 5.

Tab. 6 Results of AMOVA computation for the complete dataset. Levels of variation (VK): among groups of populations (zw. Gr.), among populations within groups (zw. Pop.), within populations (in Pop.), and fixation indices (Φ_{CT} , Φ_{SC} , Φ_{ST}). Level of significance (based on 1023 iteration steps): ***p < 0.001. For numbers of the tested hypotheses see table 5.

VK These	Zw. Gr. [%]	Zw. Pop. [%]	In Pop. [%]	Φ_{CT}	Φ_{SC}	Φ_{ST}
I	1,2	30,3	68,5	0,012	0,307***	0,315***
II	23,1	9,1	67,8	0,231***	0,119***	0,322***
III	24,0	8,1	67,9	0,240***	0,107***	0,321***

Tab. 7 AMOVA-Ergebnisse für Teildatensätze geographischer Populationsgruppen: Variation zwischen (Var. zw. Pop.) und innerhalb (Var. in Pop.) der Populationen, Fixierungsindex (Φ_{ST}) und Genfluss ($N_e m$). Alle Werte sind auf dem Niveau von p < 0,001 (1023 Permutationen) signifikant.

Tab. 7 Results of AMOVA computation for partial datasets of geographical groups of populations. Levels of variation: among (Var. zw. Pop.) and within populations (Var. in Pop.), and fixation index (Φ_{ST}). Level of significance for all values (based on 1023 iteration steps): p < 0.001.

Pop.-Gruppe	Alle	TH	ST	SED	EFH	KÖ	NWG
Anzahl Pop.	14	3	11	3	3	3	2
Var. zw. Pop. [%]	31,0	15,7	27,4	22,3	20,9	9,8	8,6
Var. in Pop. [%]	69,0	84,3	72,6	77,7	79,1	90,2	97,4
Φ_{ST}	0,310	0,150	0,274	0,223	0,209	0,098	0,087
$N_e m$	0,56	1,34	0,66	0,87	0,95	2,30	2,64

II) Genetische Variabilität der Populationen

Die größte genetische Variabilität (Heterozygotie, Anteil polymorpher Loci, genetische Diversität, Tab. 1) findet sich in den Populationen SED3 und KÖ1, die niedrigste in Golbitz (NWG1 und 2). Populationsgröße und genetische Variabilität sind nicht korreliert, d. h. große Populationen sind genetisch nicht variabler als kleine.

4 Diskussion

Mit der Untersuchung der Vergesellschaftung und der Populationsstrukturen sollte die Verbreitung von *Alyssum montanum* auf den Halden des Kupferschieferbergbaus im östlichen Harzvorland unter Berücksichtigung edaphischer und klimatischer Faktoren erklärt werden.

Alle vegetationskundlich untersuchten Flächen auf den Kupferschieferhalden haben als Klassencharakterart der *Violetea calaminariae* nur *Silene vulgaris* gemeinsam. Die Klassencharakterart *Minuartia verna* fehlt auf den Halden bei Dobis, Golbitz und Friedeburgerhütte völlig. In den frühen Sukzessionsstadien fehlt zudem die Verbandscharakterart *Armeria maritima*, die auch in den fortgeschrittenen Stadien am Rand der Halden nur relativ selten vorkommt. Das Fehlen von *M. verna* ist ein starkes Argument für die Eigenständigkeit einer Variante des Armerietum halleri, welche durch das Auftreten von *A. montanum* gekennzeichnet ist. Auch die Halden östlich von Friedeburgerhütte müssen somit dieser Variante zugerechnet werden, da sich auch hier *A. montanum*, nicht aber *M. verna* findet. Einen Übergang des Armerietum halleri zur Variante von *A. montanum* stellt die Halde in Könnern dar.

Die in der Vegetationstabelle erarbeiteten Differentialarten zeigen bei Betrachtung der Zonalität der Arten ein Muster. *A. montanum*, *Euphorbia cyparissias* und *Scabiosa ochroleuca* sind meridional-temperate Florenelemente. *A. maritima* stellt ein temperates, *Pimpinella saxifraga* ein meridional-boreales und *M. verna* ein meridional-arktisches Florenelement dar (JÄGER & WERNER 2005). In dieser Zonalität kommt eine Anreicherung thermophiler Arten in der Variante von *A. montanum* zum Ausdruck. Die Zonalitäten der Differentialarten, die zusammen mit *M. verna* vorkommen, deuten eher auf eine Anpassung an etwas kühlere oder zeitweise kühlere Klimate hin (was der alpinen Verbreitung von *M. verna* entspricht). Diese Verbreitung der Differentialarten läuft dem Temperatur- und Niederschlagsgradienten im Gebiet parallel, der von Hettstedt zur östlichen Saaleseite hin weniger Niederschläge und zunehmende Temperaturen zeigt. Das gemeinsame Vorkommen von *A. montanum* und *M. verna* auf der Halde in Könnern (KÖ1) zeichnet den Gradienten im Untersuchungsgebiet im Kleinen nach. Die südexponierten Rohböden werden vor allem von *A. montanum* besiedelt, von *M. verna* jedoch gemieden. Am flachen Unterhang der SE-Seite der Halde sind beide Arten zu finden, *M. verna* sogar mit hoher Deckung. Aufgrund der geringeren Inklination, der fortgeschrittenen Pedogenese (Feinerdeansammlung, Humifizierung) und der höheren Gesamtdeckung sind hier Temperatur-, Wasser-, aber auch Metallstress geringer. An der geschützten NW-Seite steigen beide Arten bis in den Mittelhangbereich auf. Diese Verteilung der Arten spricht für eine - zumindest auf den Haldenstandorten - stärkere Resistenz von *A. montanum* gegenüber Temperatur- und Trockenstress als von *M. verna*.

