



universität  
wien

# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Kupferhalde Knappenberg:  
Vergleichende Analyse der azonalen Vegetation und  
Bodenparameter von einer Schwermetallhalde (Cu, Mn)  
und des umliegenden Waldes bei Hirschwang (NÖ, AUT)“

Verfasserin

Yasmin Weiss

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 444

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Ökologie

Betreuerin / Betreuer:

ao. Univ.-Prof. Dr. Irene Lichtscheidl-Schultz



# Danksagung

An erster Stelle möchte ich meiner Familie danken, die mich wo immer sie konnte unterstützt hat. Meinem Freund möchte ich danken, dass er mich immer zur richtigen Zeit daran erinnert hat „doch schön langsam mit dem Studium fertig zu werden“.

Prof. Dr. Irene Lichtscheidl möchte ich danken, dass sie es mir ermöglicht hat meine Diplomarbeit im Rahmen einer spannenden Freilandarbeit durchzuführen.

Mag. Dr. Wolfram Adlassnig gebührt Dank, dass er für mich und meine Fragen immer ein offenes Ohr (oder eine rechte Seite des Schreibtisches) hatte und geduldig für jedes Problem früher oder später eine Lösung parat hatte.

Ein großes Dankeschön an Dr. Alois Nagl und Ass.-Prof. Mag. Dr. Wolfgang Punz (Department für Molekulare Systembiologie Universität Wien), die mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat bei Seite gestanden sind.

Doz. Mag. Dr. Harald Zechmeister (Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie Universität Wien) danke ich für die Unterstützung beim Erstellen der Moosartenliste.

Ass.-Prof. Dr. Luise Ehrendorfer-Schratt (Department für Botanische Systematik und Evolutionsforschung Universität Wien) danke ich für die Unterstützung beim Bestimmen der krautigen Pflanzen.

Dank Univ.-Prof. i.R. Dr. Roman Türk (Universität Salzburg) war es mir möglich auch die Flechten in meine Artenliste aufzunehmen.

Prof. Dr. Anton Beran (Department für Mineralogie Universität Wien) möchte ich für seine ausführlichen mündlichen Mitteilungen über die Geologie der Abraumhalde danken.

Dr. Nils Baumann (Forschungszentrum Rossendorf) und Dr. Markus Puschenreiter (Universität für Bodenkultur Institut für Bodenforschung) gebührt Dank für die ICPM Auswertungen meiner Proben.

Ich danke Dr. Georg Steinhauser (Atominstut der österreichischen Universitäten) für die Bereitstellung seiner Daten über die Abraumhalde in Hirschwang.

Ein Dankeschön auch an Oberforstrat Dipl. Ing. Hubert Mayer und an die Forstverwaltung Hirschwang der MA 49 Wien, die es mir erst ermöglichten, dass ich meine Arbeit in diesem Gebiet durchführen durfte.

Der ganzen Abteilung *Cell Imaging* möchte ich für eine schöne und lustige, manchmal etwas chaotische Diplomarbeits - Zeit danken.

Mein Dank gilt auch der Universität Wien, die mich mit dem Förderungsstipendium der Universität Wien finanziell unterstützte.

Diese Arbeit wurde finanziell durch das EU-Trainingsnetzwerk UMBRELLA (EU 226870) und das ÖAD Projekt BIOREM (FA 579 003) unterstützt.

Wien, Jänner 2013

# Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
2	Abstract .....	3
3	Einleitung.....	5
3.1	Schwermetalle.....	5
3.2	Makro – Mikronährstoffe .....	6
3.3	Untersuchte Schwermetalle.....	6
3.3.1	Kupfer (Cu).....	6
3.3.2	Eisen (Fe) .....	7
3.3.3	Mangan (Mn).....	8
3.4	Ökologie und Vegetation.....	9
3.4.1	Typen der Schwermetallstandorte .....	9
3.4.2	Abraumhalden .....	10
3.4.3	Metallophyten .....	11
3.4.4	Strategien der Schwermetall - Toleranz .....	12
3.5	Standort Knappenberg .....	14
3.6	Geologie und Bergbau der Halde am Knappenberg.....	15
3.6.1	Geologie.....	15
3.6.2	Bergbau .....	15
3.6.3	Chronik des Knappenbergs nach Hackenberger.....	17
3.7	Zielsetzung und Hypothesen .....	18
4	Material und Methode .....	19
4.1	Überblick.....	19
4.2	Boden.....	19
4.2.1	aktueller Wassergehalt.....	19
4.2.2	Algen .....	19
4.2.3	Calciumchlorid-Extraktion .....	20
4.2.4	Sulfat.....	20
4.2.5	Ammonium .....	20
4.2.6	Nitrat.....	20
4.2.7	Phosphat.....	21
4.2.8	Gesteine und Geologie .....	21
4.2.9	Grob-/ Feinfraktion.....	21
4.2.10	Korngrößenverteilung.....	21

4.2.11	Humusbestimmung.....	23
4.2.12	Wasserhaltekapazität im Boden .....	24
4.2.13	Ammoniumnitrat – Extraktion Boden.....	24
4.2.14	Königswasser-Extraktion.....	25
4.2.15	Radioaktivität .....	25
4.3	Vegetationsaufnahmen.....	26
4.4	Analyse von Rumex acetosella.....	27
4.4.1	Photosyntheseleistung Rumex acetosella .....	27
4.4.2	Salpetersäure Extraktion Rumex acetosella.....	27
4.5	Mikroklima .....	28
4.5.1	Klimamessung .....	28
4.5.2	Dämpfungstiefe.....	29
4.6	Auswertung.....	29
5	Ergebnisse .....	33
5.1	Übersicht über die Halde .....	33
5.1.1	Cluster .....	34
5.1.2	Radioaktivität .....	36
5.2	Mikroklima .....	36
5.2.1	Dämpfungstiefe der täglichen Temperaturschwankung .....	44
5.3	Boden .....	47
5.3.1	Steine .....	47
5.3.2	Bodenarten .....	47
5.3.3	Unterschiede der Bodenparameter zwischen Halde und Wald .....	48
5.3.4	Bodenzusammensetzung der Cluster .....	78
5.3.5	Unterschiede der Bodenparameter zwischen den Clustern.....	80
5.3.6	Wasserhaushalt.....	93
5.3.7	Korrelationen zwischen den Bodenparametern.....	104
5.3.8	Faktorenanalyse.....	116
5.4	Pflanzen.....	119
5.4.1	Artenliste.....	119
5.4.2	Deckungsgrad der Pflanzen in den Clustern .....	121
5.4.3	Korrelationen zwischen Pflanzen und Bodenparametern .....	124
5.4.4	Beschreibung ausgewählter Arten (Cluster, Bodenparameter).....	131
5.5	Vegetation.....	190

5.5.1	Pflanzengesellschaft .....	190
5.5.2	Artenzahlen .....	190
5.5.3	Korrelationen zwischen den Pflanzen .....	198
5.5.4	Vegetationsschichten (Kruskall-Wallis Test).....	211
5.6	Analyse von Rumex acetosella .....	214
6	Diskussion.....	217
6.1	Mikroklima.....	217
6.2	Geologie und Boden .....	218
6.2.1	Radioaktivität.....	218
6.2.2	pH-Wert.....	218
6.2.3	Bodenskelett.....	219
6.2.4	Wassergehalt aktuell .....	219
6.2.5	Dämpfungstiefe .....	220
6.2.6	Nährstoffe.....	220
6.3	Schwermetalle .....	221
6.3.1	Mangan.....	222
6.3.2	Eisen.....	222
6.3.3	Kupfer .....	223
6.3.4	Zink, Kadmium und Blei.....	224
6.3.5	Faktorenanalyse & lineare Modelle .....	225
6.4	Pflanzen .....	226
6.4.1	Gefäßpflanzen .....	226
6.4.2	Moose.....	227
6.4.3	Flechten und Pilze.....	227
6.4.4	Algen.....	227
6.4.5	Pinus sylvestris.....	228
6.4.6	Avenella flexuosa.....	228
6.4.7	Rumex acetosella.....	228
6.4.8	Vaccinium myrtillus .....	229
6.4.9	Hypnum cupressiforme .....	230
6.4.10	Pohlia sp. ....	230
6.4.11	Cladonia .....	231
6.4.12	Porpidia macrocarpa .....	231
6.5	Schlussfolgerung & Ausblick.....	232

7	Literatur .....	234
8	Anhang .....	237

# 1 Zusammenfassung

Die Schwermetallhalde am Knappenberg bei Edlach an der Rax (NÖ, AUT) zeichnet sich durch eine ausgeprägt azonale Vegetation aus, welche artenreich an Flechten ist und eine deutliche Abgrenzung zum umliegenden Wald zeigt.

Diese Arbeit befasst sich mit der Vegetation der Halde und den Korrelationen mit den Bodenparametern.

Bei Vegetationsaufnahmen auf der Halde und im unmittelbaren Umfeld wurden gesamt 38 Gefäßpflanzenarten, 14 Moosarten und 18 Flechtenarten, aber keine Bodenalgen bestimmt. Direkt auf der Abraumhalde wachsen mit *Rumex acetosella*, *Pohlia drummondii* und *Porpidia macrocarpa* auch drei für Schwermetallstandorte charakteristische Arten. Den Randbereich der Halde dominieren acidophile Arten wie *Pleurozium schreberi* und *Avenella flexuosa*. Die Vegetationskarte zeigt auf, dass sich die Vegetation im umliegenden Wald unterscheidet. So ist der Wald über Prebichschichten auf der südlichen Seite der Halde geprägt von säureliebenden Moosen und Gräsern, während die nördliche Seite über Werfener Schiefer einen deutlich höheren Artenreichtum aufweist.

Es ist bekannt, dass Schwermetalle die Bodenbildung hemmen und häufig eine Säurebildung bewirken. Die Ergebnisse der Humusbestimmung bestätigten, dass auf der Halde der Humusanteil im Boden geringer als im umliegenden Wald ausfällt. Die gemessenen pH-Werte des Bodens zeigen einen deutlichen Gradienten: während außerhalb der Halde ein extrem niedriger pH-Wert gemessen wurde ( $< 3,5$ ), lagen die Werte auf der Halde deutlich höher ( $> 4$ ). Der Wert des Humusgehalts korreliert stark negativ mit dem pH Wert ( $R^2=-0,7$ ). Der überraschend hohe pH-Wert der Halde ist wahrscheinlich auf Vorkommen karbonatischer Erzminerale wie Ankerit, Sidarit, Azurit und Malachit zurückzuführen.

Neben der hohen Schwermetallbelastung (9.000 ppm Kupfer) wurden noch weitere Stressfaktoren für Pflanzen identifiziert. Die Daten der Klimamessung bestätigen die Annahme, dass das Klima während eines Tages auf der Halde stärkeren Schwankungen unterliegt als am Haldenrand bzw. im Wald. Der Feinerdenanteil beträgt weniger als 20%. Die Wasserhaltekapazität des Bodens ist gering. Anorganische Nährstoffe fehlen fast vollständig, sogar Eisen ist kaum verfügbar, obwohl die Halde aus Eisenerz besteht (250.000 ppm Eisen).

Unterhalb der Halde befindet sich ebenfalls Abraummaterial, hier ist es jedoch von einer Humusschicht bedeckt (7-26% Humus), entsprechend tritt hier eine deutlich größere

Biodiversität als auf der Halde auf. *Dryopteris filix mas* und *Campanula persicifolia* beispielsweise wurden nur hier gefunden.

Diese Ergebnisse zeigen, dass auch hohe Schwermetallkonzentrationen eine geschlossene Vegetationsdecke und eine relativ hohe Biodiversität nicht verhindern, solange andere Parameter wie pH, Mikroklima und Humusgehalt günstig sind.

## 2 Abstract

The heavy metal heap near Edlach an der Rax (LAUT) is characterized by a distinct azonal vegetation being species-rich in lichens and showing a clear delimitation to the surrounding forest.

This treatise deals with the vegetation of the heap and the correlations with the soil parameters.

With the help of vegetation surveys on the heap and the immediate environment 38 vascular plant species, 14 moss species and 18 lichen species, but no soil algae could be defined. Three species characteristic for heavy metal sites grew directly on the spoil heap: *Rumex acetosella*, *Pohlia drumondii* and *Porpidia macrocarpa*, whereas acidophile species like *Pleurozium schreberi* and *Avenella flexuosa* dominate the peripheral zone of the heap. The vegetation map shows that the vegetation of the surrounding forest is different. The forest above layers of Prebichl on the southern side of the heap is characterized by acidophile moss and grass, whereas the northern side above layers of Werfen shale shows a significantly higher biodiversity.

It is well-known that heavy metals inhibit soil generation and often cause acidification. The results of the humus determination confirm the fact that the share of humus is lower on the heap than in the surrounding forest. The pH-values of the soil show a clear gradient: whereas outside the heap an extremely low pH could be defined (< 3,5), the values on the heap were significantly higher (>4). The share of humus strongly correlates negatively with the pH-value ( $R^2=0,7$ ). The surprisingly high pH-value on the heap is probably attributable to the occurrence of carbonate ore minerals, like ankarite, sidarite, azurite and malachite.

Apart from the high heavy metal pollution (9.000 ppm Cu) further stress factors were identified: the data of the climate measurements confirm the assumption that the climate on the heap is subject to a higher variation during one day than that at the edge of the heap and in the forest. The share of fine earth is lower than 20%. The water holding capacity of the soil is low. Inorganic nutrients are almost totally absent, even iron is hardly available although the heap consists of iron ore (250.000 ppm Fe).

Below the heap there is also excavation material being covered, however, by a layer of humus (7-26% humus), correspondingly a clearly higher biodiversity can be found here than on the heap. *Dryopteris filix mas* and *Campanula persicifolia*, e. g. were only found here.

The results show that also high concentrations of heavy metal cannot prevent a dense vegetation cover as long as other parameters, like pH, micro-climate and content of humus are favourable.



### 3 Einleitung

Anthropogen freigesetzte Schwermetalle können für die Umwelt ein schwerwiegendes Problem sein. Durch Bergbau, Landwirtschaft und Industrie gelangen sie in den biologischen Kreislauf und stellen dadurch einen erheblichen Stress-Faktor für alle Organismen dar. Dennoch sind Schwermetall belastete Standorte, wie in dieser Arbeit analysiert, Biotope für spezialisierte schwermetalltolerante Arten. Strategien der Toleranz gegenüber diesen Schwermetallen sind immer noch nicht ganz verstanden und bieten daher ein breites Spektrum an Forschungsmöglichkeiten.

Die lokale Anreicherung toxischer Verbindungen von Schwermetallen schränkt das Pflanzenwachstum vielfach auf eine stark selektierte Auswahl ökophysiologischer Spezialisten ein, die solche Bedingungen tolerieren und sogar manchmal Schwermetalle akkumulieren. Besonders zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die Vegetation auf Serpentin (Magnesium-Silikat mit Aluminium, Eisen und Nickel) und Galmei (Zink-Erz) (Strasburger *et al.*, 1991).

#### 3.1 Schwermetalle

Als Schwermetalle werden Elemente bezeichnet, die in metallischer Form eine Dichte von über  $4,5 \text{ g/cm}^3$  aufweisen. Manchmal wird auch der Wert  $5,0 \text{ g/cm}^3$  genannt, was zur Folge hat, dass Titan ( $4,51 \text{ g/cm}^3$ ) und Selen ( $4,8 \text{ g/cm}^3$ ) aus der Kategorie Schwermetalle herausfallen. Unter Normalbedingungen können die Elemente in fester Form oder in flüssiger Form (Quecksilber) vorliegen. Zu den Schwermetallen mit einer Dichte über  $4,5 \text{ g/cm}^3$  gehören u.a. Blei, Kadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Platin, Quecksilber, Silber, Tantal, Thallium, Titan, Vanadium, Wismut, Zink und Zirkon. Die Halbmetalle Antimon, Arsen, Selen und Zinn werden meist zu den Schwermetallen gezählt und üblicherweise auch in die Untersuchungen inkludiert (Red.: Sauermost & Freudig, 2003b).

Die Schwermetalle kommen in Böden und Gesteinen als feste chemische Verbindungen vor, vor allem als Carbonate, Sulfate, Sulfide, Silicate und Oxide. In Böden und Gesteinen liegen Schwermetalle meist als Gemenge vor, die bei sehr hoher Konzentration (hohem Vorkommen) als Lagerstätten oder Erzgänge bezeichnet werden (Red.: Sauermost & Freudig, 2003b). Erze sind mineralische Rohstoffe, aus denen Metalle gewonnen werden können (Weber, 1997).

Weber (1997) beschreibt eine Lagerstätte als eine natürliche, überdurchschnittliche Anreicherung eines oder mehrerer mineralischer Rohstoffe. Mit einer Lagerstätte verbindet man üblicherweise die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Nutzung über einen bestimmten Zeitraum.

### **3.2 Makro – Mikronährstoffe**

Die essentiellen Elemente, die eine Pflanze für ihr Wachstum braucht, werden als Nährelemente bezeichnet. Die für die Wurzeln aufnehmbaren chemischen Formen der Nährelemente werden als Nährstoffe bezeichnet, die aus den Mineralen der Böden und Gesteine stammenden Nährstoffe als mineralische Nährstoffe (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Als unbedingt in größeren Mengen (> 20 mg/l) notwendig erweisen sich die so genannten Makronährelemente (*Makronährstoffe, Makroelemente*) (Strasburger *et al.*, 1991). Zu den Makronährelementen zählen nach Scheffer & Schachtschabel (2002) Stickstoff, Kalium, Kalzium, Magnesium, Phosphor und Schwefel.

Mikronährelemente (Mikronährstoffe) sind nur in Spuren (Spurenelemente), d.h. < 0,5 mg/l, für die Ernährung und den Stoffwechsel von Organismen notwendig (Strasburger *et al.*, 1991). Als generell essentielle Schwermetalle für Organismen, alle zählen zu den Mikronährelemente, gelten Eisen, Mangan, Molybdän, Kupfer und Zink. Sie spielen als Bestandteil von Proteinen und prosthetischen Gruppen eine sehr wichtige Rolle und sind für die Ernährung der Pflanzen nur in Spuren erforderlich (Red.: Sauermost & Freudig, 2003a). Alle anderen Schwermetalle sind giftig, aber auch alle essentiellen Schwermetalle sind in hohen Konzentrationen als toxisch auf ihre Umwelt einzustufen.

### **3.3 Untersuchte Schwermetalle**

In weiterer Folge werden die Schwermetalle Kupfer, Eisen und Mangan näher beschrieben, da diese Schwermetalle die höchsten Gesamtgehalte auf der Abraumhalde am Knappenberg aufweisen.

#### **3.3.1 Kupfer (Cu)**

Atommasse 63,5 atomic mass unit (amu), Dichte 8,9 g/cm<sup>3</sup>

Der mittlere Kupfer-Gehalt der kontinentalen Kruste liegt bei 35 mg/kg. In Magmatiten und kupferreichen Schiefen kommt das Kupfer als Sulfid, nach Oxidation von Böden als Malachit [Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>] vor (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Untersuchungen zur Bindungsform des Kupfers im A-Horizont mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften und Kupfer-Gesamtgehalten nach Scheffer & Schachtschabel (2002) zeigen, dass 25-75% des Kupfers in organischer Bindung, 15-70% an Mangan- und Eisenoxide gebunden und 1-10% in silikatischer Bindung vorliegen. In stark mit Kupfer belasteten, Karbonat haltigen Böden wurde außerdem die Bildung von Malachit

als definierte Kupfer-Verbindung festgestellt. Löslichkeit und Verfügbarkeit von Kupfer in Böden steigen bei pH-Werten < 5 deutlich an (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Das chemische Element Kupfer ist ein Mineralstoff, der für Organismen in Form von  $\text{Cu}^+$  und  $\text{Cu}^{2+}$  ein essentieller Nahrungsbestandteil ist. Es kommt in Pflanzen in einer Konzentration von ca. 3-10 ppm Trockengewicht vor. Das Kupfer ist Bestandteil verschiedener Enzyme (z.B. Phenolasen, Ascorbinsäure-Oxidase) und Redoxsubstanzen (Plastocyanin). In den pflanzlichen Leitungssystemen liegt das Kupfer überwiegend als Komplex, beispielsweise an Aminosäuren gebunden, vor (Strasburger *et al.*, 1991).

In höheren Dosen wirkt Kupfer toxisch. Der MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) für Kupferstaub liegt bei 1 mg / 1 m<sup>3</sup> Luft (Wert aus Anhang I/2007 Stoffliste, Grenzwertverordnung (2007)). Die Kupfer-Gehalte von gering belasteten Böden betragen etwa 2-40 mg/kg. In belasteten Böden können bis >1.000 mg Kupfer/ kg auftreten (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Nach Scheffer & Schachtschabel (2002) wurde für verschiedene Pflanzen eine Kupfer-Toxizität bei Kupfer-Gehalten über ca. 20-35 mg/kg Trockensubstanz der Blätter festgestellt.

Durch Kupfer-Überschuss kann Eisen-, Zink- und Molybdänmangel bei Pflanzen ausgelöst werden (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

### **3.3.2 Eisen (Fe)**

Atommasse 55,8 amu, Dichte 7,8 g/cm<sup>3</sup>

Mit 4,2% ist Eisen eines der häufigsten Metalle in der kontinentalen Kruste. Der Gesamtgehalt an Eisen in Böden beträgt häufig zwischen 0,2% und 5%. Das Eisen liegt unter aeroben Bedingungen im Boden als Eisen(III)-Oxid und in silikatischer Bindung vor (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Unter den Oxiden sind Goethit und Hämatit außerordentlich stabile Verbindungen, in denen das Eisen unter oxidierenden Bedingungen in einer für Pflanzen kaum verfügbaren Form vorliegt. Unter anaeroben Bedingungen können Eisen(III)-Oxide zu  $\text{Fe}^{2+}$  Ionen reduziert werden und somit hohe  $\text{Fe}^{2+}$  Konzentrationen in der Bodenlösung und im Grundwasser entstehen (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Die Verfügbarkeit von Eisen in Böden wird nach Scheffer & Schachtschabel (Scheffer & Schachtschabel, 2002) unter aeroben Bedingungen vor allem durch Wechselwirkungen zwischen schlecht kristallinen Eisen(III)-Oxiden und löslichen organischen Komplexbildnern bestimmt, durch welche lösliche Eisen(II, III)-Komplexe gebildet werden. Diese Mobilisierung von Eisen und anderen Nähr-/ Schadelementen wird durch Wurzelexudate der Pflanze, lösliche Fulvo- und

Huminsäuren sowie durch mikrobiell gebildete oder beim Abbau organischer Substanzen freigesetzte Komplexbildner bewerkstelligt (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Eisen ist für Pflanzen, Tiere und Menschen ein unentbehrliches Element, welches nur in Spuren benötigt wird. Eisen ist zwar kein Bestandteil des Chlorophylls, wird jedoch für die Chlorophyllbiosynthese benötigt. Eisenmangel führt daher zu Chlorophyllmangelerscheinungen (Strasburger *et al.*, 1991). Ein Überschuss an Mangan oder anderen Schwermetallen kann zu Eisenmangel führen. Der Gehalt an Eisen in Pflanzen beträgt ca. 30-500 mg/ kg Trockensubstanz (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Eisen-Toxizität kann unter anaeroben Bedingungen durch hohe  $Fe^{2+}$ -Konzentrationen in der Bodenlösung und im Grundwasser (bis > 1.000 mg/l) ausgelöst werden (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

### **3.3.3 Mangan (Mn)**

Atommasse 54,9 amu, Dichte 7,5 g/cm<sup>3</sup>

In der kontinentalen Kruste liegt der mittlere Mangan-Gehalt bei 800 mg/kg, der Mangan-Gehalt der Böden beträgt zwischen 40 und 1.000 mg/kg. Mangan kommt in Böden vor allem als Mangan-Oxid sowie in Silikaten, Carbonaten und organischen Komplexen gebunden vor. In austauschbarer und gelöster Form tritt es als  $Mn^{2+}$  auf. Oft treten Mangan-Oxide und Eisen-Oxide assoziiert auf (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

In Bodenlösung liegt Mangan in Form von Ionen und organischen Komplexen vor. Es bildet von allen Schwermetallen im Boden die instabilsten Komplexe und kann daher leicht von anderen Kationen verdrängt werden. Saure Böden weisen Mangan zum größten Teil als  $Mn^{2+}$  Ion in der Bodenlösung vor. Der Mangan-Gehalt der Bodenlösung in unbelasteten sauren Waldböden liegt zwischen 0,02 und 30 mg/l. Mangan-Oxide und Mangan-Komplexe sind die wichtigsten Mangan-Reserven für die Pflanzen, sie stehen mit den  $Mn^{2+}$  Ionen in der Bodenlösung im pH-abhängigen Gleichgewicht (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Das Sinken um eine pH-Einheit erhöht die Löslichkeit des Mangans im Boden und bewirkt somit eine bis zu 100 fache Zunahme der  $Mn^{2+}$ -Konzentration, ebenso können Pflanzen durch Ausscheidung von Wurzelexudaten (z.B. Maleinsäure) eine  $Mn^{2+}$  Bildung bewirken (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Mit steigendem pH-Wert sinkt der Anteil des löslichen Mangans im Boden und somit die Mangan-Aufnahme durch die Pflanzen. Dies kann in schwach sauren bis alkalischen Böden zum Manganmangel führen. Bei einem Mangangehalt von 40-150 mg/kg

Trockensubstanz ist eine optimale Manganversorgung der Pflanze gegeben (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

### ***3.4 Ökologie und Vegetation***

#### ***3.4.1 Typen der Schwermetallstandorte***

Ernst (1974) unterteilt alle Schwermetallstandorte der Erde nach ihrem Ursprung in drei Kategorien, die primären, sekundären und tertiären Schwermetallstandorte.