Die Eigenständigkeit des Armerietum halleri auf der östlichen Saaleseite wird sowohl von SCHUBERT (1953/54) als auch von ERNST (1974) betont. Beide gehen jedoch nicht auf das Fehlen von *M. verna*, der „absoluten Klassencharakterart der *Violetea calaminariae*“ (ERNST 1974) ein. *Festuca duvalii*, die von ERNST (1974) als Differentialart der Variante von *A. montanum* angegeben wird, konnte auf keiner der Flächen bei Dobis und Könnern nachgewiesen werden. Eine frühere Angabe von *F. duvalii* für die Saalehänge findet sich bereits bei ALTEHAGE (1937). In Anbetracht der Gesamtverbreitung der Art dürfte es sich in beiden Fällen um eine Fehlbestimmung handeln. Auf allen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Flächen tritt *Festuca rupicola* HEUFF als einziger Vertreter der Gattung *Festuca* auf. Eine weitere Art, die ERNST (1974) der Variante von *A. montanum* zuschreibt, ist *Erysimum crepidifolium* RCHB. Diese findet sich sowohl bei Könnern als auch bei Dobis zerstreut in Trocken- und Halbtrockenrasen. Auf den

untersuchten Halden östlich der Saale ist *E. crepidifolium* höchstens im Randbereich (nicht aber auf den Dauerbeobachtungsflächen) zu finden und deutet auf die Beeinflussung durch die benachbarten Pflanzengesellschaften hin. Westlich der Saale fehlt die Art auf den Halden völlig.

Ein Zusammenhang zwischen dem pH-Wert und dem Gradienten im Vorkommen von *M. verna* und *A. montanum* ist in den Daten nicht erkennbar. Aufgrund der sehr heterogenen Metallgehalte des Substrates (Tab. 2) können die Halden kaum als edaphisch einheitlicher Lebensraum betrachtet werden, was methodische Schwierigkeiten bei der Festlegung von Dauerbeobachtungsflächen und der Bewertung von Sukzessionsstadien mit sich bringt. Von allen Metallen zeigt nur Pb ein Muster erhöhter Gehalte, das in Zusammenhang mit der Verbreitung von *A. montanum* und *M. verna* stehen könnte. Die Halden, auf denen nur *A. montanum* vorkommt (SED8, SED12, EFH32), weisen deutlich höhere Pb-Gehalte auf als die Flächen mit *M. verna*-Vorkommen. Somit könnten die erhöhten Pb-Gehalte eine Etablierung von *M. verna* auf den Halden EFH32, SED8 und SED12 unterbunden haben. In Könnern, wo beide Arten gemeinsam vorkommen, sind die Bleiwerte durchweg geringer als auf den Halden, die nur *A. montanum*-Vorkommen zeigen.

Alyssum montanum ist von bleihaltigen Standorten in Griechenland bekannt (OUZOUNIDOU 1995, 1994). Allerdings wurde auch *M. verna* mehrfach von stark Pb-haltigen Standorten beschrieben, so aus dem Raum Bleiberg in Kärnten (SIEGHARDT 1986) und aus Grassington Moor, Yorkshire, England (BARRY & CLARK 1978). Dennoch kann der Bleigehalt als Grund für das Fehlen von *M. verna* auf den Halden SED und EFH nicht ausgeschlossen werden. Die *M. verna*-Populationen in Mitteleuropa zeigen eine starke regionale und lokale genetische Differenzierung (BAUMBACH 2005), die sich auch in einer physiologischen Differenzierung und damit in unterschiedlichen Bleitoleranzen widerspiegeln könnte. Die Abgabe von Metallsalzen erfolgt bei *M. verna* über Hydathoden und ist stark abhängig von Feuchtigkeit und Temperatur (NEUMANN et al. 1997). Die genannten Studien untersuchten *M. verna* in Gebieten, die, verglichen mit dem Mitteldeutschen Trockengebiet, ein sehr feuchtes Klima haben. Grassington Moor (BARRY & CLARK 1978) hat einen Jahresniederschlag von 609 mm (Jahresmitteltemperatur 9 °C), der Raum Bleiberg (SIEGHARDT 1986) einen Jahresniederschlag von 901 mm (Jahresmitteltemperatur 7,7 °C) (alle Klimadaten aus MÜHR 2010). Ein Zusammenwirken der Faktoren Metallgehalt des Substrates und Klima, das auf den Halden EFH und SED eine Etablierung der Art verhindert, ist somit durchaus denkbar.