##### Primäre Schwermetallstandorte

Von Natur aus mit Schwermetall angereicherte Böden befinden sich über Erzkörpern, die an der Oberfläche ausbeißern oder bis in die oberflächennahen Zonen höchstens bis zu 30 m Tiefe reichen (Ernst, 1974). Nach Ernst (1974) sind diese lokalen Zonen der erhöhten Schwermetallkonzentrationen durch eine anormal hohe Schwermetallkonzentration in Boden, Vegetation und Gewässern gekennzeichnet. Diese Art der Anreicherung kann nahezu vergleichbare Ausmaße erreichen wie anthropogen entstandene Schwermetallstandorte. Weitere Quellen, deren Bedeutung für die Bildung von Schwermetallstandorten aber eher gering ist, stellen beispielsweise vulkanische Aktivitäten dar. Hierbei werden die Schwermetalle als partikelförmige Emissionen an die Oberfläche gebracht. Die spontane Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien, z. B. ein Waldbrand, zählt auch zu natürlichen Quellen einer Schwermetallkontamination (Ernst, 1974), (Hus, 2008).

##### Sekundäre Schwermetallstandorte

Unter sekundären Schwermetallstandorten fasst man jene Kontaminationen zusammen, die auf anthropogene Aktivitäten (Industrie, Verhüttung von Metallen, Raffinerieindustrie) zurückzuführen sind. Durch Abbau von Erzvorkommen oder durch Wiederverarbeitung von Metallschrott werden Schwermetalle freigesetzt. Neben dem metallhaltigen Abraummaterial spielen die Abfallerze (Nebenprodukte des Mahlens) eine wichtige Rolle. Die Erze werden in eine metallreiche Fraktion und in eine Abfallfraktion getrennt. Diese Trennung erfolgte in vergangenen Bergbauzeiten meist unvollständig, sodass ein Teil der Metalle in den Abfallerzen zurückbleibt. In diesem Abraum ist daher eine erhöhte Schwermetallkonzentration zu finden, wie es auch am Knappenberg auf der zu untersuchenden Abraumhalde der Fall ist. Ernst (1974) zählt Schmelzöfen, Raffinerien und Gießereien als Emissionsquelle von metallischen Partikeln auf, welche im Umland hohe Schwermetallkontaminationen in Boden und Vegetation hervorrufen. Auch die Landwirtschaft ordnet Ernst (1974) als eine bedeutende großflächige Quelle für

Umweltverschmutzung durch Schwermetalle ein und unterteilt den Ursprung in zwei Kategorien. Zum Einen die Schwermetall haltigen (z.B. Kupfer, Arsen, Mangan, Quecksilber) Pestizide, zum Anderen der Gebrauch von kontaminiertem Klärschlamm, Kompost und Düngemittel (Kadmium, Zink, Uran).

Die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Elektroindustrie und chemische Industrie sind weitere anthropogene Schwermetallquellen.

### Tertiäre Schwermetallstandorte

Von tertiären Schwermetallstandorten spricht man, wenn es zu einer Verlagerung der Schwermetalle von ihrem ursprünglichen Ausgangsort kommt. Der wichtigste Fall ist die Verlagerung schwermetallreicher Sedimente in Flüssen, welche dann speziell in Überschwemmungsgebieten abgelagert werden (Ernst, 1974), (Hus, 2008).

### **3.4.2 Abraumhalden**

Abraumhalden stellen sowohl aus pflanzenphysiologischer als auch aus ökologischer Sicht Sonderstandorte dar. Sie stellen durch spezifischen Stressfaktoren und das Vorhandensein von erhöhten Schwermetallkonzentrationen hohe Anforderungen an die Lebens- / Überlebensfähigkeit der Pflanzen. Zu solchen Stressfaktoren zählen beispielsweise geringes Wasserhaltevermögen, Nährstoffmangel, hohe Einstrahlung und Beweglichkeit des Substrates (Punz & Maier, 1999).

Nach Emmerer *et al.* (2003) fehlt auf den Halden häufig über lange Zeit eine Vegetationsbedeckung, da die Entwicklung der Bodenfauna und damit der Bodenbildungsprozess im Bereich von Schwermetallstandorten nur sehr langsam ablaufen.

Von der Umgebung hebt sich die zu untersuchende Abraumhalde, wie bereits von Emmerer *et al.* (2003) beschrieben, deutlich ab durch

- die extremen abiotischen Bedingungen (sehr hohe Kupfergehalte, siehe Ergebnisse) und die daraus resultierende Einzigartigkeit dieser Habitate
- eine geringe Artenvielfalt der Gefäßpflanzen bedingt durch die physiologisch extremen Bedingungen
- die Dominanz von Kryptogamen (sowohl Moose als auch Flechten)

### 3.4.3 Metallophyten

Da Schwermetalle, besonders Blei, Kadmium, Kupfer und Zink, auf viele Pflanzen in höheren Konzentrationen toxisch wirken, können an entsprechenden Standorten nur besonders angepasste Sippen wachsen. Sie werden als Metallophyten i. w. S., Chalkophyten oder Galmeipflanzen (Galmei = silikatische und karbonatische Zinkerze) bezeichnet (Knolle *et al.*, 2011).

Die resistenten Pflanzen (zusammengefasst bei Hus (2008)) sind physiologisch so angepasst, dass:

- sie eine erhöhte Zufuhr von essentiellen Schwermetallen benötigen, um nicht an Schwermetallmangel zu leiden
- sie bei erhöhten Schwermetallkonzentrationen nicht unter Stress leiden
- sie bei extrem hohen Konzentrationen jedoch wieder sensitiv reagieren können

Schwermetallpflanzen haben allgemein eine geringere Substanzproduktion als ihre sensitiven Vertreter. Ursache dafür ist der hohe Energieaufwand für die Toleranzmechanismen. Handelt es sich bei dem im Überschuss vorhandenen Element um einen Mikronährstoff, so kommt es zu einer Verschiebung des ökologischen Optimums. Die toleranten Pflanzen leiden also auf normalen Böden unter Mangelerscheinungen (Abbildung 1).

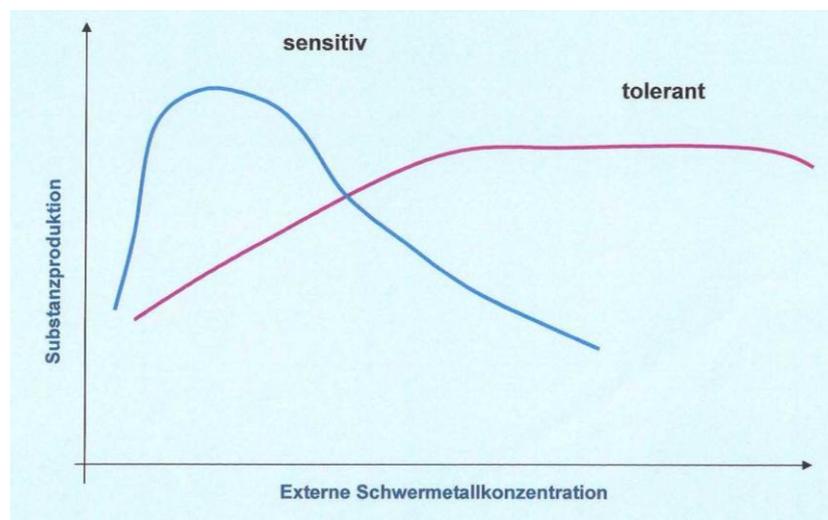


Abbildung 1: ökologische Konsequenzen der Schwermetalltoleranz (Abbildung nach Horak, 2011)

Pflanzen schwermetallreicher Böden zeichnen sich durch einen erhöhten Schwermetallgehalt in allen Pflanzenteilen mit Ausnahme der Samen aus (Ernst, 1974). Die Verlagerung der Metalle von der Wurzel zum Spross ist für jede Pflanzenart und jeden Ökotyp spezifisch (Ernst, 1974), sodass unterschiedliche Schwermetallkonzentrationen in den einzelnen Pflanzenorganen

festzustellen sind. In den Wurzeln werden oft die höchsten Werte gemessen und die niedrigsten Werte meist in den Samen.

Allgemein nehmen die Schwermetallgehalte in der Pflanze mit steigendem Schwermetallgehalt im Boden zu. Mittels des Transferkoeffizienten kann der Übergang der Schwermetalle vom Boden in die Pflanze beschrieben werden:

$$\text{Transferkoeffizient} = \frac{\text{Schwermetall – Gesamtgehalt in der Pflanze}}{\text{Schwermetall – Gesamtgehalt im Boden}}$$

Je leichter die Aufnahme der Schwermetalle vom Boden in die Pflanze ist, desto größer ist der Wert für den Transferkoeffizienten (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

#### **3.4.4 Strategien der Schwermetall - Toleranz**

Der Begriff „Sensitivität“ beschreibt den Effekt, dass der Stress eine Schädigung oder den Tod der Pflanze bewirkt. Nach Levitt (1972) sind zwei Strategien der Schwermetallresistenz zu unterscheiden. Pflanzen können durch Vermeidung der Schwermetallaufnahme, der „*avoidance*“, den durch Schwermetalle hervorgerufenen Stress unterbinden. Die zweite Resistenzstrategie basiert auf Toleranz. Die Pflanzen nehmen Schwermetalle auf und müssen dann für eine interne Entgiftung sorgen, d.h. es muss eine Bindung in ungiftiger Form erfolgen („*tolerance*“).

Sieghardt (1985a; 1985b; 1987; 1989) zeigt bei seinen anatomisch-histochemischen Untersuchungen die Bedeutung der Endodermis bei der Aufnahmevermeidung („*avoidance*“), sowie die zentrale Rolle von Oxalatkristallen (*Silene vulgaris*) und Amboßhaaren (*Erysimum sylvestre*) für die Deposition der aufgenommenen Schwermetalle („*tolerance*“) auf.

#### Anreicherungstypen bei Schwermetallpflanzen nach Baker

Erhöhte Schwermetallgehalte im Boden stellen, wie bereits erwähnt, für Pflanzen einen Stressfaktor dar. Die Pflanze scheint hierbei artspezifisch unterschiedlich zu reagieren, indem sie entweder die Schwermetalle im Spross anreichert („*Akkumulator*“), die externen Verhältnisse in der internen Konzentration widerspiegelt („*Indikator*“) oder von den oberirdischen Pflanzenteilen fernhält („*Excluder*“), Begriffe nach Baker (1981) siehe Abbildung 2. Dabei sind Übergänge möglich (Punz & Sieghardt, 1993).

Laut Hus (2008) gelten *Pinus sylvestris* und *Quercus robur* als typische Excluder und können aufgrund ihrer Symbiose mit Mykorrhizapilzen auf schwermetallreichen Standorten wachsen, ohne Schwermetalle aufzunehmen.

Eine Sonderform der Akkumulatoren stellen die Hyperakkumulatoren dar, die folgenden drei Kriterien entsprechen müssen:

- die Metallkonzentration im Spross ist mehr als 100-fach höher als in anderen Pflanzen
- das Konzentrationsverhältnis Spross/Wurzel ist  $> 1$
- das Konzentrationsverhältnis Spross/Boden ist  $> 1$

Ein großes wissenschaftliches Interesse finden Akkumulatoren und vor allem Hyperakkumulatoren bei der Phytosanierung schwermetallkontaminierter Böden. Die Pflanze nimmt Schwermetalle auf und speichert sie in der oberirdischen Biomasse, durch Ernten dieser Biomasse werden die Schadstoffe entfernt.

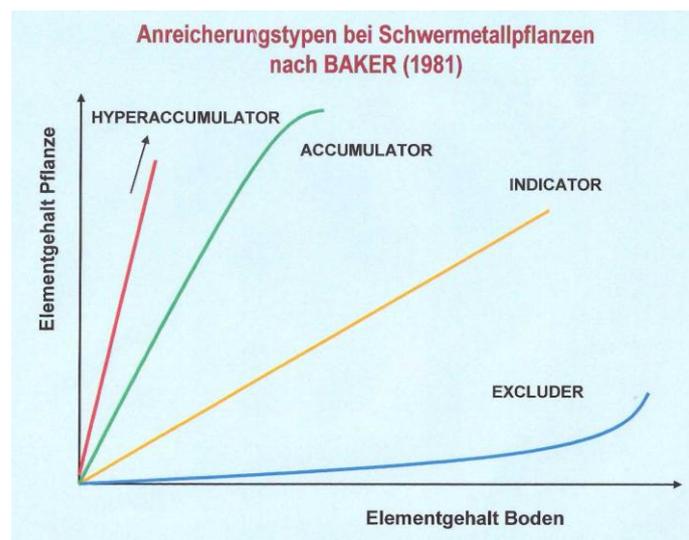


Abbildung 2: Anreicherungstypen von Schwermetallen nach Baker (1981); (Abbildung nach Horak, 2011)

### 3.5 Standort Knappenberg

Die untersuchte Abraumhalde liegt am Knappenberg in Kleinau an der Rax im Bezirk Neunkirchen (südliches Niederösterreich) auf ca. 860 Meter Seehöhe in der submontanen Höhenstufe. Die Halde (N 47° 42' 11,23", O 15° 47' 30,04") ist westlich exponiert und erstreckt sich über zwei Stufen den Hang hinab. Vom Hotel Knappenhof aus erreicht man sie nach einem etwa 10 minütigen Fußmarsch (Abbildung 3). Die Halde ist von Wald umgeben und zurzeit nur wenig vom Menschen beeinflusst. Der Knappenberg liegt im Quellschutzgebiet der Wiener Hochquellwasserleitung.



Abbildung 3: Luftbildaufnahme des Gebietes um die zu untersuchende Halde (rot umrandet), 1=erste Stufe der Halde, 2=zweite Stufe der Halde, (Quelle: <http://maps.google.at/maps?hl=de&tab=wl> , 25.09.2011)

Abbildung 4 zeigt den Blick aus dem Wald vom Hang hinab auf die erste Stufe der Abraumhalde.

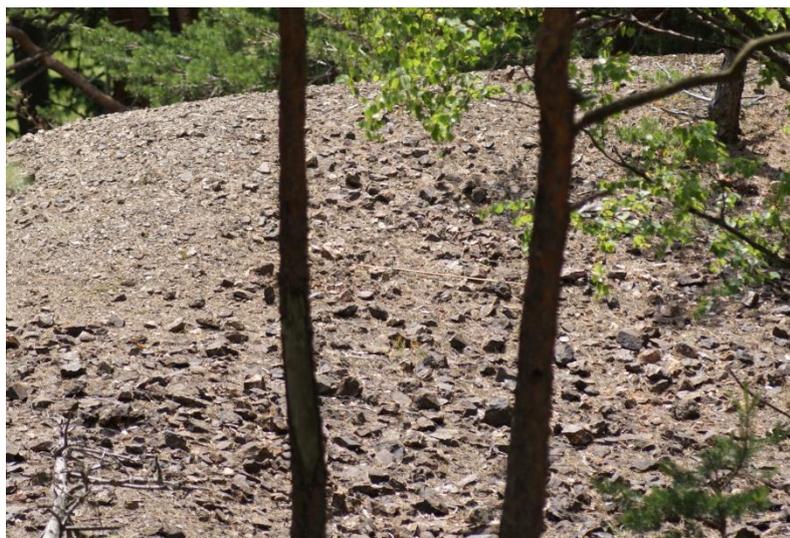


Abbildung 4: Blick auf die erste Stufe der Abraumhalde, vom Wald aus gesehen (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig)

## **3.6 Geologie und Bergbau der Halde am Knappenberg**

### **3.6.1 Geologie**

Die Halde selber ist mineralogisch sehr homogen. Man findet poröse Quarze, Kupfer gebunden als Azurit ( $\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2[\text{OH}]_2$ ), Malachit ( $\text{Cu}_2[(\text{OH})_2\text{CO}_3]$ ) und Eisen gebunden als Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Goethit ( $\alpha\text{-FeO}[\text{OH}]$ ), Siderit ( $\text{Fe}[\text{CO}_3]$ ), Ankerit ( $\text{CuFe}[\text{CO}_3]$ ) oder Limonit (z.B.: Goethit). Weitere Minerale sind Baryt ( $\text{Ba}[\text{SO}_4]$ ), Chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ), Cinnabarit in Spuren ( $\text{HgS}$ ), Fahlerz ( $\text{Cu, Ag, Fe, Zn}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ - $(\text{Cu, Fe, Ag, Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ) und Pharmakosiderit ( $\text{KFe}_4[\text{AsO}_4][\text{OH}]_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ ), (Bode, 1994).

Der primäre Kupferkies wurde sehr gut abgebaut und ist heute kaum mehr zu finden (Beran, mdl. Mitteilung). Südlich der Halde befinden sich Prebichlschichten, während die nördliche Seite über Werfener Schiefer liegt (Abbildung 6).

### **3.6.2 Bergbau**

Das Semmeringgebiet ist ein uraltes Bergbaugebiet (Abbildung 5). Die vier geologischen Großeinheiten, die dort zusammenkommen (die mesozoischen Nördlichen Kalkalpen, die paläozoische Grauwackenzone, die kristallinen Zentralalpen mit mesozoischer Beteiligung und das neogene Wiener Becken), finden ihre Entsprechung auch in verschiedenen Rohstoffvorkommen. Der Mensch hat diese von der Bronzezeit bis zum Jahre 1986 genutzt (Hackenberger, 2003).

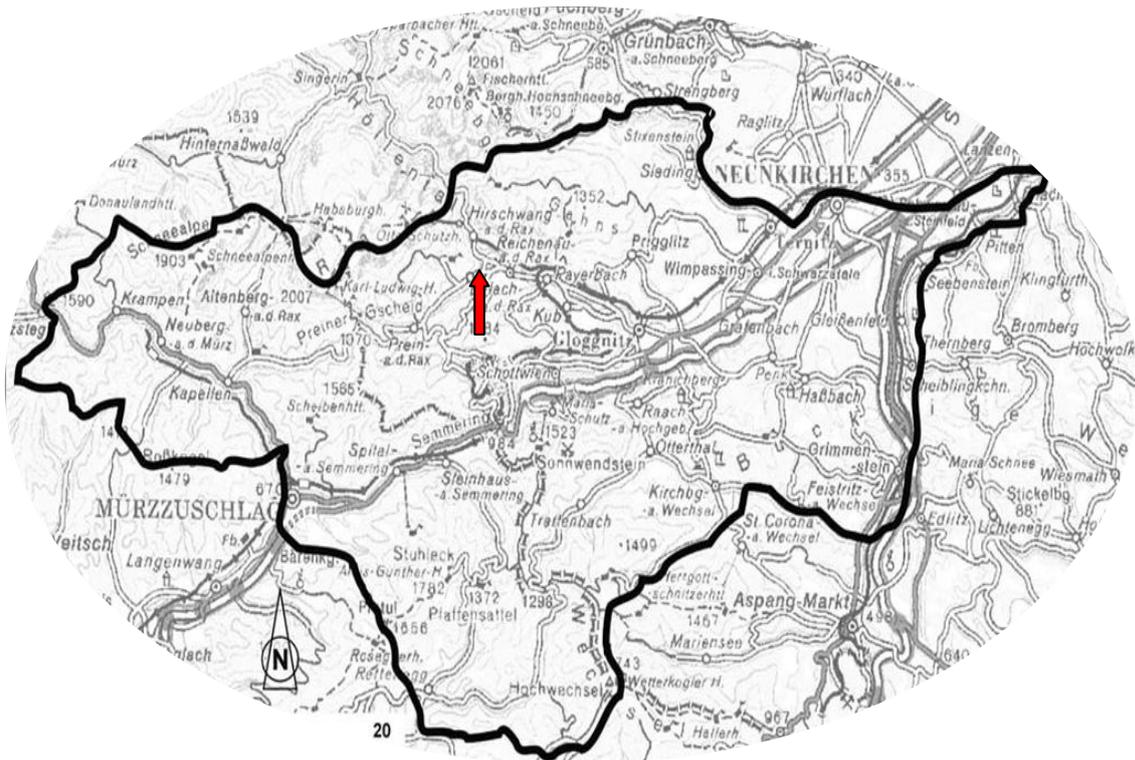


Abbildung 5: Karte des Semmeringgebietes, entnommen von Hackenberger (2003), der Pfeil zeigt die Abraumhalde;

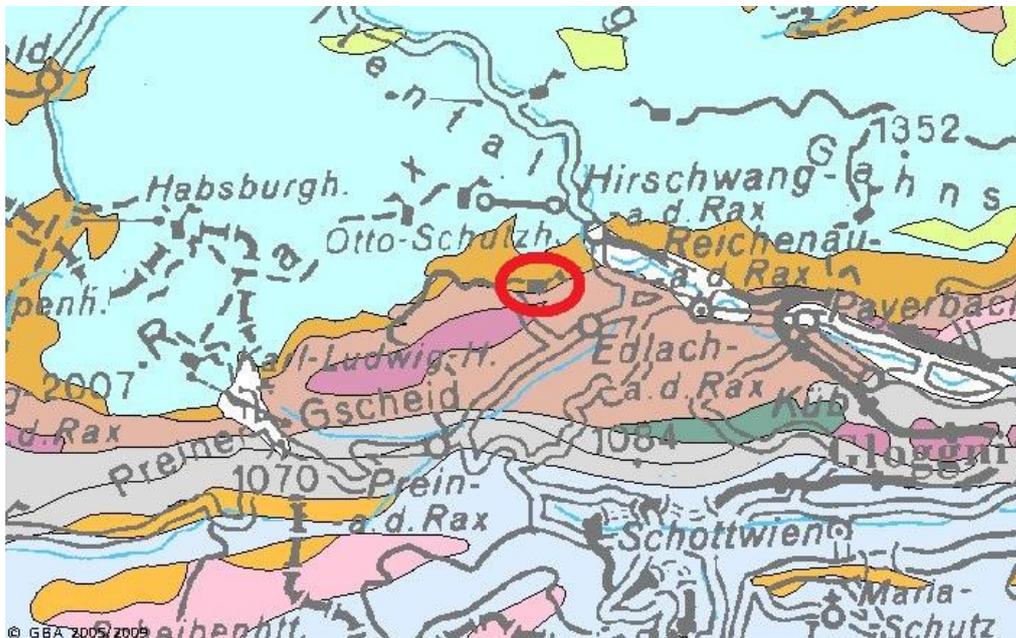


Abbildung 6: geologische Karte des Gebietes rund um den Knappenberg (rot umrandet); Maßstab 1:110900; Quelle: Weber (Weber, 1997), <http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html> (15.09.2012)

Abbildung 6 zeigt die Geologie rund um den Knappenberg. In hellblau ist das ostalpine Permomesozoikum-Trias-Unterkreide, in braun das ostalpine Permomesozoikum-Permoskyth

Klastika und zwischen den beiden, in altrosa eingefärbt, das ostalpine Paläozoikum-Altalpäozoikum dargestellt.

Hirschwang war bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts ein aktives Bergbauegebiet, in dem nach Kupfer und Eisen geschürft wurde. Es liegt in der Grauwackenzone, die aus polymiktem Konglomerat besteht (Mandl *et al.*, 2001). In der Karte (Hackenberger, 2003) in Abbildung 7 ist ersichtlich, dass am Knappenberg Eisen, Gold, Silber, Kupfer und Quecksilber abgebaut wurden.

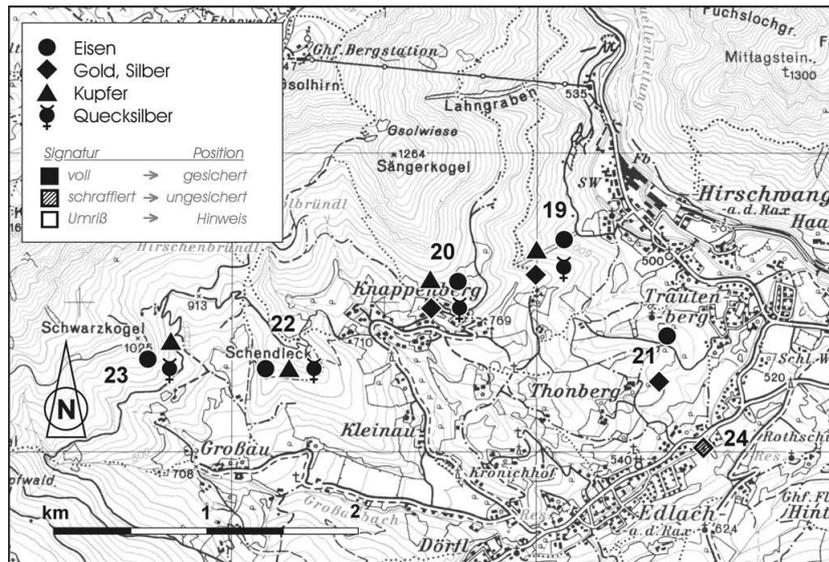


Abbildung 7: Karte (Hackenberger, 2003) des Gebietes um den Knappenberg, wo Eisen, Gold, Silber, Kupfer und Quecksilber abgebaut wurden

### 3.6.3 Chronik des Knappenbergs nach Hackenberger

Urgeschichtlicher Kupferbergbau

Mittelalterlicher Eisenbergbau

1601 Intensivierung des Eisenbergbaues durch das Stift Neuberg

1770 erster Grubenbau offen

1784 Holzschwemmen durch den „Raxkönig“ HUEBMER für Bergbau und Hütte

1786 Verkauf an Innerberger Hauptgewerkschaft

1875 im Besitz von SCHOELLER & Co

1887 Fürst SCHWARZENBERG übernimmt Hirschwang

1899–1903 Stilllegung

Bis 1939 von der Payerbacher Eisengewerkschaft

ohne Erfolg immer wieder bemustert

1939 Übernommen von Fa. Oberhütten (kein Abbau) (Hackenberger, 2003)

### ***3.7 Zielsetzung und Hypothesen***

Noch kaum geklärt ist die Relevanz des Gesamtgehaltes an Schwermetallen, wie wichtig die Schwermetall-Verbindungen sind und welche Rolle die restlichen Bodenparameter für das Vorhandensein der Vegetation spielen. Mittels Bodenanalysen und Vegetationsanalysen soll die Wirkung der unterschiedlichen Faktoren auf die Vegetation eines Modellstandortes herausgearbeitet werden.

Die zu untersuchende Halde weist mit einer Länge von etwa 200 Metern eine im Rahmen einer Diplomarbeit bewältigbare Größe auf, sodass ein dichtes Netz an Probennahmepunkten möglich ist.

Bouslama (2006) hat sich im Rahmen ihrer Diplomarbeit bereits mit dem Kupfer-Standort Hirschwang beschäftigt und eine Artenliste der Gefäßpflanzen erstellt. Für Flechten, Moose und Bodenalgae liegen noch keine Daten vor, die Vervollständigung der Artenliste wird im Rahmen meiner Diplomarbeit erfolgen.

#### Hypothesen

- Verfügbarkeit und Toxizität der Schwermetalle zeigen in verschiedenen Abschnitten des Untersuchungsgebietes signifikante Unterschiede
- die Zonierung der Vegetation ist weniger auf den Gesamtgehalt an Schwermetallen im Boden, sondern auf das Zusammenspiel weiterer Bodenparameter zurückzuführen
- bedingt durch die edaphische Heterogenität des Untersuchungsgebietes können auf begrenztem Raum unterschiedliche Vegetationszusammensetzungen beobachtet werden

## 4 Material und Methode

### 4.1 Überblick

Bei der ersten Exkursion am 08.04.2011 wurden auf der Abraumhalde und im umliegenden Wald auf Transekten insgesamt 50 Messpunkte gesetzt und eine Karte des Gebietes erstellt. Bei jedem dieser Messpunkte wurden am 07.05.2011 Bodenproben aus dem durchwurzelten Bodenbereich genommen. Auf jedem Messpunkt sind Vegetationsaufnahmen durchgeführt worden. Entlang eines Transekts quer über die Halde wurde am 10.06.2011 ein Tagesgang des Mikroklimas erstellt.

### 4.2 Boden

Der feuchte und frische Boden wurde für die Analyse von Parametern, die sich schnell verändern können, z. B. Nährstoffe, Algen und Wassergehalt, herangezogen. Der erste Teil der an jedem der 50 Messpunkte genommenen Proben wurde feucht gesiebt (Maschengröße < 2 mm) und für folgende Analysen herangezogen:

Wenn nicht anders beschrieben, handelt es sich immer um die Feinerdefraktion im Boden.

#### 4.2.1 aktueller Wassergehalt

Der aktuelle Wassergehalt entspricht jener Menge an Wasser, die zum Zeitpunkt der Bodenaufsammlung im Boden vorhanden war.

Der Feinboden wurde getrocknet und der Trockensubstanzgehalt bzw. Wassergehalt nach Differenzwägung bestimmt (Öhlinger, 1993c). 20-30 g naturfeuchter Boden wurde in ein Gefäß eingewogen und bis zur Gewichtskonstanz bei 50°C im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wurde das Gewicht der Probe ermittelt.

Berechnung der Ergebnisse:

$$\text{aktueller Wassergehalt [\%]} = \frac{\text{Netto FG} - \text{Netto TG}}{\text{TG}} * 100$$

#### 4.2.2 Algen

Pro Messpunkt wurden zwei Ansätze vorbereitet.

Die Bodeneinwaage (humoser Boden 5 g, nicht humoser Boden 10 g) wurde mit 70 ml 0,2% Natriumpyrophosphat ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) versetzt (Gärtner, 1993) und 2 min ruhen gelassen. Anschließend füllte man die Suspension mit destilliertem Wasser (*A.dest*) auf 100 ml auf und stellte die Ansätze für 10 min bei 100 rpm (round per minute) auf den Schüttler.

In einer Petrischale trug man die Suspension unter sterilen Bedingungen ca. 2-3 mm hoch auf ein Nährmedium auf und verschloss diese mit Parafilm (Medium nach Chu, pH-Wert 5,5, mit 1% Agar versetzt, zusätzlich wurden 111 mg/kg Kupfer als Kupfer EDTA hinzugefügt, (Gärtner, 1993)). In einem Klimaschrank konnten die Kulturen sich bei 20°C entwickeln. Die Überprüfung der Petrischalen auf Algenkulturen erfolgte alle 2-3 Wochen.

#### **4.2.3 Calciumchlorid-Extraktion**

Zur Extraktion von Nährstoffen, ausgenommen Phosphat, ist Calciumchlorid ausgewählt worden, da es die geringste Konzentration an Ionen unter allen gängigen Extraktionsmitteln aufweist und daher die durchzuführenden Analysen am wenigsten beeinflusst.

Die Bodeneinwaage (humusreicher Boden 5 g, weniger humoser Boden 10 g) wurde mit 100 ml 0,01 M CaCl<sub>2</sub> (Calciumchlorid) versetzt (Kandeler, 1993a). Die durchmischte Probe ruhte 12 Stunden und wurde danach über Rundfilter in Greiner Tubes abfiltriert und schließlich bis zur weiteren Verwendung eingefroren aufgehoben.

#### **4.2.4 Sulfat**

Zur Sulfat – Bestimmung wurden die CaCl<sub>2</sub> Extrakte aufgetaut und nach der Beschreibung des photometrischen Sulfat-Küvettestests (Merck) 1.14791.0001 verfahren. Die Messung erfolgte im Photometer (Schimadzu UVP-2101PC) bei 450 nm.

Zur Erstellung der Eichkurve wurden folgende Eichlösungen mit Natriumsulfat hergestellt (mg Sulfat/l):

100 mg/l, 25 mg/l, 0 mg/l

Aus der Eichkurve wurde der Sulfatgehalt in der Probe ermittelt.

#### **4.2.5 Ammonium**

Die laut Beschreibung des Ammonium Küvettestests (Merck) 1.14739.0001 vorbereiteten CaCl<sub>2</sub> Proben sind bei 660 nm im Photometer gemessen worden.

Zur Erstellung der Eichkurve wurden folgende Eichlösungen mit Ammoniumnitrat (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) hergestellt (mg Ammonium/l):

100 mg/l, 50 mg/l, 5 mg/l, 3 mg/l, 0 mg/l

Aus der Eichkurve wurde der Ammoniumgehalt in der Probe ermittelt.

#### **4.2.6 Nitrat**

Zur Messung des Nitratgehalts erfolgte zuerst die Vorbereitung der CaCl<sub>2</sub> Proben, wie in der Anleitung des Nitrat – Küvettestests (Merck) 1.14563.0001 beschrieben, danach die Analyse im Photometer bei 280 nm.

Zur Erstellung der Eichkurve wurden folgende Eichlösungen mit Ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) hergestellt (mg Nitrat/l):

75 mg/l, 50 mg/l, 25 mg/l, 2,5 mg/l, 0 mg/l

Aus der Eichkurve wurde der Nitratgehalt in der Probe ermittelt.

#### **4.2.7 Phosphat**

In Soda-Extrakten wird Phosphat als blauer Phosphat-Molybdänsäure-Komplex photometrisch gemessen (Öhlinger, 1993d).

Die Bodeneinwaage (humusreiche Proben 5 g, weniger humose Böden 10 g) versetzte man mit 100 ml Soda (0,5M, pH 8,5 nach Öhlinger (1993d)) und stellte sie bei 80 rpm auf den Schüttler. Nach 12 Stunden konnte die Suspension über Rundfilter in Greiner Tubes abfiltriert und bis zur weiteren Verwendung eingefroren werden.

Der laut Gebrauchsanweisung des Phosphat-Küvettentests (Merck) 1.4543.0001 aufbereitete Soda-Extrakt wurde im Photometer bei einem Absorptionsmaximum von 720 nm analysiert.

Zur Erstellung der Eichkurve wurden folgende Eichlösungen mit Kaliummonohydrogenphosphat ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) hergestellt (mg Phosphat/l):

300 mg/l, 100 mg/l, 3 mg/l, 0 mg/l

Die Ermittlung des Phosphatgehalts in der Probe folgte aus der Eichkurve.

### Analysen mit getrocknetem Boden

#### **4.2.8 Gesteine und Geologie**

Repräsentative und geologisch typische Steine wurden zur Bestimmung der Geologie des Gebietes aufgesammelt, dokumentiert und durch Dr. Anton Beran analysiert und bestimmt.

#### **4.2.9 Grob-/ Feinfraktion**

Die im Trockenschrank bei 70°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Bodenproben wurden gesiebt (Maschengröße 2 mm), sowie Groberdeanteil (>2 mm, entspricht dem Skelettanteil) und Feinerdeanteil (< 2 mm) gewogen und das Ergebnis in [%] angegeben.

Der fein gesiebte Boden (Feinerdefraktion) wurde für folgende Versuche verwendet:

#### **4.2.10 Korngrößenverteilung**

Boden wird durch Aufschlämmen suspendiert. Nach dem Absieben der Sandfraktion wird die prozentuelle Korngrößenverteilung in einem Sedimentationsverfahren bestimmt (Öhlinger, 1993a).

10 g getrockneter und fein gesiebter (< 2 mm) Boden wurden in ein 500 ml Gefäß eingewogen und mit 10 ml destilliertem Wasser (*A.dest*) vermischt. Den befeuchteten Boden versetzte man vorsichtig mit 30%igem Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), von dem kleine Mengen (5-10 ml) so lange hinzugegeben wurden, bis die Bodenprobe nur noch schwach aufschäumt.

Die nun vorbehandelte Bodenprobe trocknete bei 45°C im Wärmeschrank. Die getrocknete Probe wurde mit 25 ml Natriumpyrophosphat-Lösung (0,1 M) versetzt und für mindestens zwei Stunden auf einen Schüttler bei 100 rpm (round per minute) gestellt. Nach der Zugabe von 200 ml *A.dest* siebte man die Aufschlämmung (Sieb mit 0,063 mm Maschenweite) und spülte mit 250 ml *A.dest* nach. Die im Sieb verbleibenden Teilchen wurden mit *A.dest* in eine Petrischale gewaschen, diese bei 50°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gewogen. Die erste Auswaage entspricht dem Sandanteil der Feinerde (hier als „Sand fein“ bezeichnet). Der Siebdurchlauf wurde in einen 500 ml Messzylinder überführt und mit *A.dest* auf 500 ml aufgefüllt.

Durch Schütteln des Messzylinders homogenisierte man den Siebdurchlauf und stellte ihn dann an einem erschütterungsfreien Ort bei konstanter Temperatur auf. In Abhängigkeit von der Temperatur erfolgte nach den in Tabelle 1 angeführten Zeiten die Entnahme und Überfuhr mit einer geeichten Messpipette von jeweils 20ml Suspension in eine zuvor gewogene, trockene Petrischale. Die bis zur Gewichtskonstanz getrockneten und gewogenen Proben bezeichnen Schluffanteil der Feinerde („Schluff fein“) und Tonanteil der Feinerde („Ton fein“).

Zur Berechnung der Korngrößenverteilung musste das Natriumpyrophosphat heraus gerechnet werden. Hierzu wurden 25 ml Natriumpyrophosphat mit *A.dest* auf 500 ml aufgefüllt und zum Homogenisieren geschüttelt. Mit einer geeichten Messpipette pipettierte man 20 ml dieser Lösung in eine Petrischale, lies den Ansatz bei 50°C bis zur Gewichtskonstanz trocknen und wog ihn.

**Tabelle 1: Temperaturabhängige Zeiten zur Entnahme der Suspension**

Raumtemperatur	Fein- / Mittelschluff	Ton
18°C	4 min 53 s	8 h 09 min
19°C	4 min 46 s	7 h 57 min
20°C	4 min 38 s	7 h 43 min
21°C	4 min 32 s	7 h 34 min
22°C	4 min 26 s	7 h 23 min
23°C	4 min 20 s	7 h 13 min
24°C	4 min 14 s	7 h 00 min
25°C	4 min 08 s	6 h 53 min

#### Berechnung der Ergebnisse in der Feinerde:

*Sand (> 0,063 mm)*

$$\text{Sandanteil [\%]} = \frac{\text{Sand netto} - \text{Natriumpyrophosphat}}{\text{Bodeneinwaage}}$$

*Fein- / Mittelschluff ( 0,002 – 0,02 mm)*

$$\text{Schluffanteil [\%]} = \frac{\text{Schluff fein} - \text{Natriumpyrophosphat} - \text{Ton fein}}{\text{Bodeneinwaage}}$$

*Ton (< 0,002 mm)*

$$\text{Tonanteil [\%]} = \frac{\text{Ton fein} - \text{Natriumpyrophosphat}}{\text{Bodeneinwaage}}$$

*Grobschluff ( 0,02 – 0,063 mm)*

$$\text{Grobschluffanteil [\%]} = 1 - \text{Humusanteil} - \text{Sandanteil} - \text{Schluffanteil} - \text{Tonanteil}$$

Diese Ergebnisse beziehen sich auf den Feinboden (<2 mm).

#### **4.2.11 Humusbestimmung**

Kaliumdichromat wurde durch die organische Substanz eines Bodens zu Chrom(III) reduziert, anschließend Chrom(III) kolorimetrisch bestimmt und stellt so ein Maß für den Humusgehalt des Bodens dar (Kandeler, 1993b).

Diese Methode kann angewendet werden, da auf der Halde nur geringe Mengen an Sulfiderzen vorhanden sind. Große Mengen an Sulfiderzen würden den Test verfälschen (Steinhauser, pers. Mitteilung).

Pro Messpunkt wurden zwei Ansätze durchgeführt. Die Humusbestimmung in der Feinerde erfolgte nach der ÖNORM L 1081 (1989) „Humusbestimmung durch Na<sub>2</sub>Oxidation“ (1989). Der Einwaage (2 g trockener Feinboden, bei humusreichen Böden 1 g) fügte man 20 ml Kaliumdichromat-Lösung hinzu. Unter dem Abzug wurden vorsichtig (Siedeverzug!) 15 ml Schwefelsäure dazu pipettiert. Es folgten 2-3 Stunden, in denen die Probe reagieren konnte.

Anschließend füllte man die Ansätze mit *A.dest* auf 100 ml auf, und lies sie über Nacht stehen.

Die Vorbereitung der Eichreihen-Lösungen (Tabelle 2) erfolgt mit Myo-Inosit, welches mit Dichromat reagiert (Kandeler, 1993b).

**Tabelle 2: Myo-Inosit Einwaage [mg] zur Herstellung der Eichreihe bezogen auf 2 g Bodeneinwaage**

% Humus	Myo – Inosit Einwaage [mg]
0	-
4	116
8	232
12	348

Die Messung (drei Wiederholungen pro Ansatz) wurde am nächsten Tag im Photometer (Schimadzu UVP-2101PC) bei einem Absorptionsmaximum von 570 nm durchgeführt und die von der Eichreihe abgelesenen Ergebnisse in % - Humus angegeben.

#### **4.2.12 Wasserhaltekapazität im Boden**

Gesiebter Boden wurde mit Wasser gesättigt und das überschüssige Wasser unter definierten Bedingungen abgelassen. Der im Boden verbleibende Wassergehalt stellt die maximale Wasserhaltekapazität dar (Öhlinger, 1993b).

Zur Bestimmung des Wasserhaltevermögens (WHC, *Water holding capacity*) wurde ein Trichter mit einem Rundfilter ausgekleidet und mit trockenen Feinboden bis knapp unter den Trichterrand befüllt. Der Boden wurde solange mit *A.dest* angefeuchtet, bis die gesamte Probe durchnässt war. Den gesättigten Ansatz befüllte man bis zum Filterrand mit *A.dest* und lies das Wasser eine definierte Zeit (30 min) abtropfen. Nach 30 min wurde der Ansatz (Filter + Boden) in eine Petrischale gelegt und gewogen (brutto feucht). Darauf folgte die Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C und abermals das Wiegen (brutto trocken).

Um das Gewicht des Filterpapiers heraus rechnen zu können, wurden fünf Stichproben des Filterpapiers trocken und feucht gewogen und der Mittelwert errechnet.

Berechnung des Ergebnisses (bezogen auf die Feinerde):

$$\text{Wasserhaltekapazität [\%]} = \frac{\text{Wassergehalt [g]}}{\text{Boden netto trocken [g]}}$$

$$\text{Sättigungsgrad [\%]} = \frac{\text{Wassergehalt [g]}}{\text{Wasserhaltekapazität [\%]}} \times 100$$

#### **4.2.13 Ammoniumnitrat – Extraktion Boden**

Diese Extraktion dient zur Bestimmung der austauschbaren (Pflanzen verfügbaren) Schwermetalle im Boden (Basta & Gradwohl, 2000). 10 g trockener Feinboden wurde in 100 ml Erlenmeyerkolben eingewogen und mit 1 M Ammoniumnitrat-Lösung auf die 100 ml Marke

aufgefüllt, über Nacht auf den Schüttler (20 rpm) gestellt und in Greiner Tubes abfiltriert. Mit einem geeichten pH-Meter wurde der potentielle pH-Wert ermittelt. Danach wurden 100 µl Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) zur Erhöhung der Stabilität hinzugegeben und die Proben im Tiefkühler aufbewahrt.

Die Analyse der Proben erfolgte in einer ICP-MS (*Inductively coupled plasma mass spectrometry*), (Perkin Elmer, Elan DRCE 9000) von Dr. N. Baumann (Rossendorf, GER).

Der verfügbare Teil der Elemente [mg/kg] gibt an, welcher Anteil des Elements mit Ammoniumnitrat heraus lösbar ist. Die prozentuelle Verfügbarkeit zeigt, wie viel vom gesamt vorhandenen Element heraus lösbar ist.

Folgende Elemente wurden bei der Analyse des Ammoniumnitrat-Aufschlusses in der ICP-MS bestimmt: verfügbares Blei, Kadmium, Eisen, Kalium, Kupfer, Mangan, Zink.

#### **4.2.14 Königswasser-Extraktion**

Durch die Königswasser-Extraktion werden die in heißen oxidierenden Mineralsäuren löslichen Anteile mineralischer Nähr- und Schadelemente extrahiert (ÖNORM L 1085 (2009)). Hierbei handelt es sich um den Gesamtgehalt der Schwermetalle abzüglich der Schwermetalle in den Silikaten.

Die Einwaage (2 g trockener Feinboden) wurde mit 15 ml Salzsäure (HCl) und dann mit 5 ml Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) versetzt. Bei Karbonat reichen und humosen Böden kommt es zur teilweise kräftigen Schaumbildung. Nach Abklingen der ersten Schaumbildung erhitze man die Proben zunächst langsam für 30 min auf 60°C, erhöhte die Temperatur auf 140°C und kochte die Ansätze für 1-2 weitere Stunden. Ein Eintrocknen des Ansatzes wurde durch Zugabe von *A.dest* verhindert.

Die abgekühlten Proben wurden mit *A.dest* auf die 100 ml Marke aufgefüllt und dann über Rundfilter in Greiner Tubes abfiltriert.

Die Werte ermittelte Dr. M. Puschenreiter (Tulln, AUT) in einer ICP-MS (Perkin Elmer, Elan DRCE 9000).

#### **4.2.15 Radioaktivität**

Um festzustellen, ob auf der Abraumhalde eine erhöhte Strahlung vorliegt, wurde die radioaktive Strahlung in Milli-Becquerel (mBq) parallel zur Mikroklimamessungen an der Bodenoberfläche gemessen (Gamma Scout Geigerzähler). Die Messzeit betrug jeweils eine Stunde.

### 4.3 Vegetationsaufnahmen

Während der Vegetationsperioden wurden Vegetationsaufnahmen nach Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1964) auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> bei jedem der 50 Messpunkte durchgeführt. Die Bestimmung der Gefäßpflanzenarten erfolgte nach Fischer et al. (2008), die der Moose nach Frahm & Frey (2004). Die Bestimmung der Flechten wurde freundlicherweise von Univ.-Prof. i.R. Dr. Roman Türk (Universität Salzburg) durchgeführt.

#### Skala nach Braun-Blanquet:

Die einzelnen Vegetationsschichten wurden nach der Skala von Braun Blanquet (Braun-Blanquet, 1964) aufgenommen:

0 = fehlend

r = sehr selten (1-5 Exemplare)

+ = spärlich mit sehr geringem Deckungsgrad (< 1%)

1 = 1 – 4%

2 = 5 – 24%

3 = 25 – 49%

4 = 50 – 74%

5 = 75 – 100%

Nach Erstellung einer Artenliste wurden die Messpunkte angelehnt an die Einteilung Emmerers et al. (2003) nach Leitarten wie folgt in Cluster aufgeteilt:

- Halde (Moose, Flechten) Moose und Flechten dominieren; Farne und Blütenpflanzen fehlen gänzlich;
- Halde (Rumex acetosella) Moose und Flechten dominieren; vereinzelt kommt auch *Rumex acetosella* vor;
- Waldrand (Rumex acetosella) zusätzlich zu den Kryptogamen und *Rumex acetosella* treten die erste Gehölze auf;
- Wald (Vaccinium myrtillus) Rotföhre (*Pinus sylvestris*) dominiert, im Unterwuchs ist *Vaccinium myrtillus* stark vertreten;
- Wald (Avenella flexuosa) Rotföhre (*Pinus sylvestris*) dominiert, im Unterwuchs ist *Avenella flexuosa* die dominante Art;
- Wald (Avenella flexuosa, Vaccinium myrtillus) Rotföhre (*Pinus sylvestris*) dominiert; im Unterwuchs sind sowohl *Avenella flexuosa* als auch *Vaccinium myrtillus* vorhanden; typische Zeigerarten für Schwermetallstandorte fehlen;

## 4.4 Analyse von *Rumex acetosella*

Nachdem *Rumex acetosella* die Kupfer-resistenteste Gefäßpflanze auf diesem Standort ist, wurde diese Pflanze ausgewählt um weitere Versuche durchzuführen.

### 4.4.1 Photosyntheseleistung *Rumex acetosella*

Auf jedem mit *Rumex acetosella* bewachsenen Messpunkt wurde die Photosyntheseleistung dieser Pflanze analysiert (Abbildung 8).

Mittels des Chlorophyll-Fluorometers (Hansatech Instruments Handy PEA 2728) wurde an dunkel-adaptierten Blättern die potentielle (maximale) Quanteneffizienz des Photosystems II ( $F_v/F_m$ ) berechnet, indem die minimale Fluoreszenz ( $F_0$ ) und die maximale Fluoreszenz ( $F_m$ ) während eines lichtsättigenden Pulses gemessen wurden



Abbildung 8: Chlorophyll Fluorometer mit Clips an die Blätter von *Rumex acetosella* angebracht;

(Ernst, 2007). Dies erfolgte, indem man Clips auf den Blättern anbringt und den Schieber schließt. Nach 20 Minuten Wartezeit konnte das Fluorometer an die Clips angeschlossen, der Schieber geöffnet und die Werte gemessen werden (Einstellungen: ein Blitz mit 1 sec Dauer, Intensität 1,5 mmol Photonen  $m^{-2}s^{-1}$ , Wellenlänge 650 nm).

### 4.4.2 Salpetersäure Extraktion *Rumex acetosella*

Um den Elementgehalt von *Rumex acetosella* zu bestimmen, wurden die oberirdischen Teile der Pflanzen, bei denen zuvor die Photosynthesemessungen durchgeführt worden waren, geerntet, mit *A.dest* gründlich gewaschen und luftgetrocknet. Die Einwaage (0,1 g getrocknetes Pflanzenmaterial) erfolgte in 25 ml Rundkolben und wurde mit 5 ml Salpetersäure versetzt. Nach kurzem Einwirken kochte man die Proben zwei Stunden. Um ein Austrocknen zu verhindern wurde nach Bedarf mit *A.dest* nachgefüllt.

Die ausgekühlten Proben wurden bis zur 25 ml Marke mit *A.dest* aufgefüllt und über Rundfilter in Greiner Tubes abfiltriert.

Zur Elementanalyse wurden die Proben in einer ICP-MS (Perkin Elmer, Elan DRCe 9000) von Dr. M. Puschenreiter in Tulln (AUT) gemessen.

## 4.5 Mikroklima

### 4.5.1 Klimamessung

Die Mikroklimamessungen erfolgten am 10.06.2011, einem durchschnittlich warmen, schönen Sommertag (ZAMG, 2002).

Das Mikroklima wurde nur an einem repräsentativen Tag gemessen, da das Hauptaugenmerk bei den Unterschieden zwischen Halde und umgebendem Wald und nicht bei der Auswertung des Klimas über eine Saison liegt.