Wie für eine ausdauernde, nicht-obligat auskreuzende Art zu erwarten, ist die genetische Variation innerhalb der *A. montanum*-Populationen deutlich größer als zwischen ihnen (69 vs. 31 %). Der mittlere, aus der AMOVA abgeleitete Φ_{ST} -Wert (0,31 für alle Populationen, 0,27 für die sachsen-anhaltinischen) ist leicht höher als der mittlere, aus RAPD-Daten (NYBOM & BARTISH 2000) abgeleitete Φ_{ST} -Wert von 0,28 für auskreuzende Arten (N = 46), aber deutlich geringer als die Φ_{ST} -Werte von 0,39 für kurzlebige ausdauernde Arten (N = 32), 0,43 für Arten mit einer regionalen Verbreitung (N = 27) und 0,45 für Arten früher Sukzessionsstadien (N = 20).

Der hypothetische Genfluss zwischen allen Populationen ist mit $N_e m = 0,56$ deutlich < 1 , dem kritischen Wert für genetische Differenzierung durch Drift (WRIGHT 1978). Wie die vergleichsweise hohe genetische Variabilität der Populationen (s. u.) zeigt, reicht dieser Genfluss offenbar aus, um mögliche Effekte genetischer Drift zu kompensieren. Etwa gleich groß ist der Genfluss zwischen Haldenpopulationen des östlichen Harzvorlandes von *Armeria maritima* s. l. ($N_e m = 0,53$; N = 6, BAUMBACH & HELLWIG 2007), etwas größer bei *Minuartia verna* ($N_e m = 0,69$; N = 4) und deutlich größer bei *Silene vulgaris* ($N_e m = 1,27$; N = 5) (BAUMBACH 2005).

Die mittlere genetische Variabilität der untersuchten *A. montanum*-Populationen (59 % polymorphe Loci, 18,9 % Heterozygotie) ist deutlich höher als bei den Metallophyten *M. verna* (38 % p. L., 14,9 % Het., N = 4, BAUMBACH 2005) und *A. maritima* s. l. (48 % p. L., 16,7 % Het., N = 6, BAUMBACH & HELLWIG 2007) aber etwas geringer als bei *S. vulgaris* (65 % p. L., 19,4 % Het., N = 5; BAUMBACH 2005). Die mittlere genetische Variabilität dieser drei Taxa korreliert sehr gut mit ihrer Abundanz im östlichen Harzvorland. Von *M. verna* sind derzeit auf 275 Halden, von *A. maritima* auf 354 Halden und von *S. vulgaris* auf 497 Halden Populationen nachgewiesen (BAUMBACH, unveröff.). Zwar ist die Anzahl von *A. montanum*-Populationen

auf Halden vergleichsweise gering (32), allerdings konzentrieren sich diese auf ein relativ kleines Gebiet, in dem die Art außerdem (wie *S. vulgaris*) auch auf Nicht-Haldenstandorten vorkommt.

Eine genetische Differenzierung in Populationen metallbelasteter und unbelasteter Standorte konnte nicht nachgewiesen werden. Dies lässt auf eine potentielle Metalltoleranz der Art im Gebiet schließen (vgl. OUZOUNIDOU 1994, 1995).

Alle Auswertungsmethoden zeigen übereinstimmend eine geographische Differenzierung in regionale Gruppen, innerhalb derer die Populationen in der Regel nur mäßig genetisch differenziert sind. In diesem Muster, das durch Isolation durch Entfernung („isolation by distance“, SLATKIN 1993) zu erklären ist, gibt es einige Ausnahmen, die wahrscheinlich auf seltene Fernverbreitungsereignisse im Zusammenhang mit der Entstehung der Standorte (Montanhistorie) zurückgeführt werden können.

Genfluss, der einer genetischen Differenzierung von Populationen entgegenwirkt, wird bei Pflanzen durch Pollenaustausch und Diasporenausbreitung (einschließlich erfolgreicher Keimung, Etablierung und Reproduktion) realisiert. Anemochorie (JÄGER & WERNER 2005) dürfte bei *A. montanum* aufgrund des Baus der Samen (nur schwach (0,16 – 0,24 mm) geflügelt, Samenlänge um 2 mm) und der geringen Wuchshöhe der Pflanzen wohl nur in unmittelbarer Nähe der Mutterpflanze effektiv sein. Bedeutender dürfte eine Diasporenausbreitung in den Hufen oder im Fell von Weidetieren sein (BONN & POSCHLOD 1998). In eigenen Keimungsversuchen konnte bei *A. montanum* ein Verschleimen der Testa beobachtet werden. Bei der ebenfalls myxospermen Art *Alyssum petraeum* ARD. wurde ein Schleimgehalt der Diasporen von 12,4 % festgestellt (GRUBERT 1982). Beim Eintrocknen wird dieser Schleim klebrig, sodass ein epizoochorer Samentransport zwischen den Halden wahrscheinlich ist.

Die Ergebnisse der molekularen Analysen legen den Schluss nahe, dass die Beweidung im Gebiet einen wesentlichen Beitrag zum genetischen Austausch zwischen den Populationen leistet. Es kann angenommen werden, dass die Saalehöhen seit langem als Weideflächen für Schafe und Ziegen genutzt wurden, da eine ackerbauliche Nutzung kaum möglich ist (vgl. VERBAND NATURPARK „UNTERES SAALETAL“ 2007, DAMISCH & VILLWOCK 1997).