Zur Analyse des Klimas erfolgte die Messung von folgenden Parametern entlang eines Transekts (sowohl auf der Halde als auch im umliegenden Wald) auf den Messpunkten HW 12, 13, 14, 15, 16 bodennah und direkt auf der Halde (HW 14) zusätzlich in 2 m Höhe:

- Lufttemperatur in Grad Celsius (Voltcraft VC 4 in 1)
- Einstrahlung und Reflexion in Lux (Voltcraft VC 4 in 1)
- Bodentemperatur, Bodenoberflächentemperatur (Voltcraft IR 260-8S Infrarot-Thermometer) in Grad Celsius; zur Messung der Bodentemperatur wird ein Voltcraft K 202 Datalogger Thermometer verwendet, welches an Bodenfühler angeschlossen ist. Die Bodenfühler werden in 10 cm Tiefe und 30 cm Tiefe eingegraben. Gemessen wird das Eindringen der Wärme in den Boden durch Vergleich der Temperaturmaxima in verschiedenen Tiefen. Auf waagerechtes Einlegen der Thermometer in den Boden ist zu achten.
- Luftfeuchtigkeit in Prozent (Voltcraft VC 4 in 1)
- Bewölkungsgrad: die Bedeckung des Himmels wird auf einer Skala von 0-100% geschätzt
- Windgeschwindigkeit in Beaufort (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Beaufortskala>, 04.07.2011):
  - 0....Windstille
  - 1....leichter Zug
  - 2....leichte Brise (Blätter bewegen sich)
  - 3....schwache Brise (Zweige bewegen sich)
  - 4....mäßige Brise (dünne Äste bewegen sich)
  - 5....frische Brise (größere Äste bewegen sich)
  - 6....starker Wind (hörbar, kleinere Bäume bewegen sich)
  - 7....steifer Wind (Bäume mittlerer Stärke bewegen sich)
  - 8....stürmischer Wind (stärkere Bäume bewegen sich)

- 9....Sturm
- 10...schwerer Sturm
- 11....orkanartiger Sturm
- 12....Orkan

Die Messungen wurden von 4 Uhr früh bis 21 Uhr stündlich an jedem der dafür ausgewählten Messpunkte durchgeführt.

#### **4.5.2 Dämpfungstiefe**

Unter Dämpfungstiefe versteht man die Bodentiefe, in der sich die Spanne der täglichen Temperaturschwankung halbiert. Sie ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit des Bodens.

Berechnung der Ergebnisse:

$$Temperaturspanne\ OF = Temperatur_{max}\ OF - Temperatur_{min}\ OF$$

OF.....Bodenoberfläche

Die Bodenproben wurden zwischen der Bodenoberfläche und 30 cm Bodentiefe genommen, deswegen wird die Dämpfungstiefe zwischen Bodenoberfläche und 30 cm Bodentiefe errechnet.

$$Dämpfungstiefe\ OF\ bis\ 30\ cm = \frac{-0,3}{\ln(Dämpfungstiefe\ 30\ cm) - \ln(Dämpfungstiefe\ OF)}$$

OF.....Bodenoberfläche

ln.....natürlicher Logarithmus

Je geringer der Wert ist, desto besser isoliert der Boden.

#### **4.6 Auswertung**

Um die statistischen Analysen der erhaltenen Daten durchführen zu können, wurden die Rohdaten in Excel Tabellen eingegeben und in das Statistik Programm SPSS (IBM SPSS Statistics 20) überführt.

Werte mit einer Signifikanz von < 0,05 wurden als signifikant, Werte mit einer Signifikanz < 0,01 als hoch signifikant angegeben. Die meisten Werte sind nicht normal verteilt oder ordinal, deshalb wurden ausschließlich non-parametrische Tests verwendet.

Zur Ermittlung der signifikanten Unterschiede zwischen den Parametern kamen bei zwei Stichproben der Mann-Whitney, bei drei oder mehr der Kruskal-Wallis Test zur Anwendung.

Um eine Korrelation der Bodenparameter bzw. Pflanzenarten unter einander und mit einander zu ermitteln kam der Spearman Test zum Einsatz, wobei nur signifikante Korrelationen mit einem Korrelationskoeffizient ( $R^2$ ) > 0,2 berücksichtigt wurden.

Zur Berechnung von Modellen (die abhängige Variable soll durch andere Parameter erklärt werden) wurde eine schrittweise multiple lineare Regression durchgeführt, wobei nur signifikante Modelle mit einem korrigierten  $R^2$  ab 0,5 berücksichtigt wurden (Janssen & Laatz, 2007).

Mittels Faktorenanalyse wurde die Ähnlichkeit der Verteilung von Elementen (Gesamtgehalt) dargestellt.

Die einzelnen Messpunkte wurden nach verschiedenen Parametern klassifiziert (Tabelle 3) und in Karten dargestellt.

**Tabelle 3: Klassifizierung der Parameter**

<b>Parameter</b>	<b>Klassifizierung</b>	<b>Werte</b>
<b>Skelettanteil</b>	sehr skelettarm	<40%
	mäßig skelettarm	40,1% - 60%
	mäßig skelettreich	60,1% - 80%
	sehr skelettreich	80,1% - 100%
<b>pH-Wert</b>	extrem sauer	<3
	sehr sauer	3 – 3,5
	mäßig sauer	3,6 – 4
	schwach sauer	>4
<b>Humus fein</b>	humusfrei	<5%
	humusarm	5,1% – 10%
	mäßig humos	10,1% – 15%
	humos	>15%
<b>Ton fein</b>	tonfrei	<5%
	tonarm	5% – 7,5%
	mäßig tonhaltig	7,6% - 10%
	sehr tonhaltig	>10%
<b>Kupfer gesamt</b>	kupferfrei	<2.000 mg/kg
	kupferarm	2.001 – 4.000 mg/kg
	mäßig kupferreich	4.001 – 6.000 mg/kg
	sehr kupferreich	>6.000 mg/kg
<b>Eisen gesamt</b>	eisenfrei	<100.000 mg/kg
	eisenarm	100.000 – 150.000 mg/kg
	mäßig eisenreich	150.001 – 200.000 mg/kg
	sehr eisenreich	>200.00 mg/kg
<b>Mangan gesamt</b>	manganfrei	<5.000 mg/kg
	manganarm	5.000 – 10.000 mg/kg
	mäßig manganreich	10.001 – 15.000 mg/kg
	sehr manganreich	>15.000 mg/kg
<b>Kupfer verfügbar</b>	kupferfrei	<25 mg/kg
	kupferarm	25 – 50 mg/kg
	mäßig kupferreich	50,1 – 100 mg/kg

	sehr kupferreich	>100 mg/kg
<b>Eisen verfügbar</b>	eisenfrei	<25 mg/kg
	eisenarm	25 – 50 mg/kg
	mäßig eisenreich	50,1 – 100 mg/kg
	sehr eisenreich	>100 mg/kg
<b>Mangan verfügbar</b>	manganfrei	<0,5 mg/kg
	manganarm	0,5-1 mg/kg
	mäßig manganreich	1,1 – 5 mg/kg
	sehr manganreich	>5 mg/kg



## 5 Ergebnisse

### 5.1 Übersicht über die Halde

Die Abraumhalde zeichnet sich durch eine ausgeprägt azonale Vegetation aus, welche für einen mit Kupfer belasteten Standort relativ artenreich ist und dennoch eine deutliche Abgrenzung zum umliegenden Wald aufweist. Auf der Halde treten neben Krautigen, Moosen und Flechten vereinzelt klein gewachsene *Larix decidua* auf (Abbildung 9). Die Halde selbst ist baumfrei und umgeben von einem *Pinus sylvestris* dominierten, mitteleuropäischen Heidelbeer-Rotföhrenwald, *Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvestris*. Rund um den Messpunkt HW 46 hat sich Abraummaterial angesammelt, das jedoch stark beschattet und mit Rohhumus bedeckt ist und bei den Ergebnissen zum Wald gezählt wird.

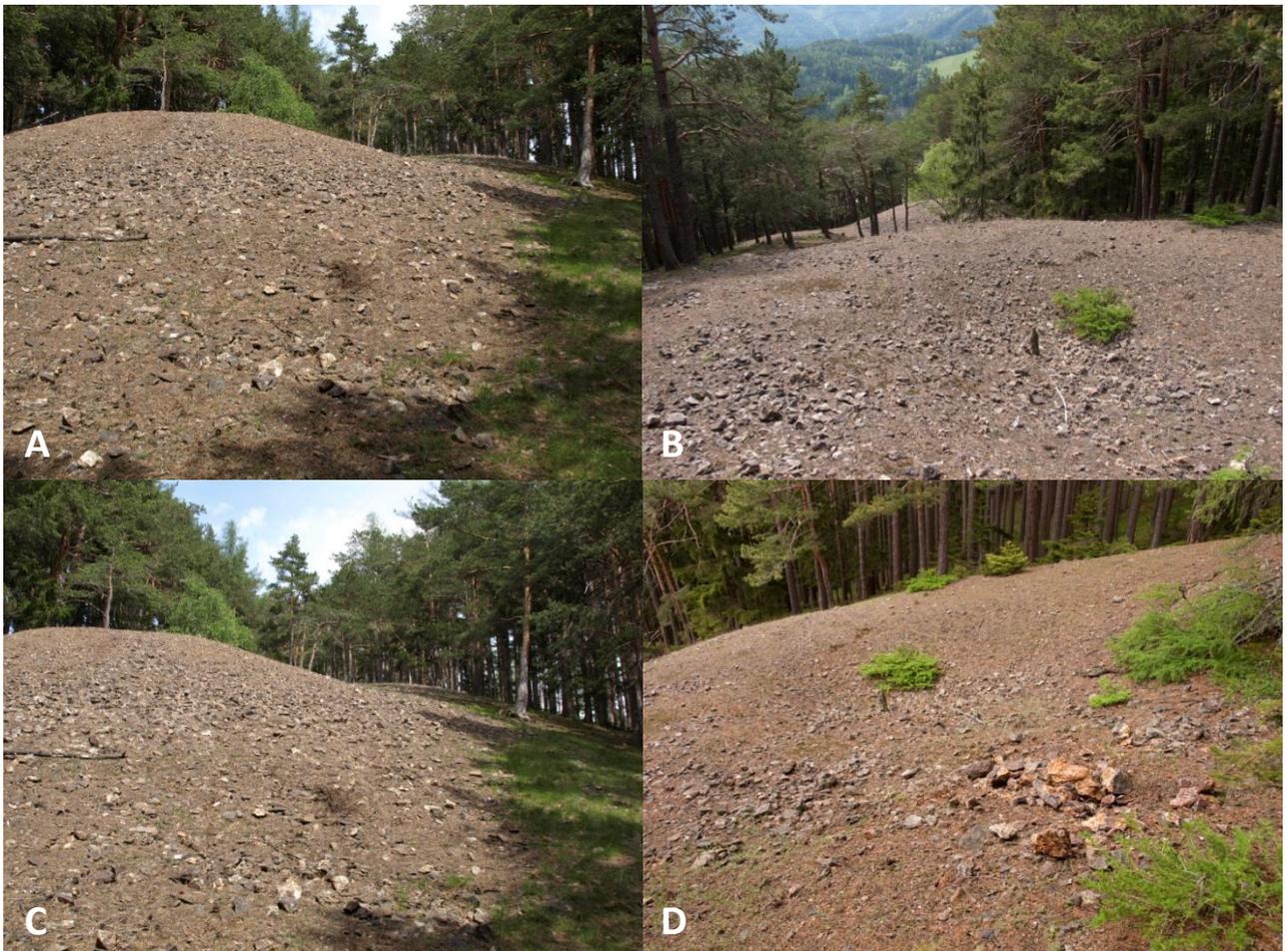


Abbildung 9: Halde und umgebender Wald dominiert von *Pinus sylvestris*, auf der Halde sind kleinwüchsige *Larix decidua* zu finden. A,C: Blick vom Fuße der Halde hinauf, rechts *Avenella flexuosa* Streifen; B,D: Blick die Halde hinunter mit kleinwüchsigen *Larix decidua* auf der Halde;

### 5.1.1 Cluster

Wie folgt werden die Messpunkte nach den festgelegten Leitarten zu Clustern zusammengefasst.

„Halde (Moose und Flechten)“ umfasst die Messpunkte HW 28, 29, welche ohne Gefäßpflanzen direkt auf der Halde an vollsonnigen Standorten zu finden sind.

„Halde (*Rumex acetosella*)“ hierzu gehören HW 9, 10, 14, 23, 35, 50; die allesamt auf der Halde liegen und neben Moosen und Flechten eine Krautschicht mit *Rumex acetosella* aufweisen.

„Waldrand (*Rumex acetosella*)“ umfasst die Messpunkte HW 8, 13, die im Halbschatten am nördlichen (linken) oberen Rand der Halde positioniert sind.

„Wald (*Vaccinium myrtillus*)“ bestehend aus HW 1, 4, 5, 7, 11, 12, 17, 19, 21, 22, 26, 32, 33, 34, 38, 45 ist vorwiegend im nördlichen (linken) Wald der Halde, vereinzelt auch im südlichen (rechten) Wald verteilt.

„Wald (*Avenella flexuosa*)“ HW 2, 3, 6, 15, 16, 18, 20, 24, 27, 30, 31, 36, 37, 39, 41, 42, 43, 46, 47, 49; sind eher im südlichen (rechten) Wald, vereinzelt auch nördlich zu finden.

„Wald (*Avenella flexuosa*, *Vaccinium myrtillus*)“ HW 25, 40, 44, 45, 48 weisen beide Leitarten auf und liegen südlich bzw. am Fuße (westlich) der Halde.

Unter „Halde“ sind die Cluster Halde (Moose und Flechten), Halde (*Rumex acetosella*) und Waldrand (*Rumex acetosella*) zusammengefasst.

Der „Wald“ umfasst Wald (*Vaccinium myrtillus*), Wald (*Avenella flexuosa*) und Wald (*Avenella*, *Vaccinium*).

Abbildung 10 zeigt die Messpunkte eingefärbt nach ihrer Cluster-Zugehörigkeit.

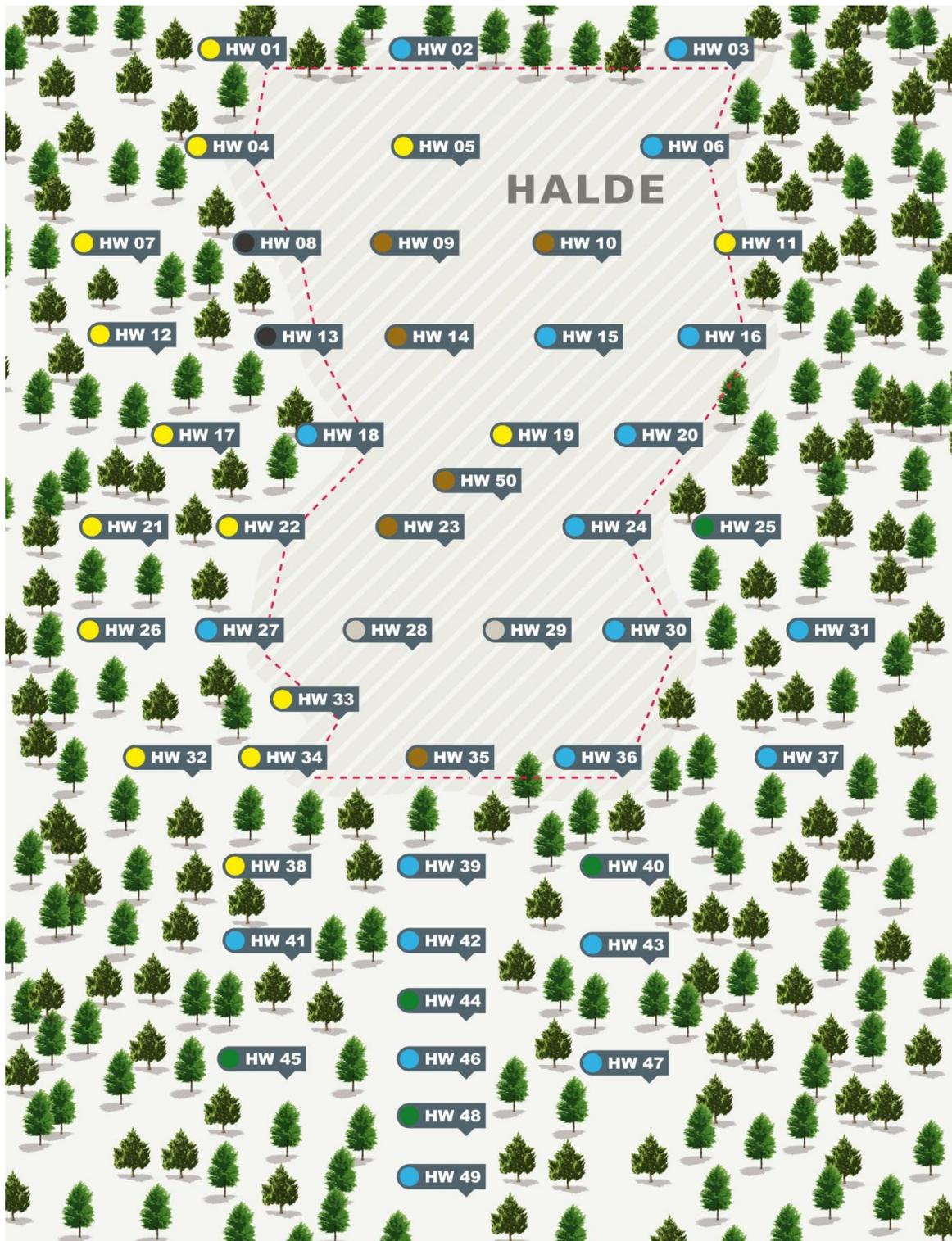


Abbildung 10: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt die Messpunkte eingefärbt nach den Clustern

Cluster	
	Halde (Moose, Flechten)
	Halde ( <i>Rumex acetosella</i> )
	Waldrand ( <i>Rumex acetosella</i> )
	Wald ( <i>Avenella flexuosa</i> )
	Wald ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )
	Wald ( <i>Vaccinium, Avenella</i> )

### 5.1.2 Radioaktivität

Die gemessene Strahlung auf der Halde beträgt  $310 \pm 13$  mBq. Es gibt keine Hinweise auf Unterschiede innerhalb der Halde.

## 5.2 Mikroklima

Die Daten stammen von Mikroklima Messungen am 10.06.2011. Abbildung 11 zeigt eine stark schwankende Kurve des Bewölkungsgrades im Tagesverlauf. Nach starker Bewölkung lichtet sich ab 6.30 Uhr die Wolkendecke etwas. Um 11 Uhr liegt die Bewölkung bei 30% und nimmt gegen 12 Uhr wieder zu. Nach Auflockern der Wolkendecke kommt es um 15 Uhr nochmal zu einem erhöhten Bewölkungsgrad, der im Verlauf bis 18 Uhr abnimmt und mit einbrechender Dämmerung bis auf 90% zulegt.

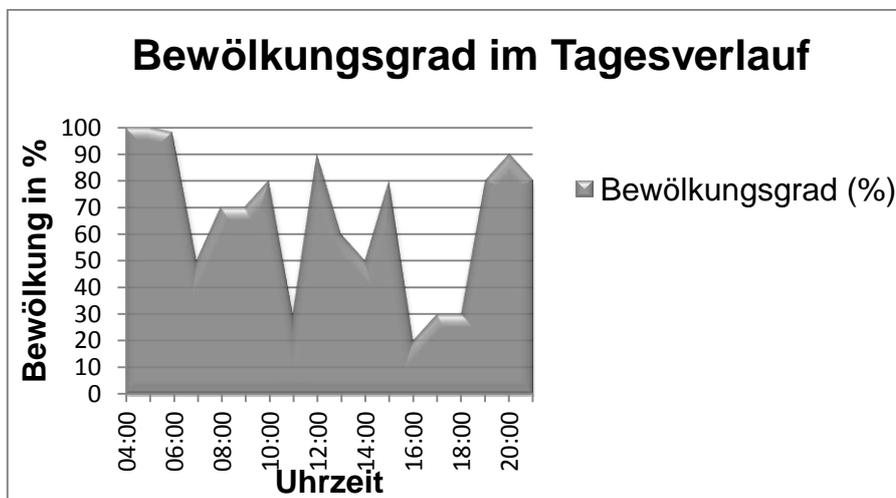


Abbildung 11: Bewölkungsgrad im Tagesverlauf

Der NW - Wind liegt bis 8 Uhr bei unter 1 Beaufort, danach nimmt der Wind im Tagesverlauf auf 2 Beaufort zu, bis er ab 16 Uhr wieder abflaut (Abbildung 12).

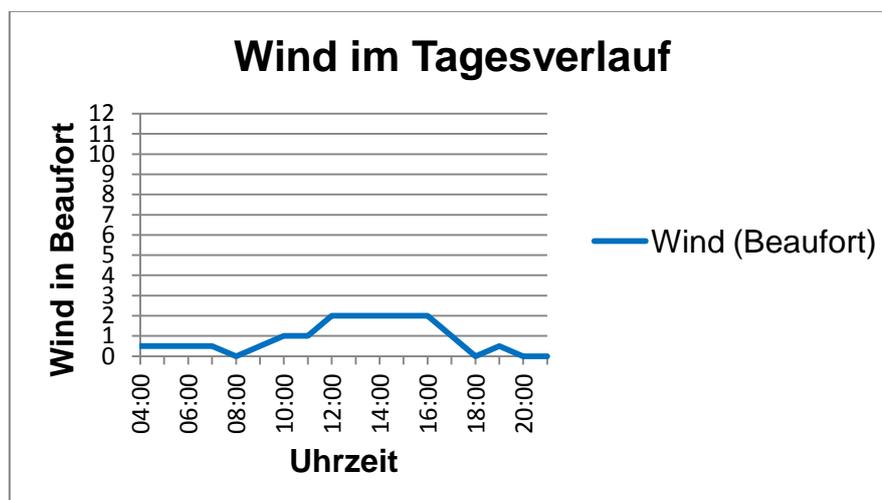


Abbildung 12: Wind im Tagesverlauf

Abbildung 13 zeigt die Lufttemperatur im Tagesverlauf auf der Halde (HW 14, HW 14/2 m Höhe) und im Wald (HW 12, 13, 15, 16). Die Lufttemperatur sinkt von 4 Uhr bis 6 Uhr in der Früh von 15°C auf 10°C und steigt im Tagesverlauf bis zur Höchsttemperatur von ca. 28°C um 16 Uhr. Aus dem Diagramm geht hervor, dass auf der Halde keine erhöhte Lufttemperatur im Gegensatz zum umliegenden Wald festzustellen ist. Auffallend ist, dass zwischen 13 Uhr und 14 Uhr die Lufttemperatur im Wald auf HW 12 und 13 mit ca. 24°C am höchsten, also auch höher als auf der Halde ist. Die ausgeglichene Temperatur wurde auf der Halde in 2 m Höhe gemessen. Tabelle 4 listet die Minimum- und Maximumwerte sowie die Spannweite auf.

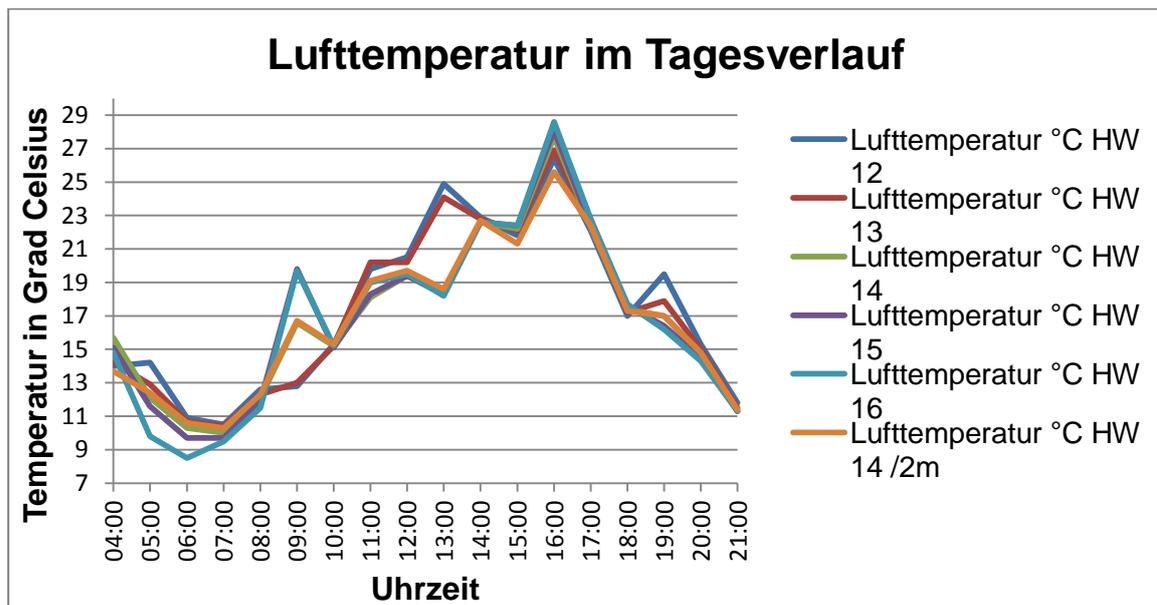


Abbildung 13: Lufttemperatur im Tagesverlauf

Tabelle 4: Minimum-, Maximumwerte und die Spannweite der Lufttemperatur im Tagesverlauf

	Minimum	Maximum	Spannweite	Durchschnitt
Lufttemperatur °C HW 12	10,5°C	26,4°C	15,9°C	18,5°C
Lufttemperatur °C HW 13	10,4°C	26,9°C	16,5°C	18,7°C
Lufttemperatur °C HW 14	10,0°C	27,7°C	17,7°C	18,9°C
Lufttemperatur °C HW 15	9,7°C	28,1°C	18,4°C	18,9°C
Lufttemperatur °C HW 16	8,5°C	28,6°C	20,1°C	18,6°C
Lufttemperatur °C HW 14 /2 m	10,3°C	25,6°C	15,3°C	17,9°C

Die relative Luftfeuchte im Tagesverlauf (Abbildung 14) nimmt entgegengesetzt der Lufttemperatur von 4 Uhr bis 6 Uhr früh von 70% auf ca. 79% leicht zu, nur auf der Halde wird um 5 Uhr früh ein Absinken auf ca. 52% registriert. Im Tagesverlauf nimmt die rel. Luftfeuchte bis 16 Uhr auf ca. 35% ab und steigt abends wieder auf ca. 65% an. Der Vergleich der Maximumwerte zeigt einen geringen Unterschied von ca. 2% zwischen den Messpunkten. Bei den Minimumwerten (Tabelle 5) tritt die geringste rel. Luftfeuchte von 25,2% auf HW 16 (östlicher, rechter Wald) auf. Die restlichen Minimumwerte liegen um 30-35%.

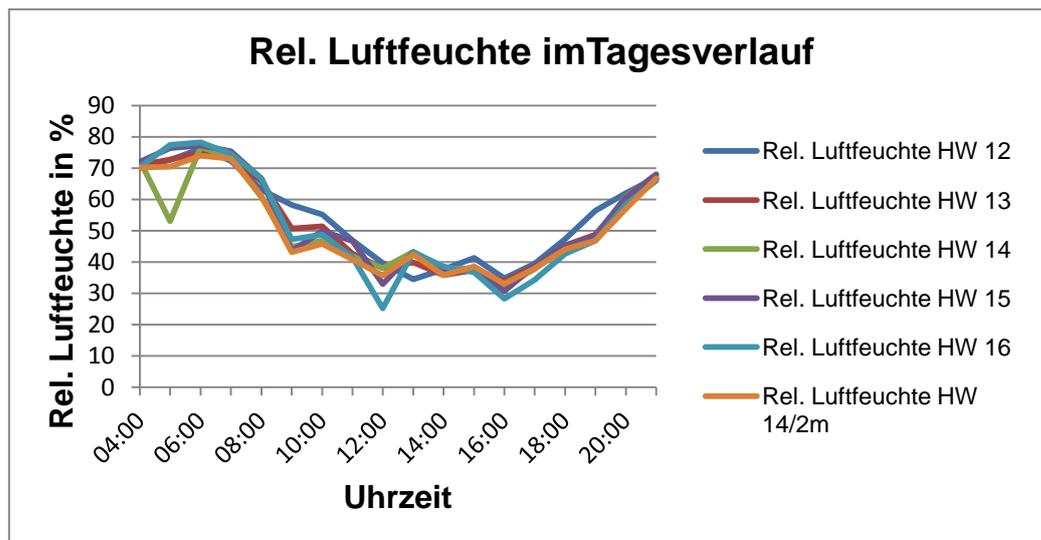


Abbildung 14: Relative Luftfeuchte im Tagesverlauf

Tabelle 5: Minimum-, Maximumwerte und Spannweite der rel. Luftfeuchte im Tagesverlauf

	Minimum	Maximum	Spannweite	Durchschnitt
Rel. Luftfeuchte HW 12	34,5%	76,2%	41,7%	55,4%
Rel. Luftfeuchte HW 13	33,8%	75,0%	41,2%	54,4%
Rel. Luftfeuchte HW 14	32,4%	76,7%	44,3%	54,6%
Rel. Luftfeuchte HW 15	30,7%	77,2%	46,5%	54,0%
Rel. Luftfeuchte HW 16	25,2%	78,2%	53,0%	51,7%
Rel. Luftfeuchte HW 14/2 m	33,1%	74,0%	40,9%	53,6%

Die Strahlung nimmt im Tagesverlauf von 4 Uhr bis 11 Uhr zu. Um 12 Uhr kommt es zu einer Minderung der Strahlung, danach steigt sie über Mittag auf ihr Maximum und sinkt ab 14 Uhr bis Sonnenuntergang. Aus Abbildung 15 und den Extremwerten in Tabelle 6 ist ersichtlich, dass die Strahlung auf der Halde (HW14) mit einem Maximum von ca. 110.000 Lux höher ist als auf den umliegenden Messpunkten mit ca. 40.000 Lux.

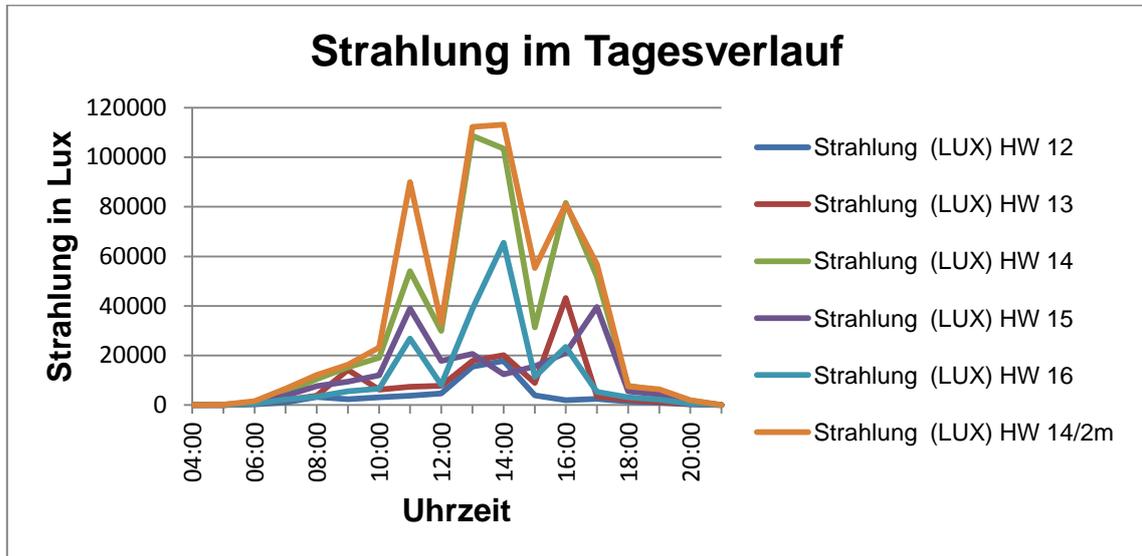


Abbildung 15: Strahlung im Tagesverlauf

Tabelle 6: Minimum-, Maximumwerte und Spannweite der Strahlung im Tagesverlauf

	Minimum	Maximum
Strahlung (LUX) HW 12	0,00	17.790
Strahlung (LUX) HW 13	0,01	43.200
Strahlung (LUX) HW 14	0,03	108.600
Strahlung (LUX) HW 15	0,02	39.600
Strahlung (LUX) HW 16	0,00	65.500
Strahlung (LUX) HW 14/2 m	0,04	113.200

Die Darstellung der Reflexion (Albedo) in Abbildung 16 lässt einen Zusammenhang mit der Einstrahlung im Kurvenverlauf erkennen, zu Beginn der Messungen leicht ansteigend bis zu Mittag die Maximumwerte erreichend und ab 15 Uhr eine Reduktion der Reflexion bis Sonnenuntergang. Auch hier ist die Reflexion auf der Halde (HW 14) um 13 Uhr mit ca. 6.000 Lux am höchsten, bestätigt durch die Minimum- und Maximumwerte in Tabelle 7.

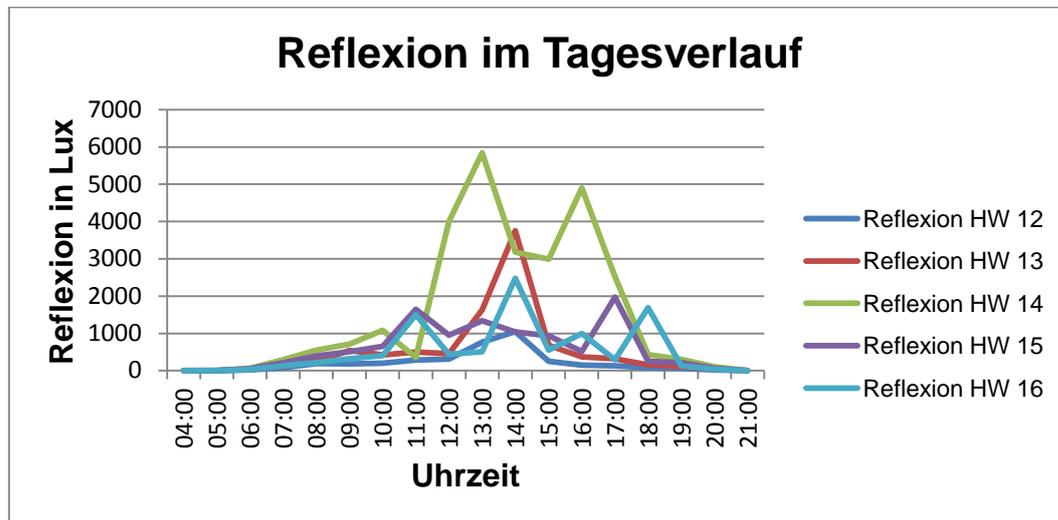


Abbildung 16: Reflexion im Tagesverlauf

Vergleicht man die Rückstrahlung zwischen Wald (HW 12, 16), Waldrand (HW 13, 15) und Halde (HW 14) auf signifikante Unterschiede bei der Rückstrahlung, wurden keine Signifikanzen festgestellt (Abbildung 17). Die Rückstrahlung liegt in allen drei Habitat-Typen zwischen 5% und 7%.

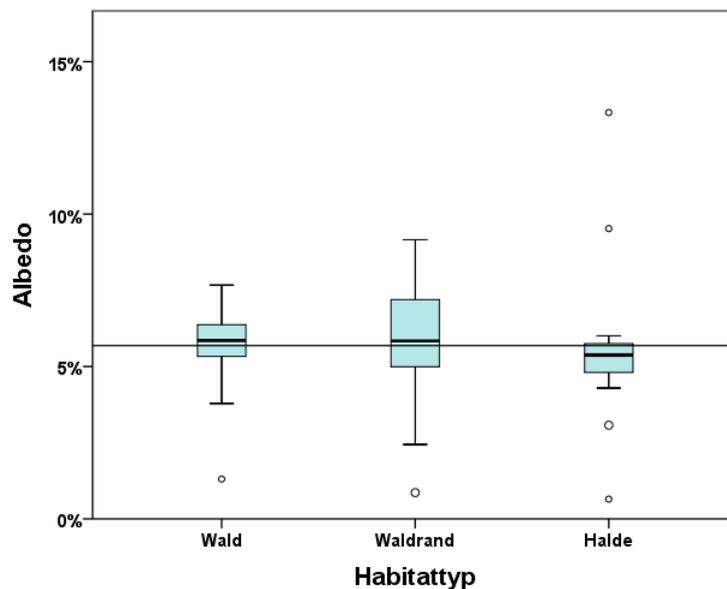


Abbildung 17: keine signifikanten Unterschiede der Rückstrahlung im Wald am Waldrand oder auf der Halde (Kruskal-Wallis Test)

Tabelle 7: Minimum- und Maximumwerte der Reflexion im Tagesverlauf

	Minimum	Maximum	Tagesmittelwert
Reflexion LUX HW 12	0,00	1.045	6,31%
Reflexion LUX HW 13	0,00	3.750	7,27%
Reflexion LUX HW 14	0,00	5.840	6,27%
Reflexion LUX HW 15	0,00	1.976	5,23%
Reflexion LUX HW 16	0,00	2.480	5,20%

Die Bodentemperatur wurde an der Bodenoberfläche (OF) in 10 cm Tiefe und in 30 cm Tiefe gemessen.

Die Messungen der Bodenoberflächentemperatur (Abbildung 18) ergeben von 4 Uhr bis 8 Uhr einen leichten, kontinuierlichen Anstieg von ca. 10 auf 15 °C. Ab 8 Uhr unterliegen die Bodentemperaturen der Messpunkte teilweise starken Schwankungen. Die Maximumwerte der Halde (HW 14) liegen mit 42,6 °C weit über den Maximumwerten der umliegenden Messpunkte (ca. 18-27 °C). Hier fällt auf, dass die Maximumwerte der Messpunkte HW 12, 13 (nördlicher Wald) um ca. 5 °C unter den Maximumwerten der Messpunkte HW 15, 16 (südlicher Wald) liegen (Tabelle 8). Die Minimumwerte hingegen liegen durchwegs gleich hoch bei ca. 10 °C.

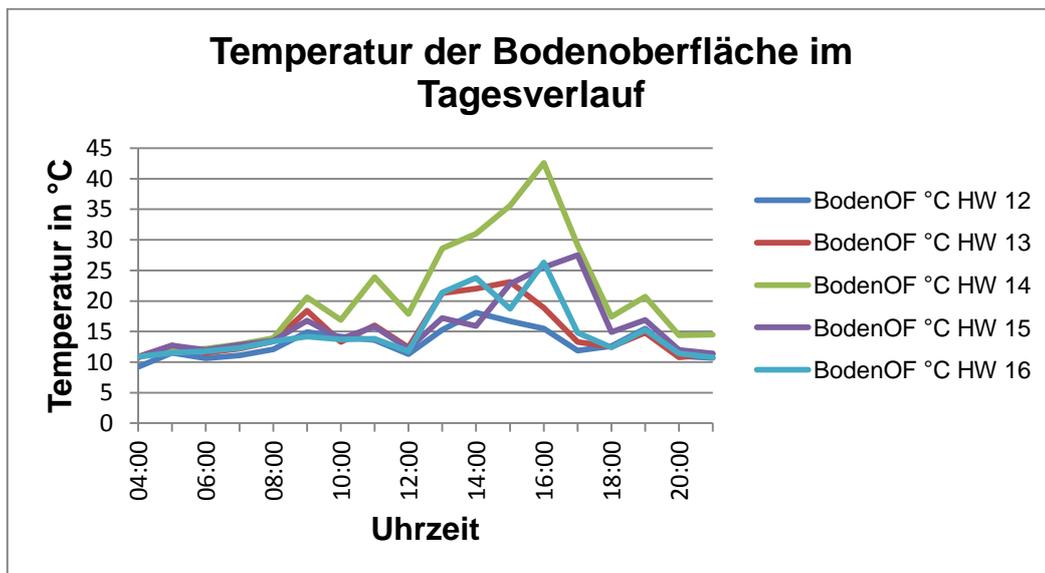


Abbildung 18: Temperatur der Bodenoberfläche im Tagesverlauf

Tabelle 8: Minimum- und Maximumwerte der Bodenoberflächen Temperatur

	Minimum	Maximum	Spannweite
BodenOF HW 12	9,2°C	18,1°C	8,9°C
BodenOF HW 13	10,8°C	23,1°C	12,3°C
BodenOF HW 14	10,8°C	42,6°C	31,8°C
BodenOF HW 15	10,8°C	27,5°C	16,7°C
BodenOF HW 16	10,8°C	26,3°C	15,5°C

In 10 cm Bodentiefe steigt die Temperatur, nach einem leichten Temperaturabfall von 5°C zwischen 4 Uhr und 7 Uhr früh, bis 14 Uhr auf 15-20°C und sinkt bis Aufnahmeende auf 10-15°C. Die Werte in 10 cm Bodentiefe weisen eine permanent höhere Temperatur beim Messpunkt HW 14 auf der Halde als im umliegenden Wald auf. Auf der Halde (HW 14) hält die Temperatur ab 14 Uhr bei ca. 20°C, erst bei der letzten Messung ist ein leichtes Absinken der Temperatur von 2°C in 10 cm Tiefe zu erkennen (Abbildung 19). Die Minimumwerte liegen zwischen 11°C und 13°C, die Maximumwerte zwischen 15,8°C (HW12) und 21°C auf HW 14 (Tabelle 9).

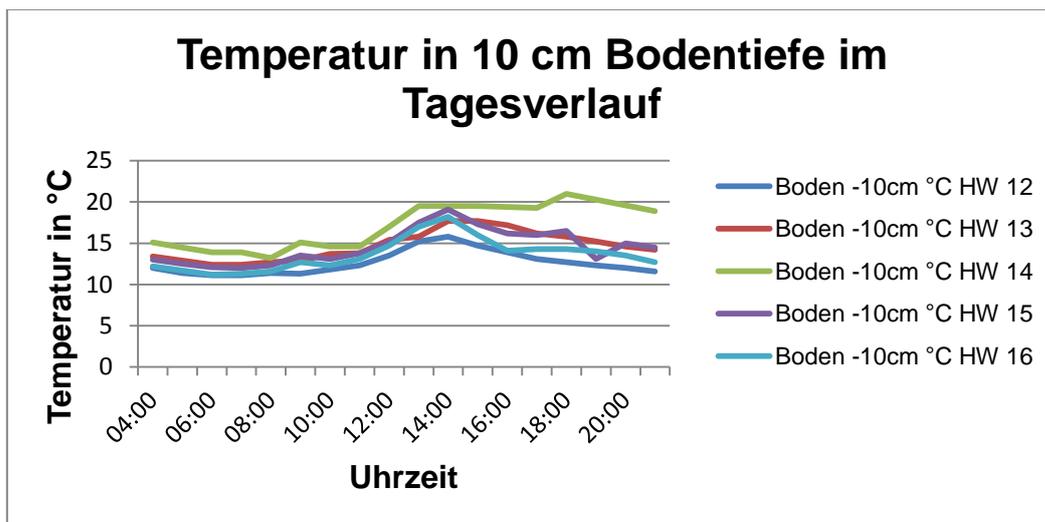


Abbildung 19: Temperatur in 10 cm Bodentiefe im Tagesverlauf

Tabelle 9: Minimum-, Maximumwerte und Spannweite der Temperatur in 10 cm Bodentiefe

	Minimum	Maximum	Spannweite
Boden -10 cm HW 12	11,1°C	15,8°C	4,7°C
Boden -10 cm HW 13	12,4°C	17,7°C	5,3°C
Boden -10 cm HW 14	13,2°C	21,0°C	7,8°C
Boden -10 cm HW 15	12,0°C	19,1°C	7,1°C
Boden -10 cm HW 16	11,2°C	18,2°C	7,0°C

Die Temperatur in 30 cm Bodentiefe (Abbildung 20) steigt ähnlich der Temperatur in 10 cm Bodentiefe im Tagesverlauf bis 14 Uhr von 10-15°C auf 15-18°C leicht an und sinkt ab 14 Uhr wieder auf 10-15°C. Auffallend ist, dass bei HW 14 (Halde) die Temperatur in 30 cm Bodentiefe nach 14 Uhr nicht wieder sinkt, sondern ihr Maximum von 20 °C erst um 18 Uhr erreicht und dann nur leicht absinkt. Bei der letzten Messung um 21 Uhr ist zwischen dem Messpunkt auf der Halde (HW 14) und den übrigen Messpunkten ein Temperaturunterschied von 5°C zu beobachten. Die Minimum- und Maximumwerte in Tabelle 10 weisen sowohl den höchsten Minimumwert (14,4°C) als auch den höchsten Maximumwert (20,3°C) für den Messpunkt HW14 auf der Halde auf.

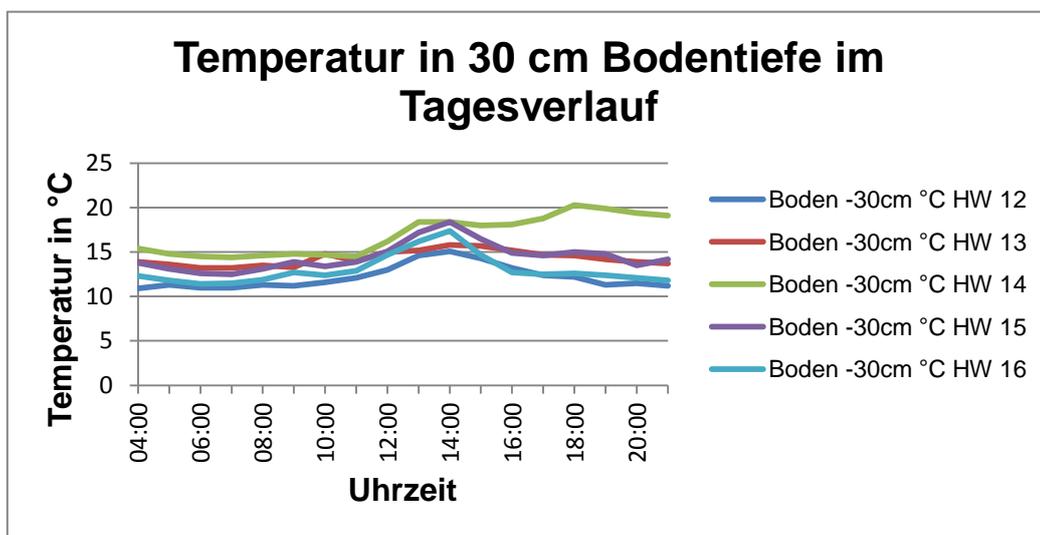


Abbildung 20: Temperatur in 30 cm Bodentiefe im Tagesverlauf

Tabelle 10: Minimum- und Maximumwerte der Temperatur in 30 cm Bodentiefe

	Minimum	Maximum	Spannweite
Boden -30 cm HW 12	10,9°C	15,1°C	4,2°C
Boden -30 cm HW 13	13,2°C	15,8°C	2,6°C
Boden -30 cm HW 14	14,4°C	20,3°C	5,9°C
Boden -30 cm HW 15	12,5°C	18,4°C	5,9°C
Boden -30 cm HW 16	11,4°C	17,4°C	6,0°C

### 5.2.1 Dämpfungstiefe der täglichen Temperaturschwankung

Die 50%ige Dämpfungstiefe der Messpunkte zwischen Bodenoberfläche (OF) und 30 cm Bodentiefe ist im Wald mit 40 cm (HW12) und 32 cm (HW16) am höchsten. Am Waldrand nimmt die Dämpfungstiefe ab, 19 cm bei HW 13 und 29 cm bei HW 15. Die geringste Dämpfungstiefe von 18 cm ist beim Messpunkt HW 14 direkt auf der Halde zu finden (Tabelle 11).

Tabelle 11: Dämpfungstiefe in [cm] von der OF bis 30 cm Bodentiefe

	Dämpfungstiefe von OF bis 30 cm Bodentiefe
<b>HW12</b>	40 cm
<b>HW13</b>	19 cm
<b>HW14</b>	18 cm
<b>HW15</b>	29 cm
<b>HW16</b>	32 cm

In Abbildung 21 ist erkennbar, dass die Dämpfungstiefe auf der Halde am geringsten (HW 14) und im Wald (HW 12, 16) am höchsten ist.

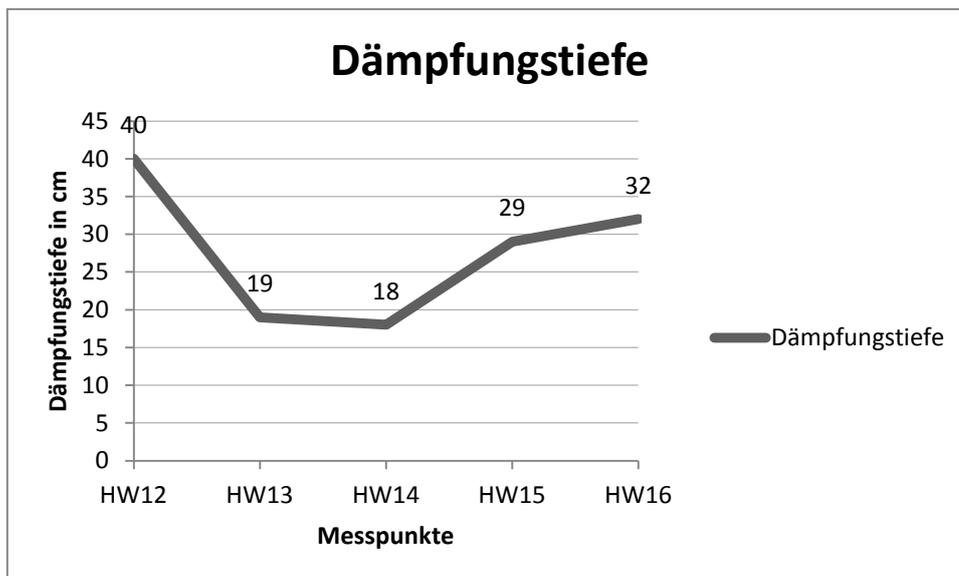


Abbildung 21: Dämpfungstiefe [cm] auf den Messpunkten HW 12 bis HW 16

Auf Grund der festgestellten Korrelationen zwischen Dämpfungstiefe und Wasserhaltekapazität (Abbildung 24) bzw. Dämpfungstiefe und Sandanteil im Feinboden (Abbildung 25) werden diese beiden Bodenparameter wie folgt für den Transekt HW 12-16 graphisch dargestellt.

Die Wasserhaltekapazität in Abbildung 22 ist ähnlich der Dämpfungstiefe im Wald (HW 12, 16) mit über 100% im Wald am höchsten und auf der Halde (HW14) mit ca. 47% am niedrigsten.