Auf der Georgsburg bei Könnern, wo *A. montanum* auch im die Halden umgebenden Trockenrasen vorkommt, sind die untersuchten Populationen untereinander kaum genetisch differenziert. Begünstigt wird der Diasporenaustausch zwischen den Teilpopulationen sicherlich durch die seit dem Jahr 2008 durchgeführte Ziegenbeweidung.

Innerhalb der Populationsgruppe Friedeburgerhütte (EFH) sind alle drei Populationen genetisch sehr stark differenziert, was auf Gründereffekte oder Isolation zurückzuführen sein kann. Zwar liegen die Halden nur max. 240 m auseinander, das dazwischen liegende Grünland wird aber nicht beweidet, sondern gemäht.

Ein ähnliches Bild zeigt sich in Dobis, hier ist eine Population (SED12) deutlich von den beiden anderen differenziert, obwohl alle drei Halden gleiche Abstände (ca. 90 m) zueinander haben. Die Halden liegen in der Reihenfolge SED8, SED10 und SED12 in annähernder NNW-SSE-Orientierung. Die beiden nördlichen Halden sind von einer Weide umgeben, während SED12 im Acker liegt. Auch hier dürfte die Beweidung den Diasporenaustausch und damit den Genfluss begünstigen. Die große Ähnlichkeit der Population SED12 mit der Population KÖ1 (Abb. 8) kann auf ein mögliches anthropogenes Verschleppungsereignis zwischen den ca. 7 km entfernten Populationen hinweisen.

Die Bestäuber von *A. montanum* sind bisher weitgehend unbekannt, sodass keine Aussagen über die von ihnen zurückgelegten Distanzen und mögliche Isolationseffekte zu treffen sind. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die relativ geringen Abstände zwischen benachbarten Halden auf denen *A. montanum* vorkommt (Tab. 8), durch die bestäubenden Insekten überwunden werden können. Ein genetischer Austausch durch Pollentransport zwischen den verschiedenen, mindestens 3 km auseinander liegenden Populationsgruppen erscheint hingegen weniger wahrscheinlich.

Wie bei allen Pflanzen, die auf sekundären, anthropogenen Standorten vorkommen, stellt sich die Frage nach den primären, natürlichen Standorten dieser Arten, von denen aus sie die Bergbaufolgelandschaft

Tab. 8 Verbreitung von *Alyssum montanum* und *Minuartia verna* auf den Halden des Kupferschieferbergbaus und Gestaltung der Bergbaufolgelandschaft zwischen Hettstedt und Dobis.

Tab. 8 Distribution of *Alyssum montanum* and *Minuartia verna* at copper shale spoil heaps and characteristics of the post-mining landscape between Hettstedt and Dobis.

Haldengebiet	östl. Burgörner (BU+BÖ)	östlich Welfesholz (EWE)	östlich Gerbstedt (EGE)	östlich F.-Hütte (EFH)	südöstlich Dobis (SED)
Gesamtanzahl Halden	183	25	34	44	19
Halden mit <i>Minuartia</i> -Vorkommen	46 %	36 %	3 %	-	-
Halden mit <i>Alyssum</i> -Vorkommen	-	-	24 %	?*	79 %
mittlerer Abstand zur nächstgelegenen Halde (m)	74 (±54)	180 (±66)	124 (±70)	89 (±93)	56 (±30)
mittlere Minimaldistanz zwischen Halden mit <i>Minuartia</i> bzw. <i>Alyssum</i> -Vorkommen (m)	111 (±66)	241 (±116)	157 (±137)	?*	66 (±40)
mittlere Minimaldistanz einer unbesiedelten Halde zur nächsten besiedelten (m)	109 (±88)	785 (±499)	409 (±220)	?*	60 (±21)

* Das Haldengebiet östlich Friedeburgerhütte ist noch nicht vollständig floristisch kartiert.

besiedeln konnten. *A. montanum* kommt im unteren Saaletal sowohl an den östlichen (bei Dobis, Rothenburg und Könnern) als auch an den westlichen Saalehängen auf natürlichen Standorten in zum Teil großen Populationen vor (SCHULZ 1894, FITTING et al. 1899, ALTEHAGE 1937, LAU 2009) und ist Element mehrerer typischer Pflanzengesellschaften. Hierzu gehören das verbreitete Festuco valesiacae-Stipetum capillatae, das Alyssu-Festucetum pallentis sowie das Thymo-Festucetum pallentis (SCHUBERT 2001). Schon SCHULZ (1894) wies aber darauf hin, dass die Art auf das Saaletal und die unmittelbare Umgebung („selten mehr als 1 km landeinwärts“) beschränkt ist.

Die Besiedlung der im 15. und 16. Jahrhundert (JANKOWSKI 1995) entstandenen Halden auf der östlichen Saalseite bei Könnern und Dobis konnte also unmittelbar aus diesen Populationen/Gesellschaften heraus erfolgen. Als bleitolerante Pflanze findet *A. montanum* auf den Halden gute Bedingungen, da die Konkurrenz durch andere Arten stark eingeschränkt ist. Die große genetische Ähnlichkeit der Populationen Könnern und Golbitz sowie die geringe genetische Variabilität der Population Golbitz legen den Schluss nahe, dass die isoliert in der weiträumigen Ackerlandschaft liegenden, in der 1. Hälfte des 18. Jahrhunderts entstandenen (JANKOWSKI 1995: 219) Golbitzer Halden von Könnern aus besiedelt wurden. Primäre Schwermetallstandorte dürfte es wegen der steilen Lagerung des Flözes (70 – 80°, JANKOWSKI 1995) nicht gegeben haben.

Auch um Friedeburgerhütte auf der westlichen Saalseite gab und gibt es keine Vorkommen von *A. montanum* auf natürlichen Standorten, sodass die in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts (JANKOWSKI 1995: 107–108) entstandenen Halden nicht aus ihrer näheren Umgebung durch *A. montanum* besiedelt werden konnten. Die genetische Ähnlichkeit zwischen den Populationsgruppen SED und EFH (Abb. 5) spricht dafür, dass diese Besiedlung von Dobis (5,6 km SE) und nicht von Könnern (Distanz: 5,8 km NNE) ausging. Natürlich kann eine mögliche Besiedlung ausgehend von einem hier nicht untersuchten oder aber nicht mehr existierendem Vorkommen (z. B. auf der westlichen Saalseite) nicht ausgeschlossen werden.

Aktuell erreicht *A. montanum* seine westliche Verbreitungsgrenze auf einer Halde ca. 500 m östlich von Gerbstedt. Etwa 300 m SSE von dieser Halde erreicht *M. verna* ihr östlichstes Vorkommen in der Mansfelder Mulde (Halde EGE 209). Diese Halden sind ebenfalls erst ab der Mitte des 18. Jahrhunderts entstanden (JANKOWSKI 1995: 104–105). Für *M. verna* werden primäre Standorte am Kupferberg bei Hettstedt angenommen (SCHUBERT 1954a), die jedoch durch die bergbauliche Aktivität, die dort gegen Ende des 12. Jahrhunderts ihren Anfang genommen hat (SPANGENBERG 1572), zerstört worden sind. Auf der östlichen Saalseite hat es – wenn überhaupt – nur an der Georgsburg bei Könnern primäre Schwermetallstandorte gegeben. Nachweisbar sind diese wegen der Landschaftsveränderung durch den Bergbau auf Kupferschiefer und den historischen Steinbruchbetrieb nicht mehr. Bei Dobis gab es wahrscheinlich

keine primären Standorte, da dort das Kupferschieferflöz mit 20 – 30° nach SW einfällt (KNITZSCHKE et al. 2008: 134) und nicht flächig ausstreicht. Wie für *A. montanum* stellt die Saale auch für *M. verna* eine entscheidende Ausbreitungsbarriere nach Westen dar, die durch Letztere offenbar bisher nicht überwunden werden konnte.

Die Besiedlung der Sekundärstandorte erfolgte also von den Primärstandorten ausgehend von *A. montanum* entgegen der Hauptwindrichtung nach Westen, von *M. verna* mit der Hauptwindrichtung nach Osten. Allerdings nimmt die Haldendichte von Westen nach Osten bis Gerbstedt stark ab, sodass die Abstände potentiell zu besiedelnder Habitatsinseln sehr groß werden (Tab. 8). Wahrscheinlich ist im Bereich zwischen Welfesholz und Gerbstedt der mittlere Haldenabstand so groß, dass er bisher allein durch natürliche Ausbreitungsmechanismen noch nicht überwunden werden konnte.

Zur eindeutigen Erklärung des Verbreitungsmusters von *Alyssum montanum* auf den Kupferschieferhalden im östlichen Harzvorland können zur Ergänzung der vorliegenden Daten Aussaat- und Verpflanzungsexperimente im Freiland sowie Experimente zur Diasporen-Ausbreitung wichtige, weitergehende Erkenntnisse liefern.

5 Zusammenfassung

GERTH, A., MERTEN, D., BAUMBACH, H.: Verbreitung, Vergesellschaftung und genetische Populationsdifferenzierung des Berg-Steinkrautes (*Alyssum montanum* L.) auf Schwermetallstandorten im östlichen Harzvorland. - *Hercynia* N. F. 44 (2011) 73 – 92.

Das Verbreitungsmuster und die Vergesellschaftung von *Alyssum montanum* L. (Brassicaceae) auf den Kupferschieferhalden im östlichen Harzvorland (Sachsen-Anhalt) wurde unter Berücksichtigung edaphischer und klimatischer Faktoren untersucht. Dazu wurden auf sechs Halden Transekte mit insgesamt 28 Dauerbeobachtungsflächen angelegt, die vegetationskundlich aufgenommen und hinsichtlich der pH-Werte und der Totalgehalte an Metallen im Oberboden charakterisiert wurden.