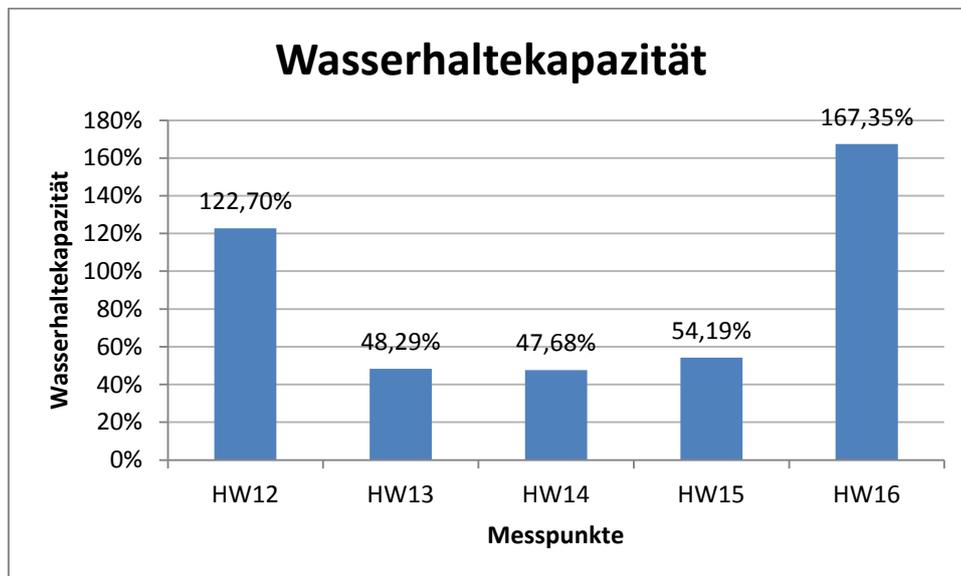


Abbildung 22: Wasserhaltekapazität [%] auf den Messpunkten HW 12 bis HW 16

Abbildung 23 lässt erkennen, dass im Wald der geringste Sandanteil im Feinboden mit < 40% zu finden ist. Am Waldrand und auf der Halde liegt der Sandanteil im Feinboden zwischen 51% und 63%.

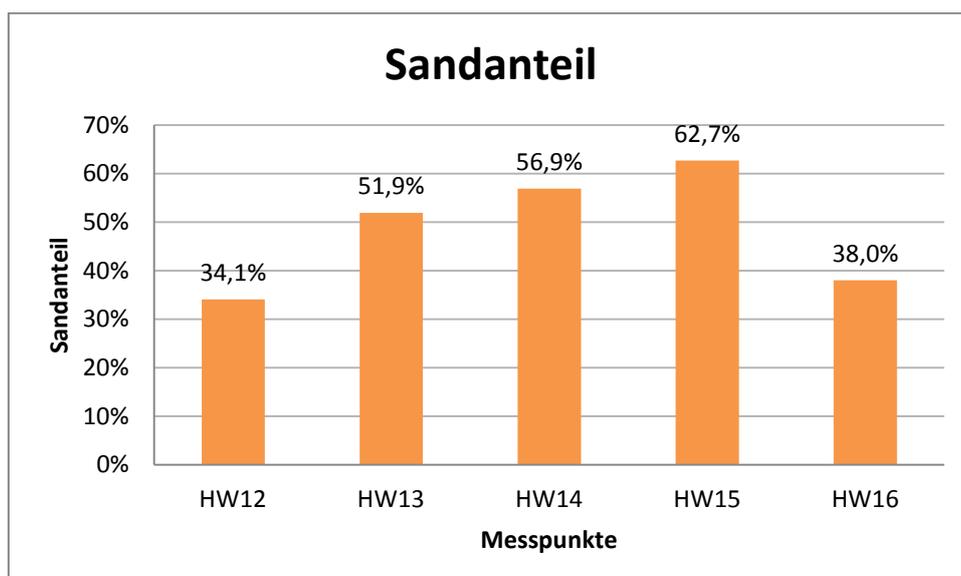


Abbildung 23: Sandanteil im Feinboden [%] auf den Messpunkten HW 12 bis HW 16

Zwischen der Dämpfungstiefe (OF bis 30 cm Bodentiefe) und der Wasserhaltekapazität ergibt sich eine lineare Korrelation mit  $R^2=0,51$ . Die Dämpfungstiefe nimmt mit steigender Wasserhaltekapazität im Feinboden zu (Abbildung 24).

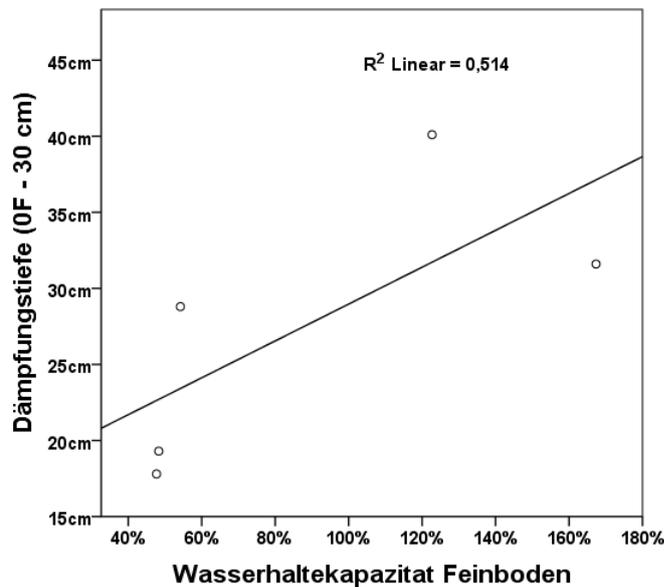


Abbildung 24: Korrelation ( $R^2$ ) zwischen der Dämpfungstiefe (OF bis 30 cm Bodentiefe) und der Wasserhaltekapazität (Pearson Test)

Die lineare Korrelation zwischen der Dämpfungstiefe (OF bis 30 cm Bodentiefe) und dem Sandanteil im Feinboden beträgt  $R^2=0,49$ . Die Dämpfungstiefe nimmt mit steigendem Sandanteil im Feinboden ab (Abbildung 25).

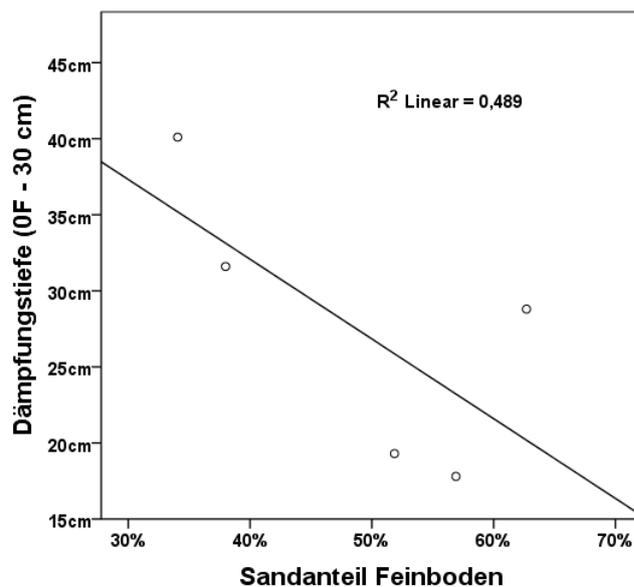


Abbildung 25: Korrelation ( $R^2$ ) zwischen der Dämpfungstiefe (OF bis 30 cm Bodentiefe) und dem Sandanteil im Feinboden (Pearson Test)

## 5.3 Boden

### 5.3.1 Steine

Die Halde ist mineralogisch ziemlich homogen (Beran, pers. Mitteilung). Der primäre Kupferkies (Cu, Fe-Sulfid) wurde sehr gut abgebaut, heute ist kaum mehr Kupferkies in dieser Umgebung zu finden. Die Gesteine liegen in sekundärer Form vor allem als Limonit, aber auch als Azurit und Malachit vor (Abbildung 26).

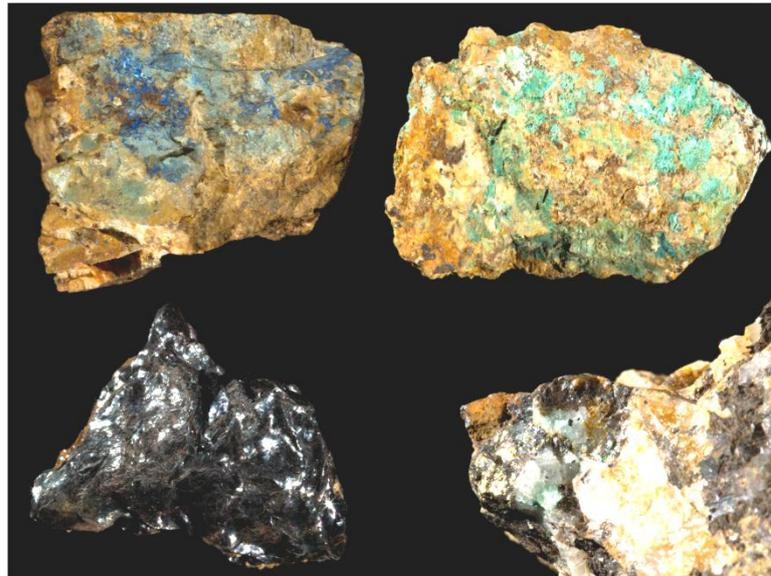


Abbildung 26: Steine der Halde: Azurit (links oben), Malachit (rechts oben), Grauwackengestein mit Glimmer (links unten), Pyrit (primär FeSulfid) gold glänzend (rechts unten)

### 5.3.2 Bodenarten

Die Auswertung der Korngrößenverteilung nach Öhlinger (1993a) ergibt für die verschiedenen Cluster folgenden Bodenarten:

- Halde (Moose und Flechten) lehmiger Sand
- Halde (*Rumex acetosella*) lehmiger Sand
- Waldrand (*Rumex acetosella*) schluffiger Sand
- Wald (*Vaccinium myrtillus*) sandiger Schluff
- Wald (*Avenella flexuosa*) lehmiger Sand
- Wald (*Avenella, Vaccinium*) lehmiger Schluff

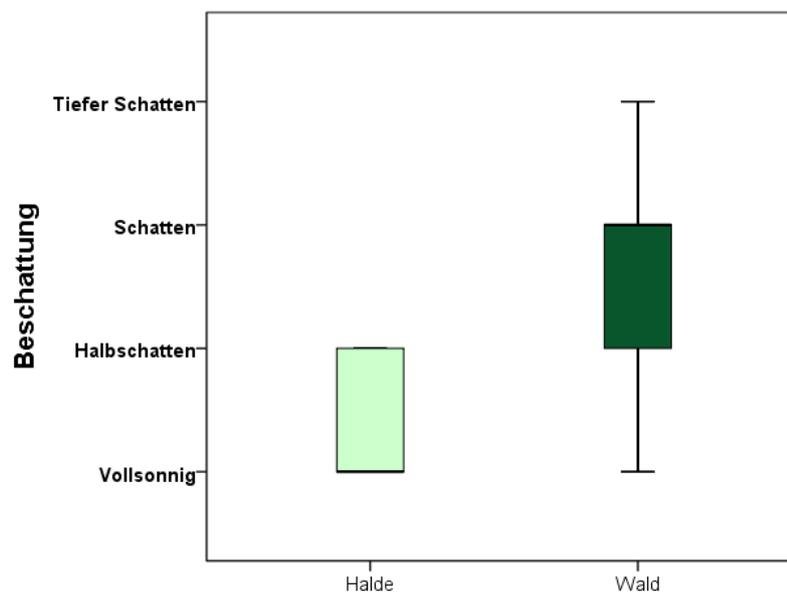
### 5.3.3 Unterschiede der Bodenparameter zwischen Halde und Wald

Tabelle 12 listet die (hoch) signifikanten Unterschiede der gemessenen Bodenparameter zwischen der *Halde* und dem umliegenden *Wald* auf (\*\* hochsignifikant, \* signifikant, sonst nicht signifikant).

**Tabelle 12: Signifikante Unterschiede zwischen der Halde und dem umliegenden Wald im Bezug auf die Bodenparameter (Mann-Whitney Test)**

Bodenparameter	
Beschattung**	Kalium *
Neigung	Mn gesamt **
Skelettanteil **	Fe gesamt **
Humus fein *	Cu gesamt **
Ton fein	Zn gesamt
Sand fein *	Cd gesamt *
Schluff fein	Pb gesamt
Grobschluff fein	Mn verfügbar *
Feinerde gesamt **	Fe verfügbar **
Humus gesamt **	Cu verfügbar **
Grobschluff gesamt **	Zn verfügbar *
Feinschluff gesamt *	Cd verfügbar
Ton gesamt **	Pb verfügbar **
Sand gesamt	Mn verfügbar % **
pH-Wert **	Fe verfügbar % **
WHC **	Cu verfügbar %
Sulfat	Zn verfügbar % *
Ammonium	Cd verfügbar % **
Phosphat *	Pb verfügbar % **

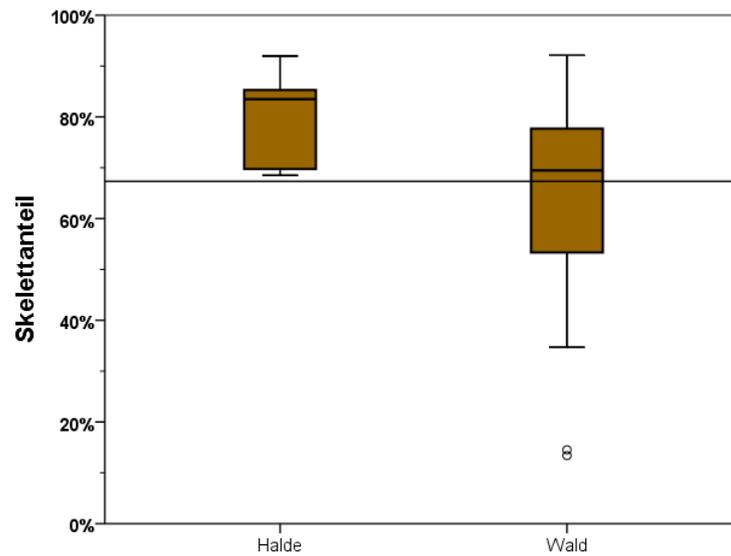
Abbildung 27 lässt erkennen, dass die Beschattung im Wald signifikant höher ist, als auf der Halde.



**Abbildung 27: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich ihrer Beschattung (Mann-Whitney Test);**

Die Parameter mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen *Halde* und *Wald* werden wie folgt graphisch dargestellt:

Der **Skelettanteil** (Abbildung 28) zeigt einen hoch signifikanten Unterschied zwischen *Halde* (> 80%) und *Wald* (70%) auf.



**Abbildung 28: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich Skelettanteil (Mann-Whitney Test); der waagrechte Strich zeigt das arithmetische Mittel aller Proben;**

In Abbildung 29 sind die Messpunkte nach ihrem Skelettanteil eingefärbt. Aus dieser Karte ist ersichtlich, dass auf und am unteren Rand der *Halde* der höchste Skelettanteil zu finden ist.

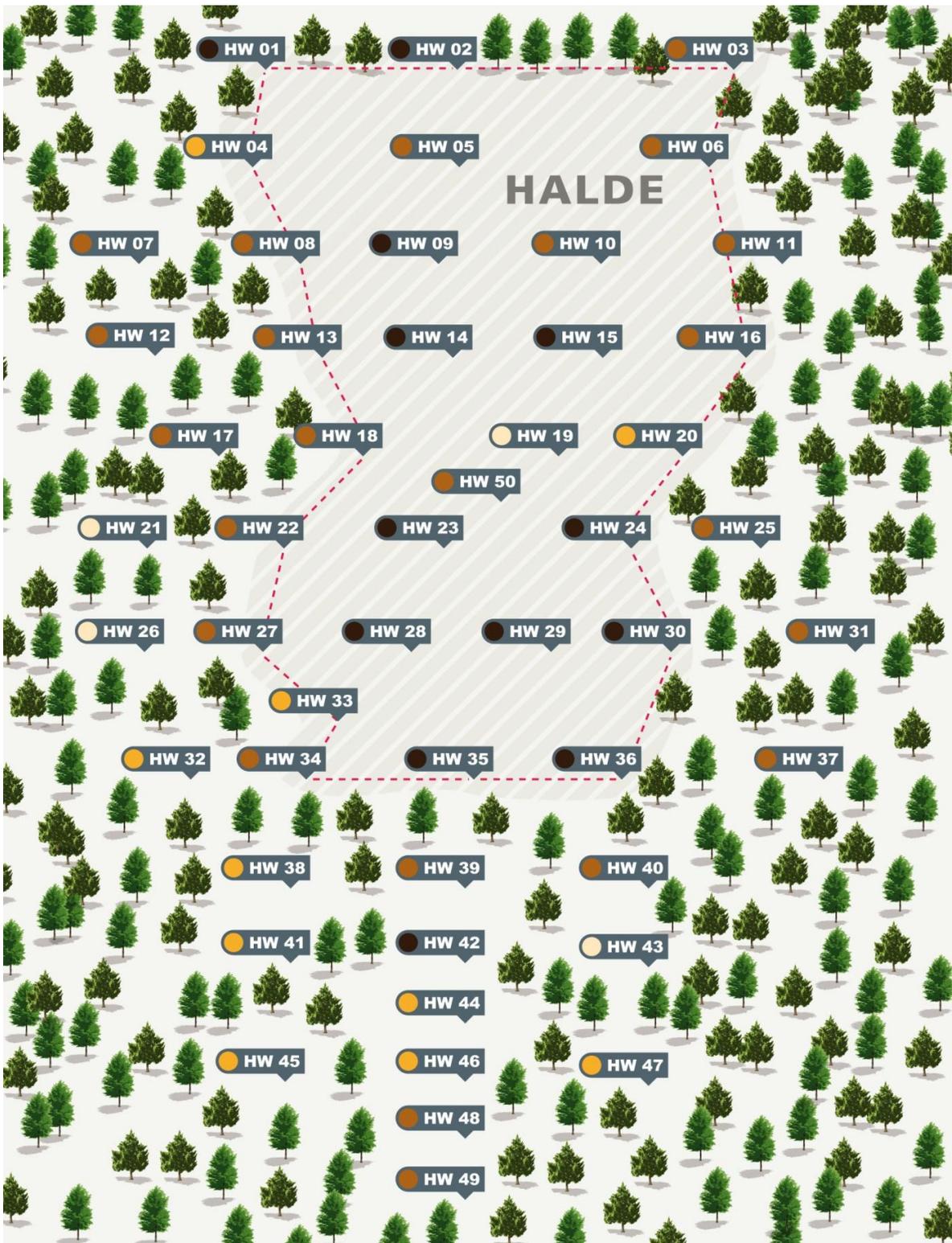
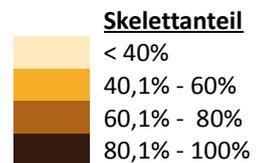


Abbildung 29: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Skelettanteil der Messpunkte



Der **Feinerde**-Gesamtgehalt (Abbildung 30) mit ca. 17% auf der *Halde* und ca. 30% im *Wald* und der **Grobschluff**-Gesamtgehalt (Abbildung 31) mit < 5% auf der *Halde* und > 5% im *Wald* weisen hoch signifikante Unterschiede auf.

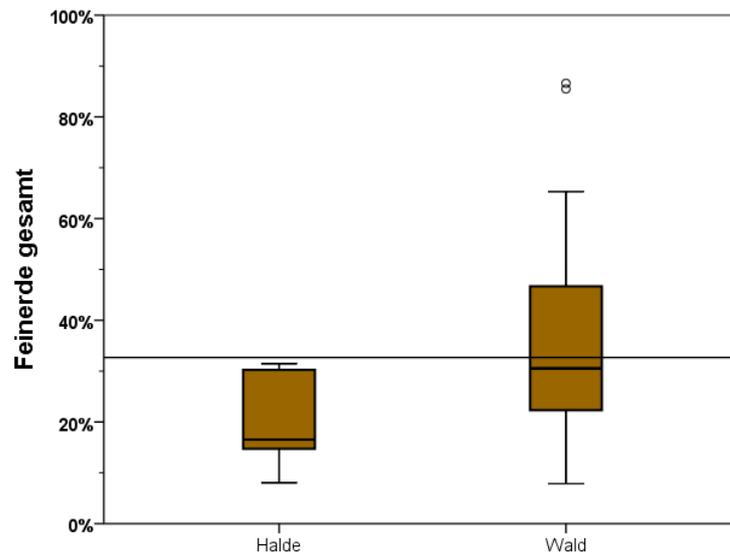


Abbildung 30: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Feinerde-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test); der waagrechte Strich zeigt das arithmetische Mittel aller Proben, Kreise kennzeichnen Extremwerte;

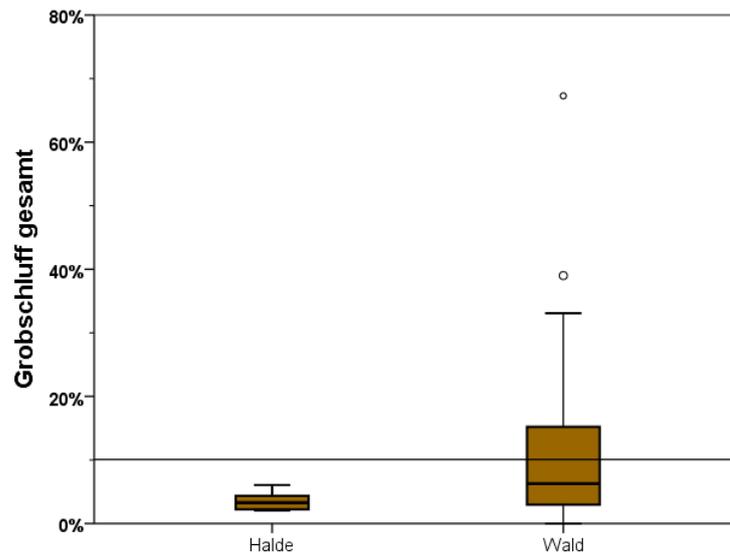


Abbildung 31: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Grobschluff-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)

Signifikant unterschiedlich verhält sich der **Feinschluff**-Gesamtgehalt (Abbildung 32) mit < 2% auf der *Halde* und ca. 3% im umliegenden *Wald*.

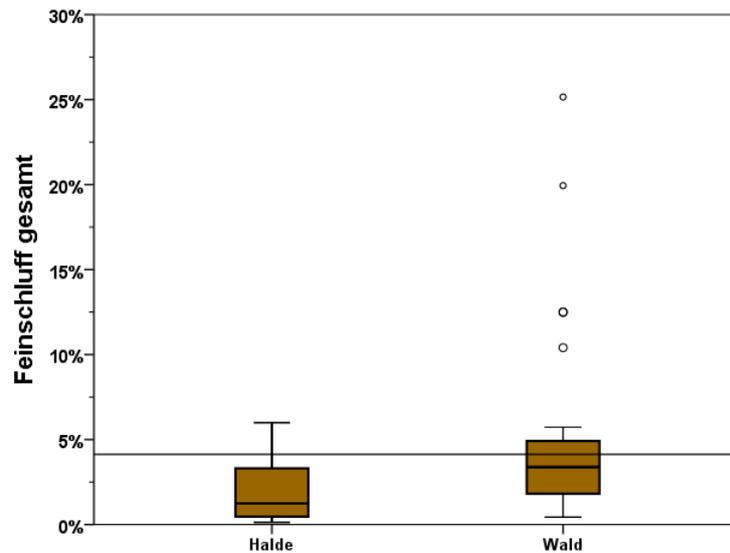


Abbildung 32: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Feinschluff-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)

Hoch signifikant unterschiedlich ist der **Ton**-Gesamtgehalt mit < 1% auf der *Halde* und > 2% im *Wald* (Abbildung 33).

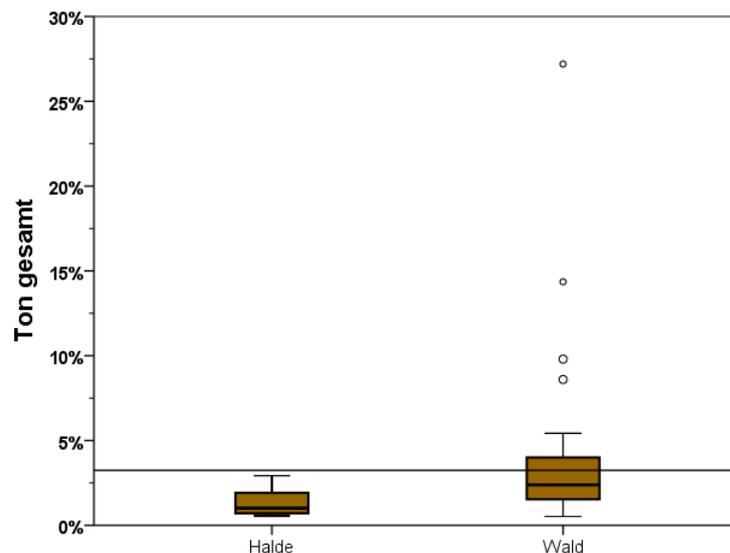


Abbildung 33: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Ton-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)

Die Karten in Abbildung 34 verschafft einen Überblick über den Tonanteil im Feinboden auf den Messpunkten. Einen auffallend hohen Tonanteil weisen HW 12, 21, 22, 23 und 26 auf.

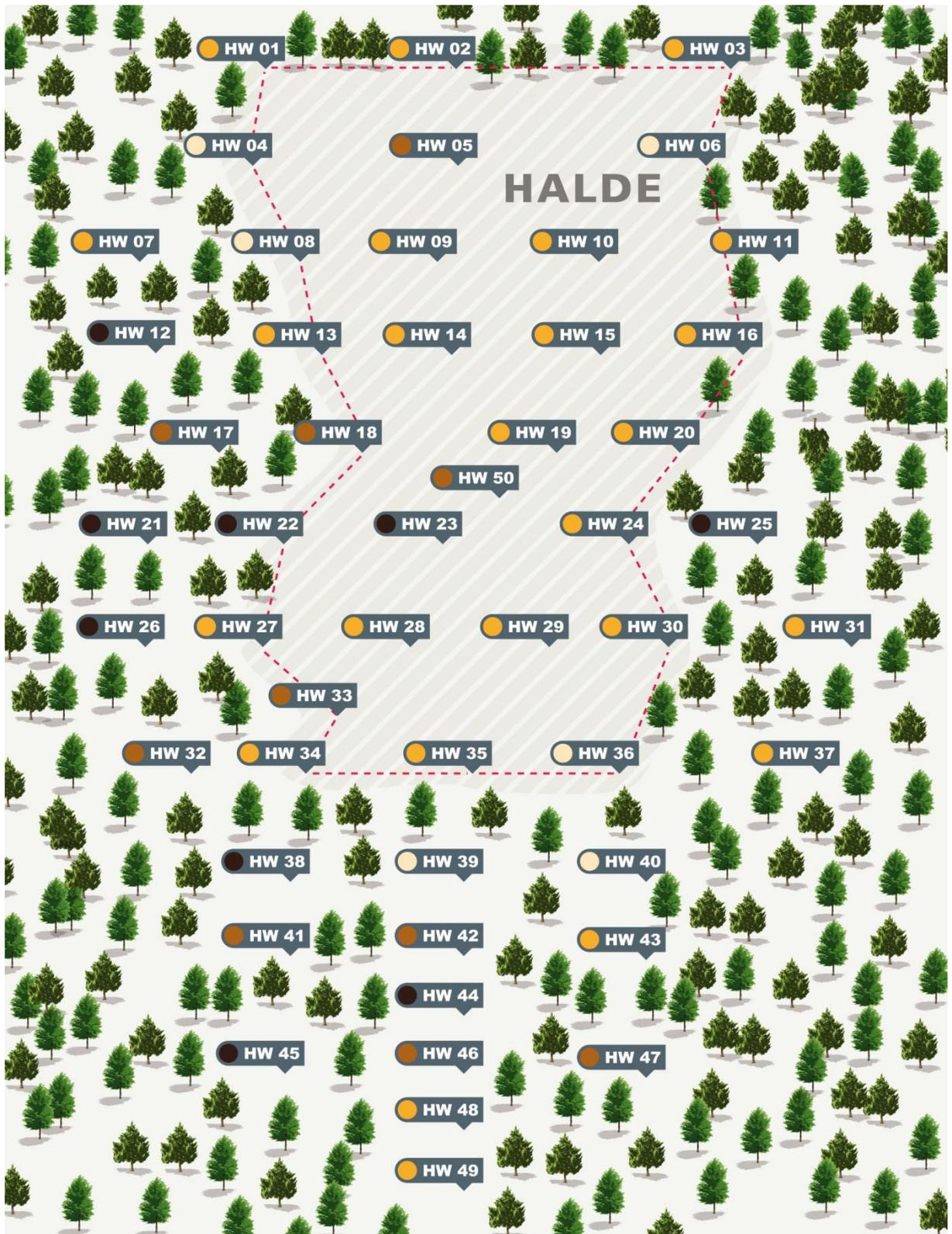


Abbildung 34: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Tonanteil im Feinboden der Messpunkte

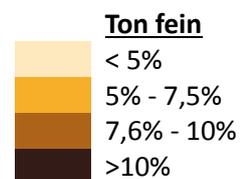
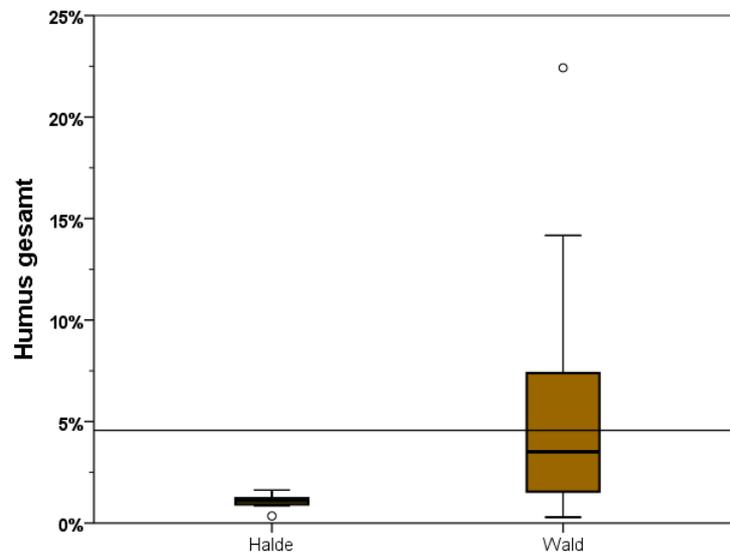
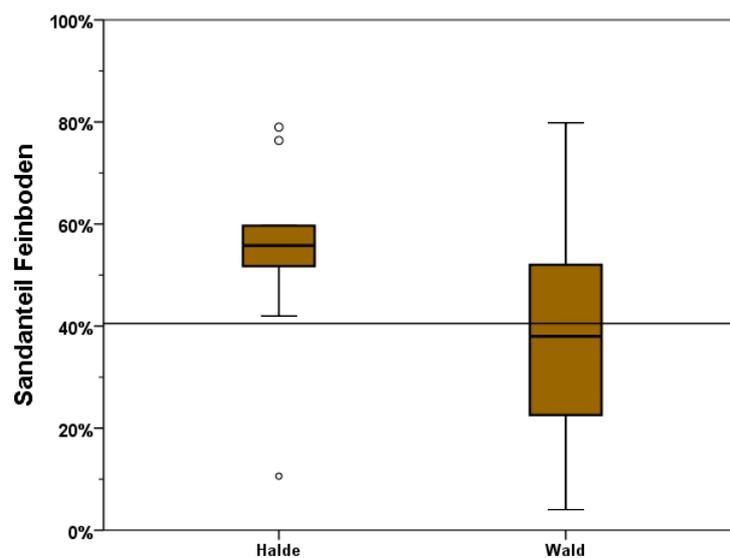


Abbildung 35 lässt erkennen, dass der **Humus-Gesamtgehalt** im *Wald* mit ca. 3% hoch signifikant höher liegt als auf der *Halde* mit < 1,5%.

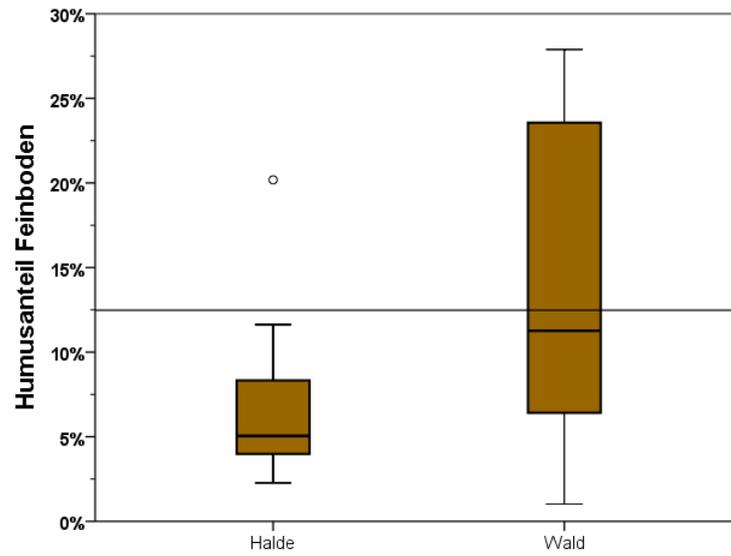


**Abbildung 35: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Humus-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)**

**Sandanteil im Feinboden** (Abbildung 36) und **Humusanteil** (Abbildung 37) **im Feinboden** zeigen signifikante Unterschiede zwischen *Halde* und *Wald* auf. So liegt der Sandanteil bei ca. 57% auf der *Halde* und bei ca. 38% im *Wald*, der Humusanteil auf der *Halde* bei ca. 5% und im umliegenden *Wald* bei ca. 11%.



**Abbildung 36: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Sandanteils im Feinboden (Mann-Whitney Test)**



**Abbildung 37: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Humusanteils im Feinboden (Mann-Whitney Test)**

Der Humusanteil im Feinboden ist in der Karte in Abbildung 38 graphisch dargestellt. Mit Ausnahme von HW 9, 19 und 20 herrscht auf der *Halde* ein eher geringerer Humusanteil im Feinboden als im umliegenden *Wald*.

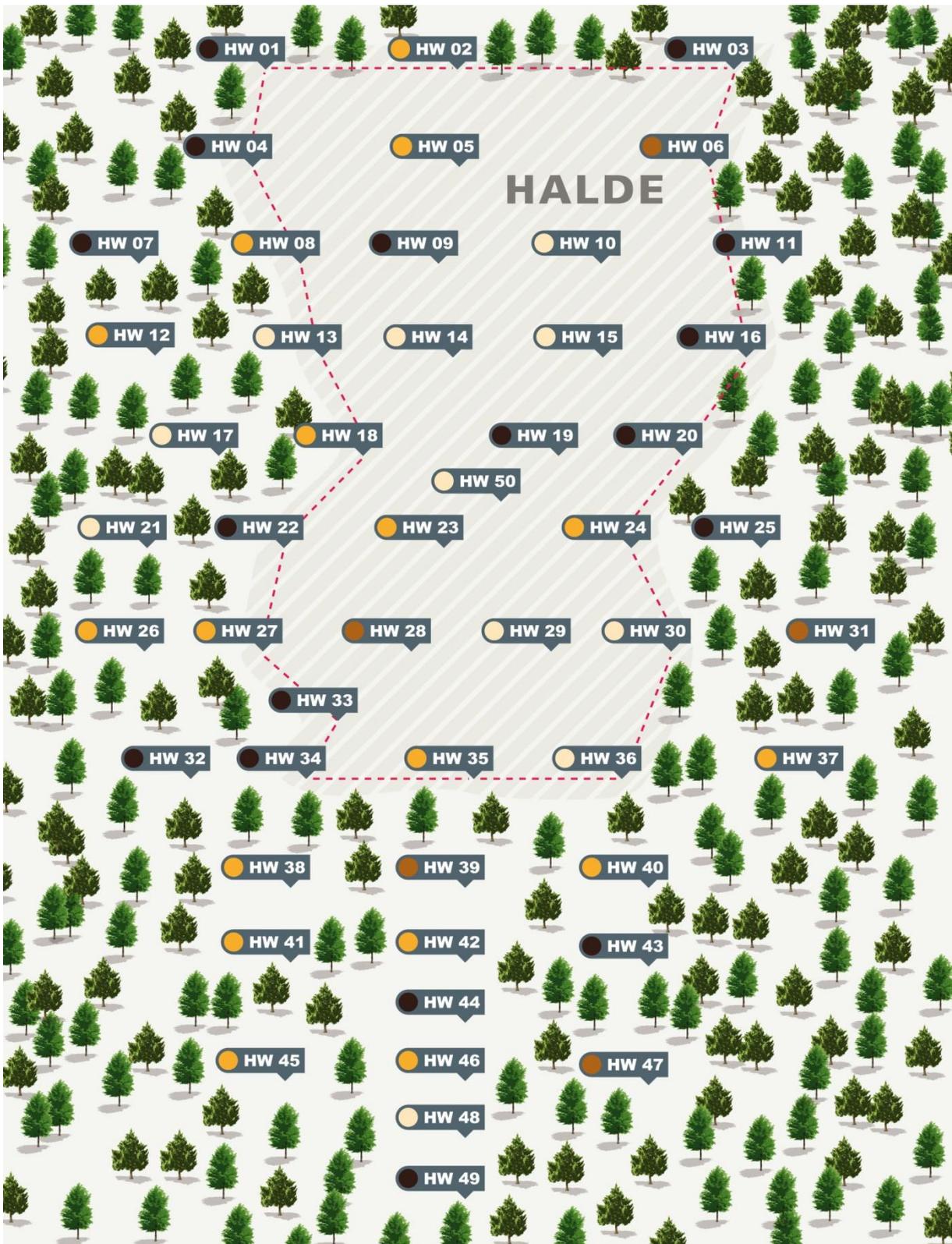
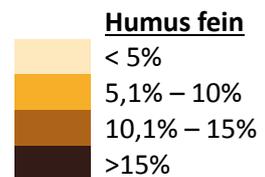


Abbildung 38: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Humusanteil im Feinboden der Messpunkte



Es besteht ein hoch signifikanter Unterschied der **Wasserhaltekapazität** zwischen *Halde* (ca. 50%) und dem umliegenden *Wald* (ca. 100%), siehe Abbildung 39.

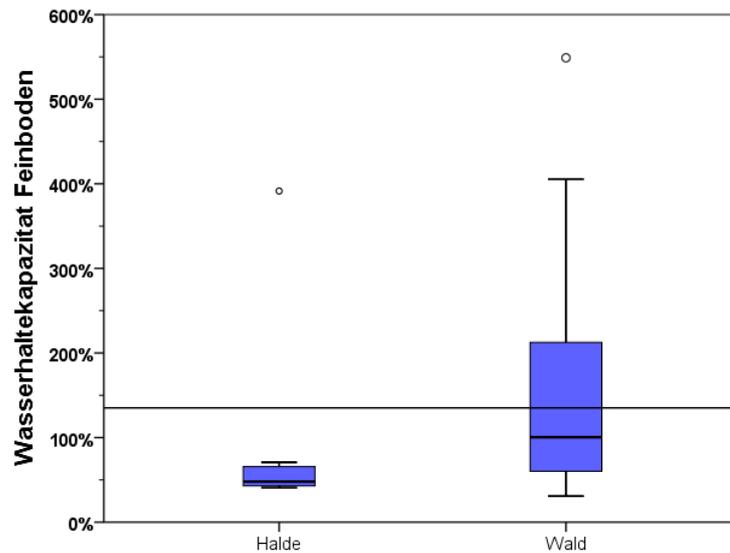


Abbildung 39: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der WHC (Mann-Whitney Test)

Modell WHC (Schrittweise lineare Regression)

WHC [%]  $R^2=0,82^*$        $WHC = -41,60 + 5 \times \text{Grobschluff fein} + 4,03 \times \text{Ton fein}$

Die Wasserhaltekapazität nimmt mit zunehmendem Grobschluff im Feinboden und Ton im Feinboden zu.

Der hoch signifikante Unterschied des **pH-Werts** zwischen *Halde* und *Wald* ist in Abbildung 40 dargestellt. Herrscht auf der *Halde* ein pH-Wert von etwa 4,4, so liegt der pH-Wert im *Wald* mit ca. 3,3 deutlich darunter.

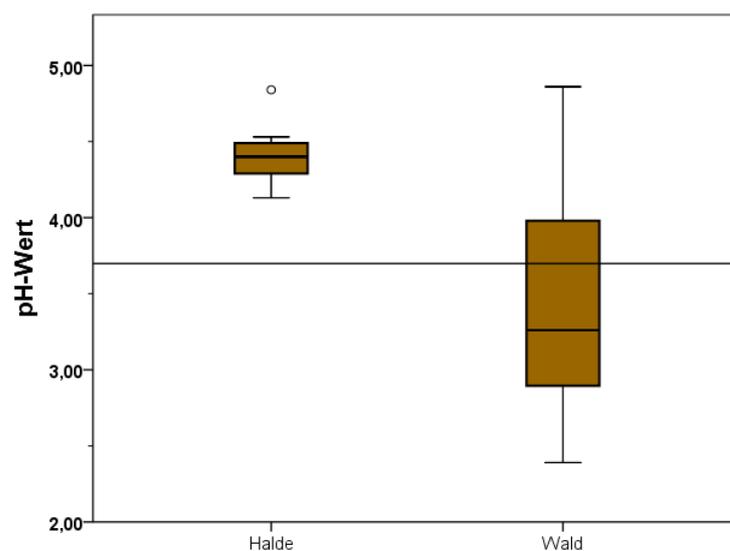


Abbildung 40: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des pH-Werts (Mann-Whitney Test)

Die Karte in Abbildung 36 veranschaulicht die Ergebnisse des hoch signifikanten Unterschieds des pH-Werts zwischen *Halde* und *Wald*.

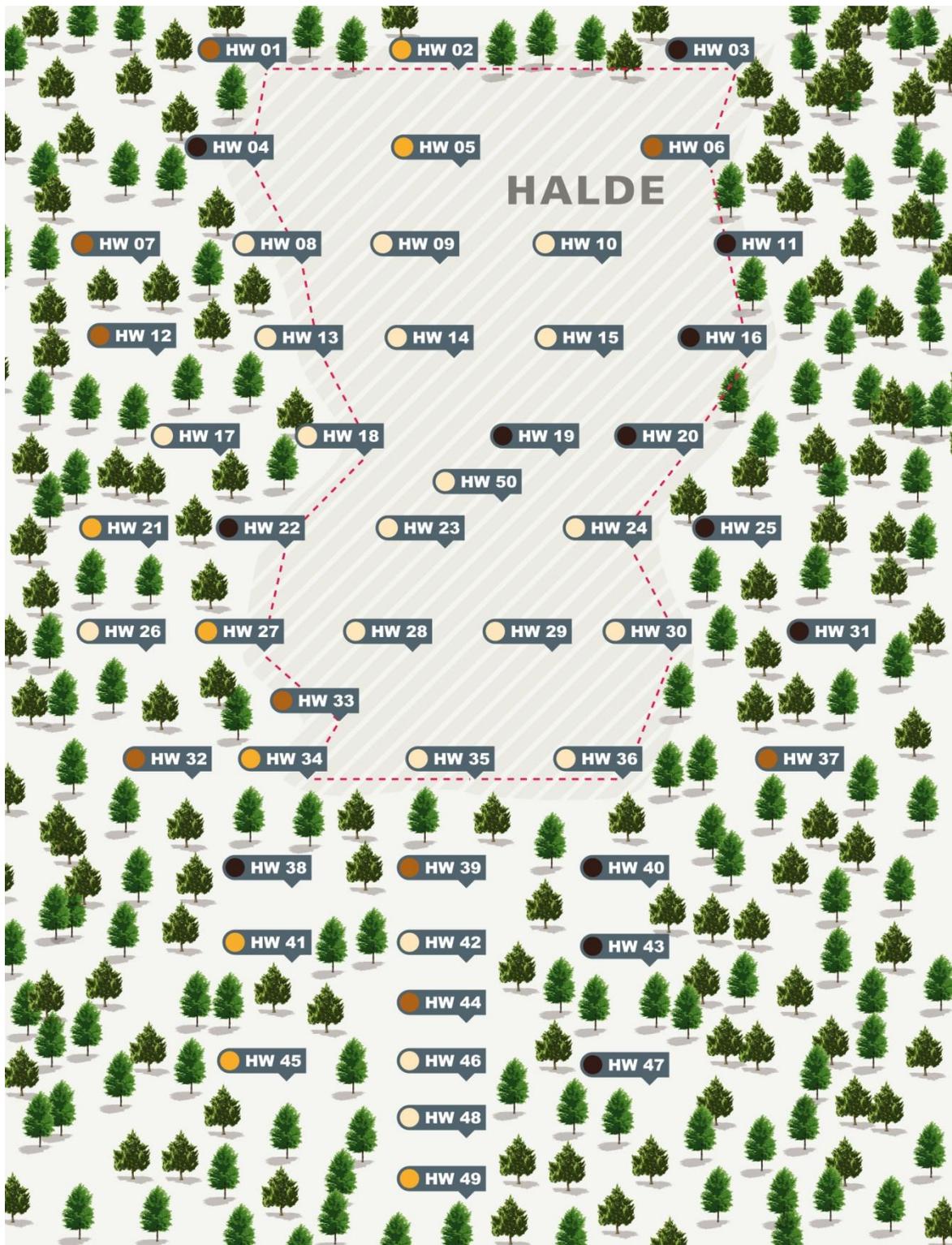
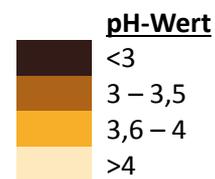


Abbildung 41: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den pH-Wert der Messpunkte



Die **Nährstoffe** mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen *Halde* und *Wald* werden wie folgt graphisch dargestellt:

Verfügbares **Phosphat** und verfügbares **Kalium** weisen einen signifikanten Unterschied zwischen *Halde* und dem umliegenden *Wald* auf. Mit ca. 10 mg/kg liegt die Phosphat-Verfügbarkeit (Abbildung 42) auf der *Halde* unter derselben im *Wald* (etwa 16 mg/kg). Das verfügbare Kalium auf der *Halde* erweist sich mit ca. 80 mg/kg signifikant niedriger dem Wert des *Waldes* mit >100 mg/kg (Abbildung 43).

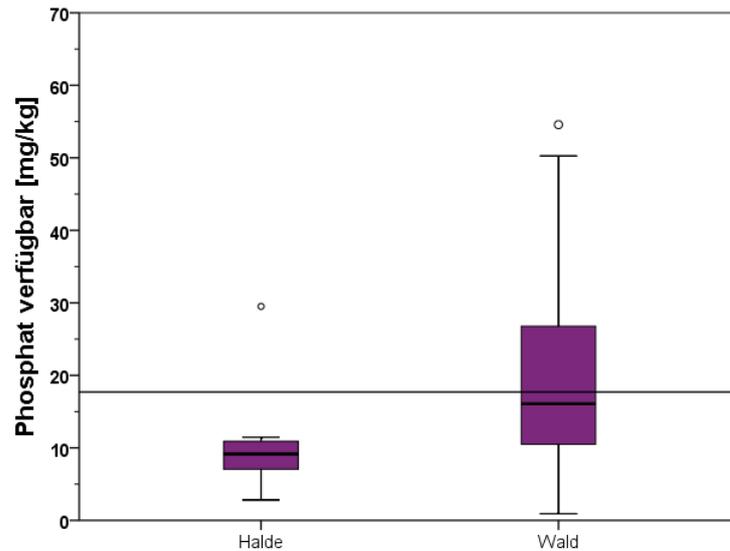


Abbildung 42: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Phosphats (Mann-Whitney Test)

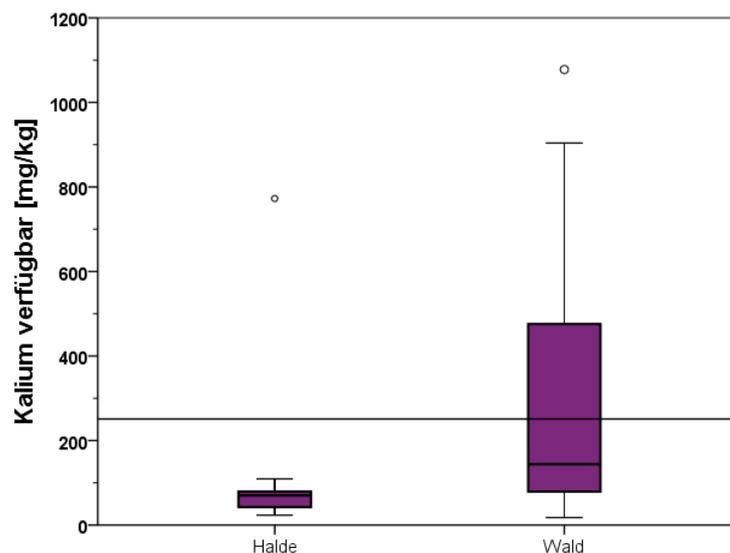


Abbildung 43: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Kaliums (Mann-Whitney Test)

Die **Schwermetall-Gesamtgehalte** mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen *Halde* und *Wald* wird wie folgt graphisch dargestellt:

Hoch signifikante Unterschiede ergeben sich für den Mangan-Gesamtgehalt, Eisen-Gesamtgehalt und Kupfer-Gesamtgehalt.

Auf der *Halde* liegt der Gesamtgehalt an **Mangan** (Abbildung 44) bei ca. 28.000 mg/kg, im *Wald* hingegen nur bei ca. 4.000 mg/kg. Im *Wald* treten jedoch Ausreißer mit bis zu 28.000 mg/kg auf.

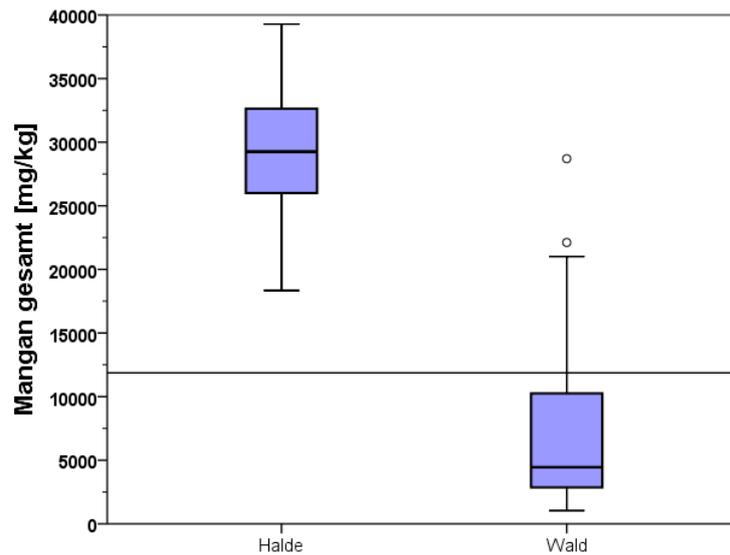


Abbildung 44: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Mangan-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)

In der folgenden Karte (Abbildung 45) ist die *Halde* mit hohen Mangan-Gesamtgehalten im Gegensatz zum umliegenden *Wald* mit geringeren Gesamtgehalten an Mangan klar zu erkennen. HW 41, 42, 46 und 48 weisen für den *Wald* relativ hohe Mangan-Gesamtgehalten auf.