Alyssum montanum wird vom Saaletal nach Westen immer seltener und erreicht östlich von Gerbstedt seine westliche Verbreitungsgrenze. Diesem Gradienten folgen in den untersuchten Sukzessionsstadien auch *Scabiosa ochroleuca* und *Euphorbia cyparissias*. Die Vegetationsaufnahmen zeigen eine starke Eigenständigkeit des Armerietum halleri in der Variante von *A. montanum*, die wesentlich durch das Fehlen von *Minuartia verna*, der Klassencharakterart der *Violetea calaminariae*, bedingt ist. Der regionale Verbreitungsgradient von *A. montanum* scheint dem Niederschlags- und Temperaturgradienten zu folgen, ist aber offenbar nicht (allein) durch diesen bedingt.

Im Oberboden der Halden, auf denen nur *A. montanum* vorkommt, wurden stark erhöhte Metallgehalte (max. 27 906 mg/kg Pb, 7636 mg/kg Cu, 18 591 mg/kg Zn, 138 mg/kg Ni, 78 mg/kg Cd, 151 mg/kg Co, 116 mg/kg Cr) festgestellt. *Alyssum montanum* muss somit als fakultativer Metallophyt eingestuft werden. Inwieweit die Art auch Metalle (hyper-)akkumuliert, müssen weitergehende Studien zeigen.

Die AFLP-Analyse (amplified fragment length polymorphism) der genetischen Struktur der Populationen zeigt eine geographische Differenzierung in regionale Gruppen, innerhalb derer die Populationen in der Regel nur mäßig genetisch differenziert sind. In diesem Muster, das durch Isolation durch Entfernung (isolation by distance) zu erklären ist, gibt es einige Ausnahmen, die auf seltene Fernverbreitungsereignisse, die im Zusammenhang mit der Entstehung der Standorte (Montanhistorie) zu sehen sind, zurückgeführt werden können.

Das derzeitige Verbreitungsmuster von *A. montanum* ist sehr wahrscheinlich durch eine epizoochore und hemerochore Ausbreitung in der Bergbaufolgelandschaft von Ost nach West – ausgehend von primären, metallfreien Standorten im Saaletal – zu erklären. Offenbar ist der Abstand zwischen besiedelbaren Haldenhabitaten an der westlichen Verbreitungsgrenze von *A. montanum* so groß, dass er bisher nicht überwunden werden konnte.

6 Literatur

- ALTEHAGE, C. (1937): Die Steppenheidehänge bei Rothenburg-Könnern im unteren Saaletal. - Abh. Ber. Mus. Naturkunde Vorgesch. Naturwiss. Ver. Magdeburg 4: 233 – 262.
- BARRY, S. A. S., CLARK, S. C. (1978): Problems of interpreting the relationship between the amounts of lead and zinc in plants and soil on metalliferous wastes. - New Phytologist 81: 773 – 783.
- BAUMBACH, H. (2005): Genetische Differenzierung mitteleuropäischer Schwermetallsippen von *Silene vulgaris*, *Minuartia verna* und *Armeria maritima* unter Berücksichtigung biogeographischer, montanhistorischer und physiologischer Aspekte. - Diss. Bot. 398: 1 – 128.
- BAUMBACH, H. (2008): Zur Situation der Schwermetallrasen und ihrer Standorte im östlichen und südöstlichen Harzvorland. - Naturschutz im Land Sachsen-Anh. 40: 3 – 19.
- BAUMBACH, H., HELLMIG, F. H. (2007): Genetic differentiation of metallicolous and non-metallicolous *Armeria maritima* (Mill.) Willd. taxa (Plumbaginaceae) in Central Europe. - Pl. Syst. Evol. 269: 245 – 258.
- BENKERT, D., FUKAREK, F., KORSCH, H. (1996): Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen Ostdeutschlands. - Gustav Fischer Verlag, Jena.
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K., WILKE, B.-M. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. - Spektrum Akademischer Verlag, München. 16. Aufl.
- BONN, S., POSCHLOD, P. (1998): Ausbreitungsbiologie der Pflanzen Mitteleuropas: Grundlagen und kulturhistorische Aspekte. - Quelle & Meyer, Wiesbaden.
- BROOKS, R. R., MORRISON, R. S., REEVES, R. D., DUDLEY, T. R., AKMAN, Y. (1979): Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum* Linnaeus (Cruciferae). - Proc. R. Soc. Lond. B 203: 387 – 403.
- BROOKS, R. R., RADFORD, C. C. (1978): Nickel accumulation by European species of the genus *Alyssum*. - Proc. R. Soc. Lond. B 200: 217 – 224.
- DAMISCH, W., VILLWOCK, G. (Hrsg.) (1997): Beiträge zur Natur, Landnutzung und Wirtschaft des Naturparks „Unteres Saaletal“. - Arbeiten aus dem Naturpark „Unteres Saaletal“ 5.
- DIERSCHKE, H. (1994): Pflanzensoziologie - Grundlagen und Methoden. - Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).
- DUDLEY, T. R. (1986a): A new nickelphilous species of *Alyssum* (Cruciferae) from Portugal: *Alyssum pintodasilvae* T. R. Dudley. - Feddes Repert. 97: 135 – 138.
- DUDLEY, T. R. (1986b): A nickel hyperaccumulating species of *Alyssum* (Cruciferae) from Spain: *A. malacitanum* (Rivas Goday) T. R. Dudley, comb. & stat. nov. - Feddes Repert. 97: 139 – 141.
- ERNST, W. H. O. (1974): Schwermetallvegetation der Erde. - Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- ERNST, W. H. O., VERKLEIJ, J. A. C., SCHAT, H. (1992): Metal tolerance in plants. - Acta Bot. Neerl. 41: 229 – 248.
- EXCOFFIER, L., LISCHER, H. (2010): Arlequin suite ver. 3.5: A new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows. - Mol. Ecol. Res. 10: 564 – 567.
- FABISZEWSKI, J. (1986): Heavy metal tolerance of *Cardaminopsis halleri* (L.) Hayek populations in the Polish Tatra Mts. - Acta Soc. Bot. Pol. 55: 421 – 428.
- FALUSH, D., STEPHENS, M., PRITCHARD, J. K. (2007): Inference of population structure using multilocus genotype data: dominant markers and null alleles. - Mol. Ecol. Notes 7: 574 – 578.
- FITTING, H., SCHULZ, A.; WÜST, E. (1899): Nachtrag zu August Garckes Flora von Halle. - Verh. Bot. Ver. Brandenburg 41: 118 – 165.
- FRAHM, J.-P., FREY, W. (2004): Moosflora. 4. neubearb. Aufl. - Ulmer, Stuttgart.
- GARCIA GONZALEZ, A., CLARK, S. C. (1989): The distribution of *Minuartia verna* and *Thlaspi alpestre* in the British Isles in relation to 13 soil metals. - Vegetatio 84: 87 – 94.
- GERTH, A. (2010): Die Verbreitung von *Alyssum montanum* im östlichen Harzvorland und auf den Saalehöhen bei Könnern. - Staatsexamensarb., Friedrich-Schiller-Universität, Jena.
- GRAWUNDER, A., LONSCHINSKI, M., MERTEN, D., BÜCHEL, G. (2009): Distribution and bonding of residual contamination in glacial sediments at the former uranium mining leaching heap of Gessen/Thuringia, Germany. - Chemie der Erde 69: 5 – 19
- GRUBERT, M. (1982): Bestimmung des Schleimgehaltes myxospermer Diasporen verschiedener Angiospermenfamilien. - Pl. Syst. Evol. 141: 7 – 21.
- HARDTKE, H.-J., IHL, A. (2000): Atlas der Farn- und Samenpflanzen Sachsens. - Sächs. Landesamt f. Umwelt u. Geologie, Dresden.
- HEGI (Begr.), G. (1986): Illustrierte Flora von Mitteleuropa – Band IV (I). 3. Aufl. - Paul Parey, Berlin.
- HELLMIG, F. H., NOLTE, M., OCHSMANN, J., WISSEMAN, V. (1999): Rapid isolation of total cell DNA from milligram plant tissue. - Haussknechtia 7: 29 – 34.

- HILDEBRANDT, U., HOEF-EMDEN, K., BACKHAUSEN, S., BOTHE, H., BOZEK, M., SIUTA, A., KUTA, E. (2006): The rare, endemic zinc violets of Central Europe originate from *Viola lutea* Huds. - *Pl. Syst. Evol.* 257: 205 – 222.
- JÄGER, E. J.; WERNER, K. (Hrsg.) (2005): Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Kritischer Band. - Spektrum, Heidelberg. 10. bearb. Aufl.
- JANKOWSKI, G. (Hrsg.) (1995): Zur Geschichte des Mansfelder Kupferschieferbergbaus. - Clausthal-Zellerfeld, GDBM.
- KNITZSCHKE, G., KÖNIG, S., SLOTTA, R., SPILKER, M. (2008): Die Sachzeugen des Bergbaus. In: Mansfeld - Die Geschichte des Berg- und Hüttenwesens. Band 3: Die Sachzeugen. - Verein Mansfelder Berg- u. Hüttenleute (Hrsg.). Lutherstadt Eisleben u. Bochum: 65 – 215.
- KOCH, M., MUMMENHOFF, K., HURKA, H. (1998): Systematics and evolutionary history of heavy metal tolerant *Thlaspi caerulescens* in Western Europe: evidence from genetic studies based on isozyme analysis. - *Biochem. Syst. Ecol.* 26: 823 – 838.
- LAU (2009): Datenbank der Farn- und Blütenpflanzen Sachsen-Anhalt. - Landesamt f. Umweltschutz (LAU), Halle/S.
- MANTEL, N. (1967): The detection of disease clustering and a generalized regression approach. - *Cancer Research* 27: 209 – 220.
- MEUSEL, H., JÄGER, E., WEINERT, E. (1965): Vergleichende Chorologie der zentralen europäischen Flora. Kartenband. - Gustav Fischer, Jena.
- MILLER, M. (1997): Tools for population genetic analysis (TFPGA) 1.3: A Windows program for the analysis of allozyme and molecular population genetic data.
- MÜHR, B. (2010): Klimadiagramme weltweit: [<http://www.klimadiagramme.de/>] (13.11.2010)
- NEI, M. (1972): Genetic distance between populations. - *Am. Nat.* 106: 283 – 292.
- NEUMANN, D., ZUR NIEDEN, U., SCHWIEGER, W., LEOPOLD, I., LICHTENBERGER, O. (1997): Heavy metal tolerance of *Minuartia verna*. - *J. Pl. Physiol.* 151: 101 – 108.
- NYBOM, H., BARTISH, I. V. (2000): Effects of life history traits and sampling strategies on genetic diversity estimates obtained with RAPD markers in plants. - *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 3: 93 – 114.
- OUZOUNIDOU, G. (1994): Copper-induced changes on growth, metal content and photosynthetic functions of *Alyssum montanum* L. plants. - *Environm. Experim. Bot.* 34: 165 – 172.
- OUZOUNIDOU, G. (1995): Effect of copper on germination and seedling growth of *Minuartia*, *Silene*, *Alyssum* and *Thlaspi*. - *Biologia Plantarum* 37: 411 – 416.
- PARTZSCH, M., PIESCH, C., HENSEN, I. (2011): A comparative study of germination biology and plant performance in two dry grassland species. - *Folia Geobot.* 46: 35 – 48.
- PRITCHARD, J. K., STEPHENS, M., DONNELLY, P. (2000): Inference of population structure using multilocus genotype data. - *Genetics* 155: 945 – 959.
- ROSENBERG, N. A. (2004): DISTRUCT: a program for the graphical display of population structure. - *Mol. Ecol. Notes* 4: 137 – 138.
- SCHUBERT, R. (1952): Die Pflanzengesellschaften der schwermetallhaltigen Böden des östlichen Harzvorlandes. - Diss., Martin-Luther-Universität Halle.
- SCHUBERT, R. (1953/54): Die Schwermetallpflanzengesellschaften des östlichen Harzvorlandes. - *Wiss. Z. Univ. Halle, Math.-Nat.* 3: 51 – 70.
- SCHUBERT, R. (1954a): Zur Systematik und Pflanzengeographie der Charakterpflanzen der Mitteldeutschen Schwermetallpflanzengesellschaften. - *Wiss. Z. Univ. Halle, Math.-Nat.* 3: 863 – 882.
- SCHUBERT, R. (2001): Prodrum der Pflanzengesellschaften Sachsen-Anhalts. - *Mitt. florist. Kart. Sachsen-Anh. Sonderheft* 2.
- SCHUBERT, R., HILBIG, W., KLOTZ, S. (2001): Bestimmungsbuch der Pflanzengesellschaften Deutschlands. - Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, Berlin.
- SCHULZ, A. (1894): Grundzüge einer Entwicklungsgeschichte der Pflanzenwelt Mitteleuropas seit dem Ausgange der Tertiärzeit. - Gustav Fischer Verlag, Jena.
- SEGWARDT, H. (1986): Schwermetall- und Nährelementgehalte von Pflanzen und Bodenproben schwermetallhaltiger Halden im Raum Bleiberg in Kärnten (Österreich). I. Krautige Pflanzen. - *Z. Pflanzenernährg. Bodenkd.* 150: 129 – 134.
- SLATKIN, M. (1993): Isolation by distance in equilibrium and non-equilibrium populations. - *Evolution* 47: 264 – 279.
- SPANGENBERG, C. (1572): Mansfeldische Chronica. - Eisleben.
- TUTIN, T. G., BURGESS, N. A., CHATER, A. O., EDMONDSON, J. R., HEYWOOD, V. R., MOORE, D. M., VALENTINE, D. H., WALTERS, S. M., WEBB, D. A. (1993): *Flora Europaea* Vol. 1. 2. Aufl. - Cambridge University Press, Cambridge.
- VDLUFU (1991): Methodenbuch Band 1. - Verband Dt. Landwirt. Untersuchungs- u. Forschungsanstalten (VDLUFU).
- VERBAND NATURPARK „UNTERES SAALETAL“ (2007): Pflege- und Entwicklungskonzeption für den Naturpark „Unteres Saaletal“. - Rothenburg (Saale).

- VOS, P., HOGERS, R., BLEEKER, M., REIJANS, M., VAN DE LEE, T., HORNES, M., FRITERS, A., POT, J., PELEMAN, J., KUIPER, M., ZABENAU, M. (1995): AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. - *Nucleic Acids Res.* 23: 4407 – 4414.
- WRIGHT, S. (1978): *Evolution and the genetics of populations. Vol. IV - Variability within and among natural populations.* - The University of Chicago Press, Chicago.
- ZEIEN, H., BRÜMMER, G. W. (1991): Ermittlung der Mobilität und Bindungsformen von Schwermetallen in Böden mittels sequentieller Extraktionen. - *Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges.* 66: 439 – 442.
- ZÜNDORF, H.-J., GÜNTHER, K.-F., KORSCH, H., WESTHUS, W. (2006): *Flora von Thüringen.* - Weissdorn-Verlag, Jena.

Manuskript angenommen: 27. Mai 2011

Anschrift der Autoren:

Andreas Gerth, Dr. Henryk Baumbach

Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Spezielle Botanik, Herbarium Haussknecht und Botanischer Garten

Philosophenweg 16, 07743 Jena

Email: andreas.gerth@uni-jena.de, h.baumbach@uni-jena.de

Dr. Dirk Merten

Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Geowissenschaften

Burgweg 11, 07749 Jena

Email: dirk.merten@uni-jena.de