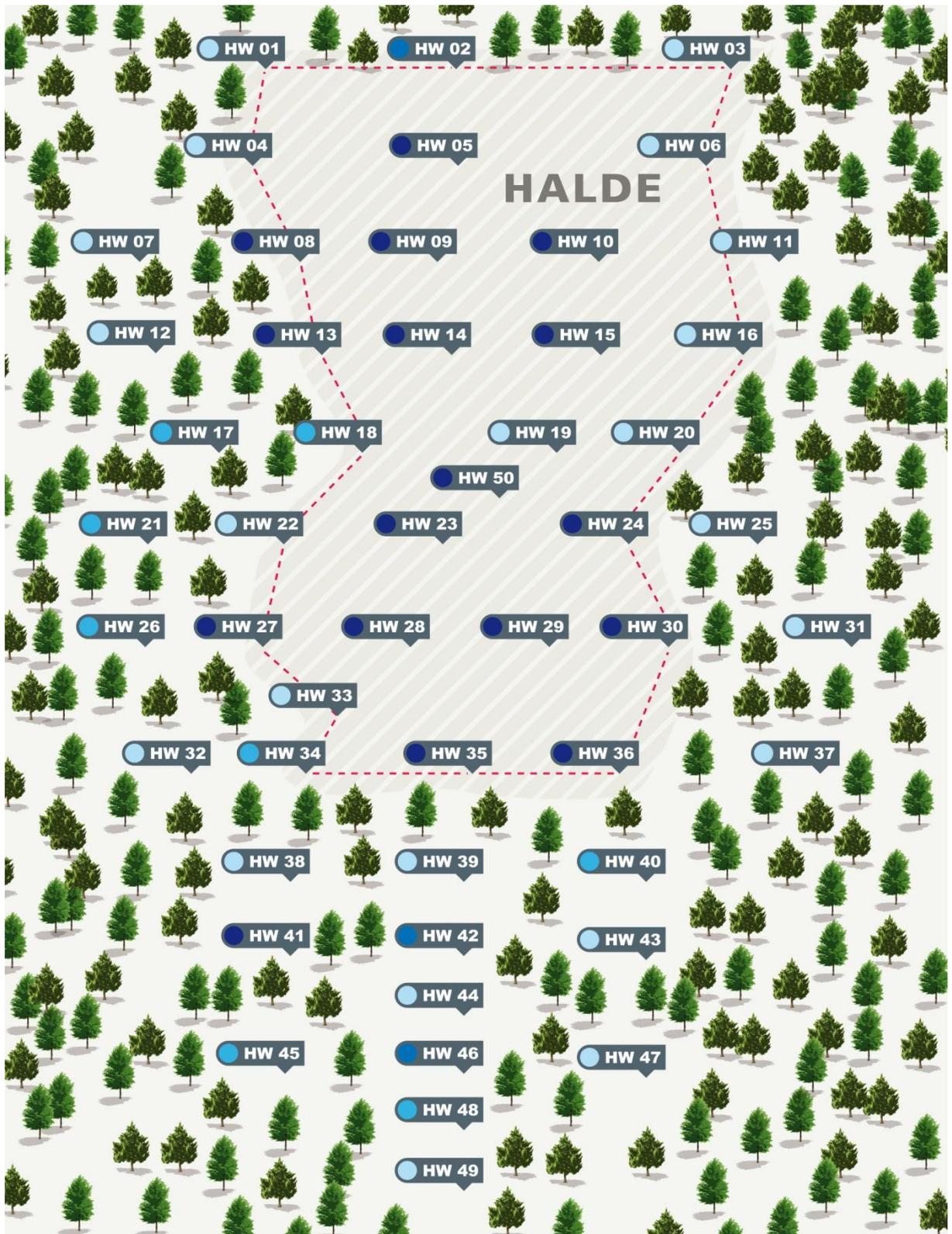
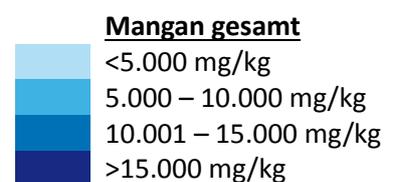
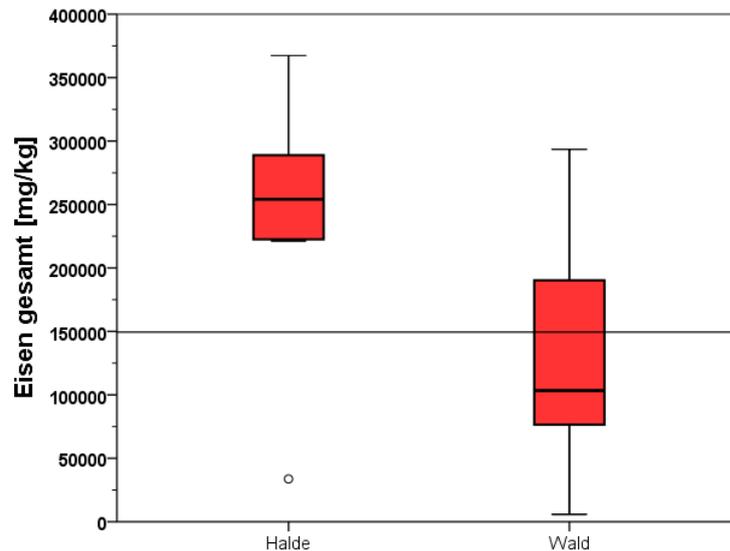


Abbildung 45: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Mangan-Gesamtgehalt der Messpunkte



Die Ergebnisse für den **Eisen**-Gesamtgehalt zeigen einen hoch signifikanten Unterschied zwischen *Halde* und *Wald*.

Für den Eisen-Gesamtgehalt ergeben die Messungen auf der *Halde* ca. 250.000 mg/kg, im Gegensatz dazu sind nur 100.000 mg/kg Gesamtgehalt an Eisen im *Wald* zu messen (Abbildung 46).



**Abbildung 46: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Eisen-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)**

Betrachtet man die Karte in Abbildung 47, welche den hoch signifikanten Unterschied zwischen *Halde* und *Wald* graphisch darstellt, so ist zu erkennen, dass der höchste Eisen-Gesamtgehalt auf den Messpunkten der *Halde* vorzufinden ist. Im umliegenden *Wald* hingegen sinkt der Eisen-Gesamtgehalt. Ähnlich dem Mangan-Gesamtgehalt treten auch hier mit den Messpunkten HW 40, 41, 42 und 46 Ausreißer im Wald mit hohen Eisen-Gesamtgehalten auf. HW 19 direkt auf der Halde weist einen sehr geringen Eisen-Gesamtgehalt auf (siehe auch Ausreißer auf der Halde in Abbildung 46).

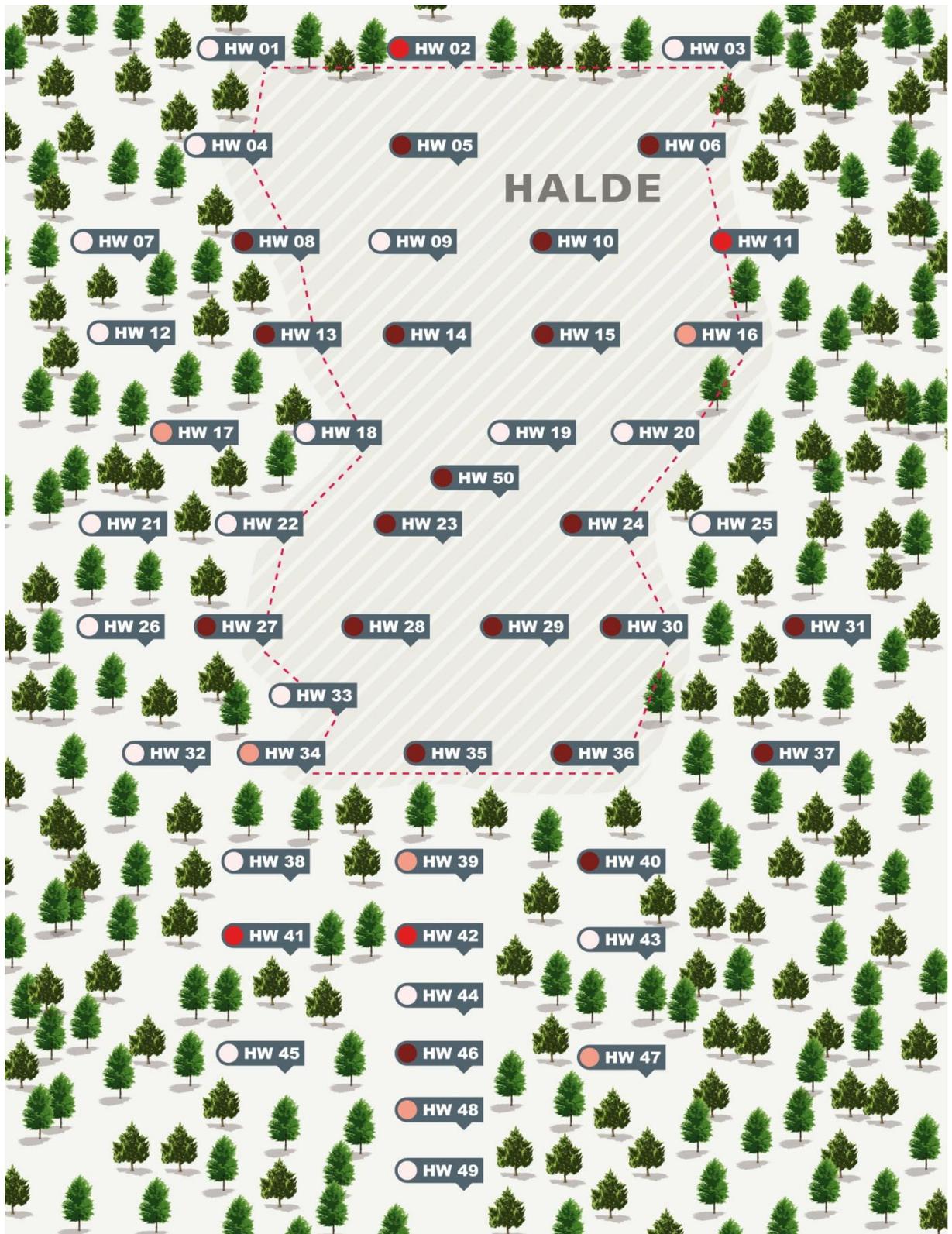
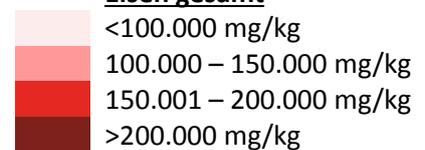
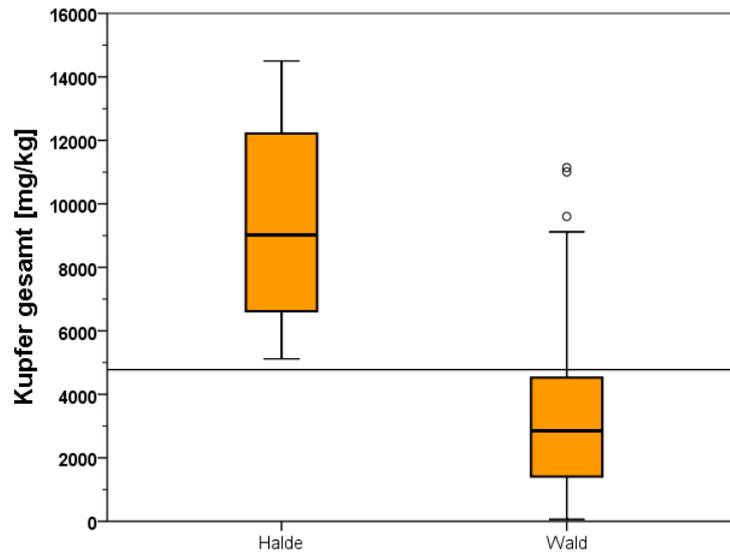


Abbildung 47: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Eisen-Gesamtgehalt der Messpunkte

**Eisen gesamt**



Ca. 9.000 mg/kg **Kupfer**-Gesamtgehalt zeichnen die *Halde* aus, im *Wald* beläuft sich der Gesamtgehalt an Kupfer auf ca. 2.900 mg/kg (Abbildung 48). Im *Wald* treten Ausreißer auf, die einen ähnlich hohen Kupfer-Gesamtgehalt wie auf der *Halde* aufweisen.



**Abbildung 48: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Kupfer-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)**

Der Kupfer-Gesamtgehalt (Abbildung 49) ist bei den Messpunkten auf der *Halde* am höchsten und nimmt im *Wald* ab. Im Wald am Fuße der *Halde* treten auf den Messpunkten HW 41, 42, 46 und 48 ähnlich wie bei den Mangan- und Eisen-Gesamtgehalten erhöhte Kupfer-Gesamtgehalte auf.

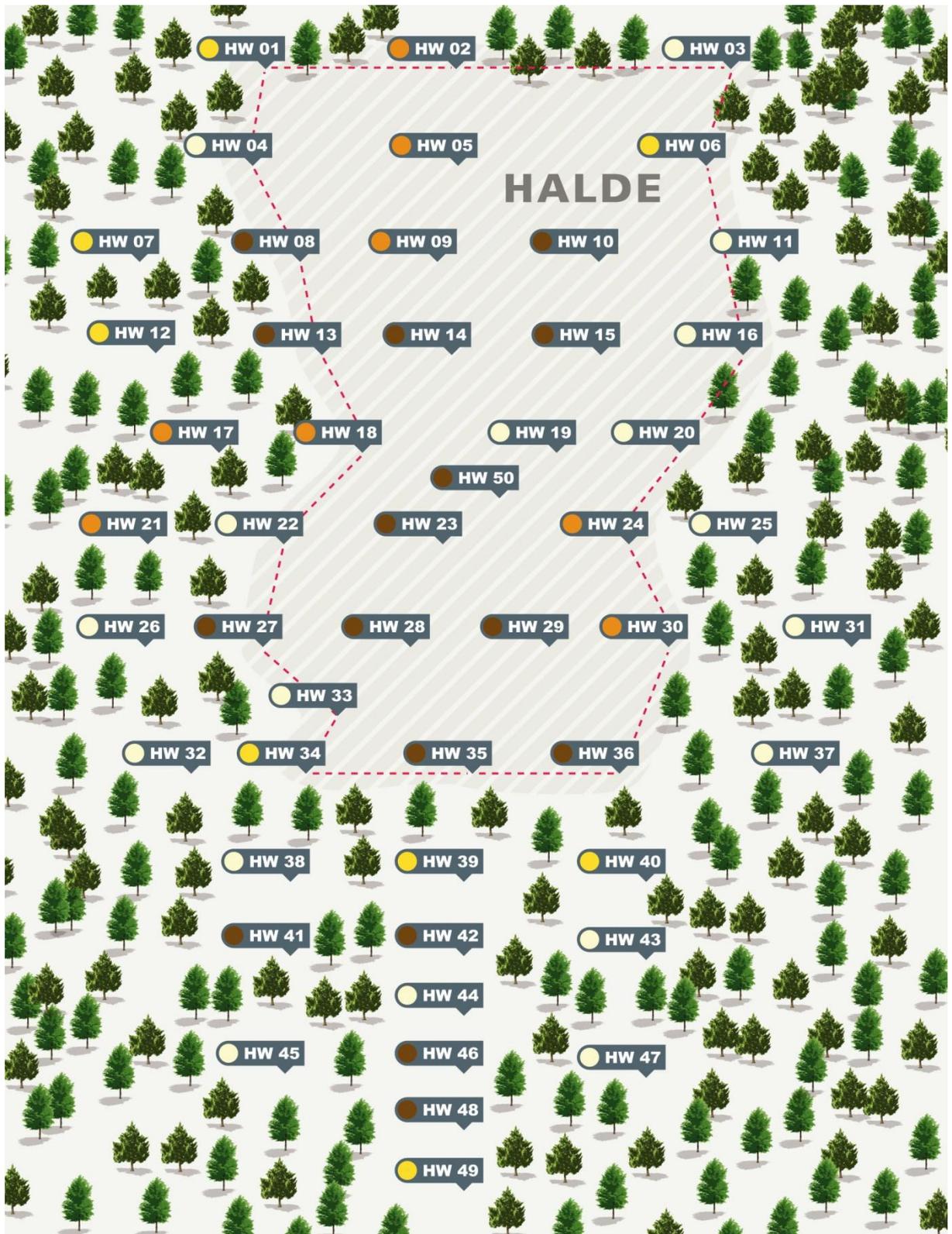
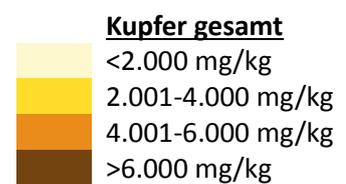


Abbildung 49: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Kupfer-Gesamtgehalt der Messpunkte



Der Gesamtgehalt an **Kadmium** (Abbildung 50) ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen der *Halde* (ca. 0,75mg/kg) und dem *Wald* (ca. 0,46 mg/kg).

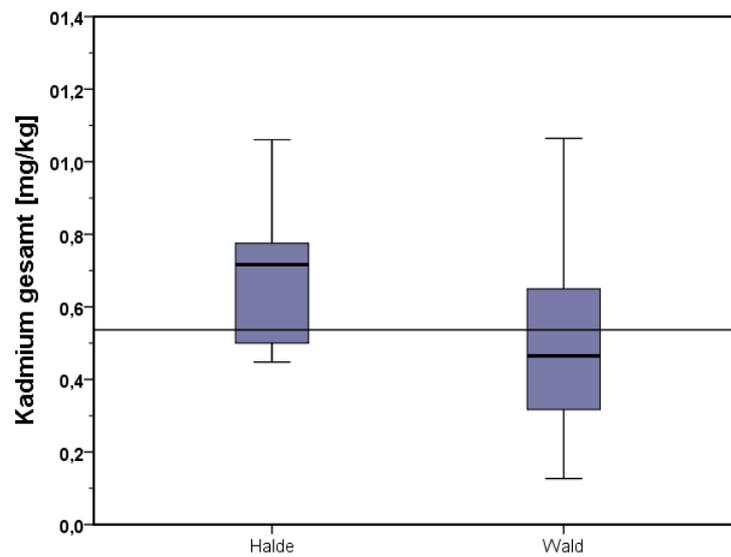


Abbildung 50: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Kadmium-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test)

Die **Schwermetall-Verfügbarkeiten** mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen *Halde* und *Wald* werden wie folgt graphisch dargestellt:

Das Ergebnis des verfügbaren **Mangans** (Abbildung 51) zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen der *Halde* (<1 mg/kg) und dem umliegenden *Wald* mit ca. 1,5 mg/kg.

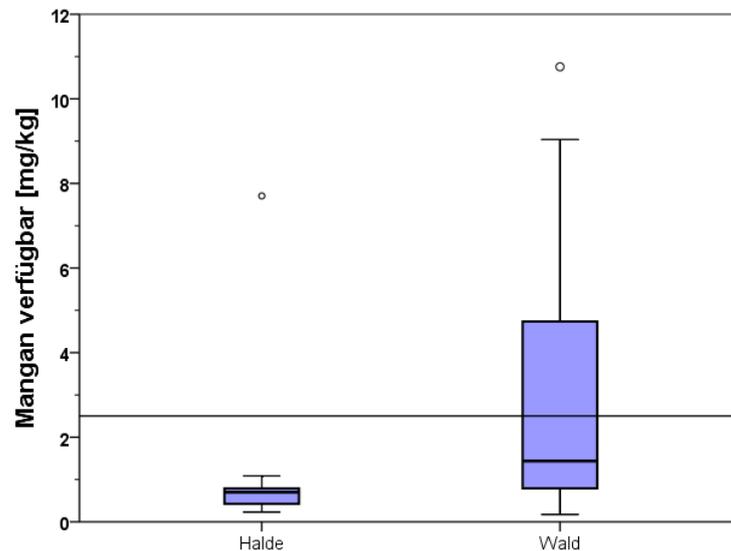


Abbildung 51: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Mangans (Mann-Whitney Test)

#### Modell der Mangan-Verfügbarkeit (schrittweise lineare Regression)

Mn verfügbar in [mg/kg]  $R^2=0,82^{**}$

Mn verfügbar in [mg/kg] =  $0,855 + 0,096 \times \text{Grobschluff fein} - 7,458 \times 10^{-6} \times \text{Fe ges}$

Mangan ist gut verfügbar in grobschluffreichen Böden und schlecht verfügbar in eisenreichen Böden.

Die Karte in Abbildung 52 zeigt, dass auf der Halde das Mangan bis auf die beiden Ausreißer HW 9 und 19 schlechter verfügbar ist als im umliegenden Wald.

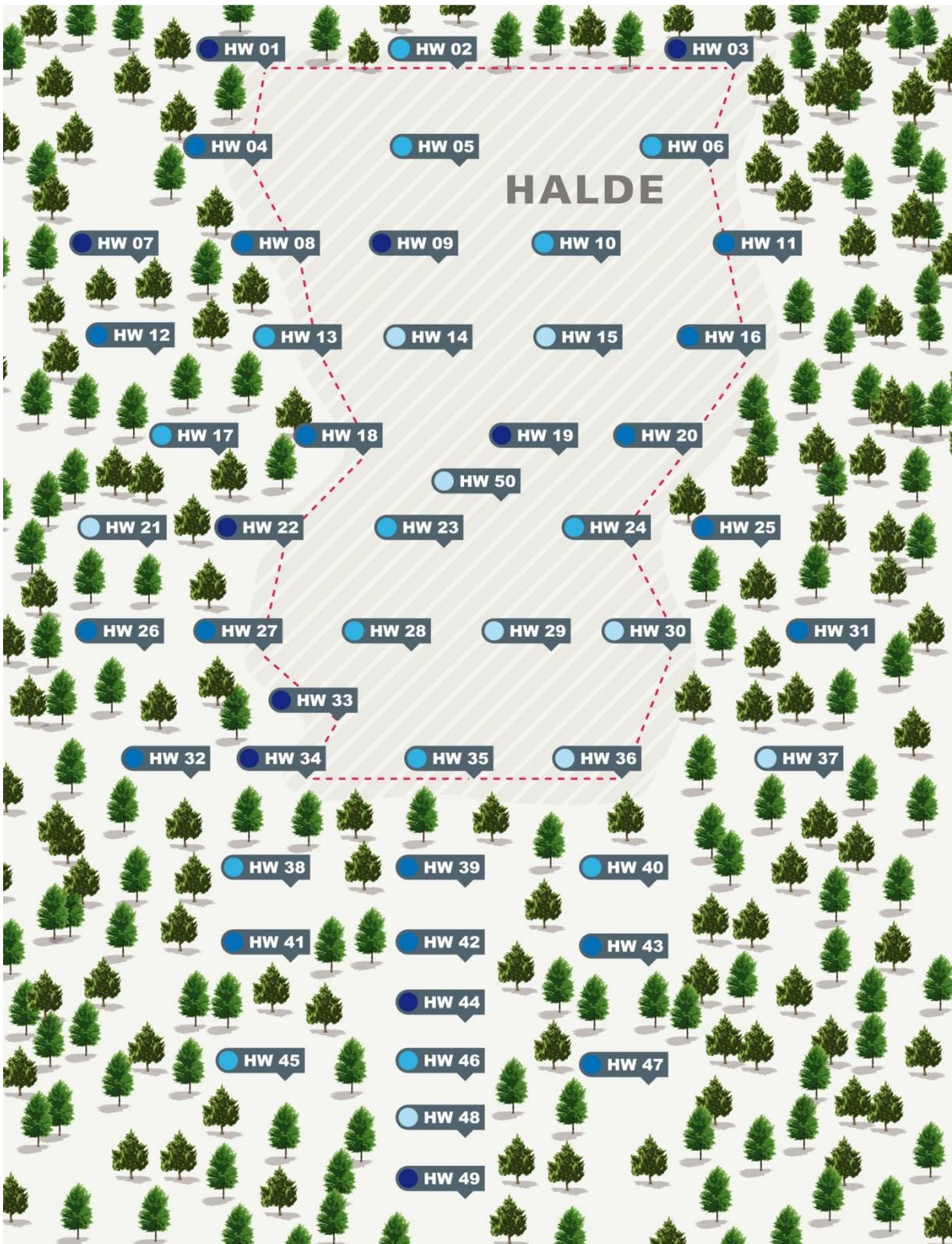
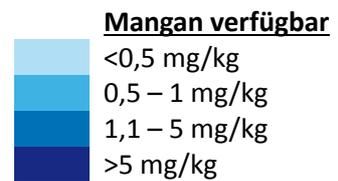
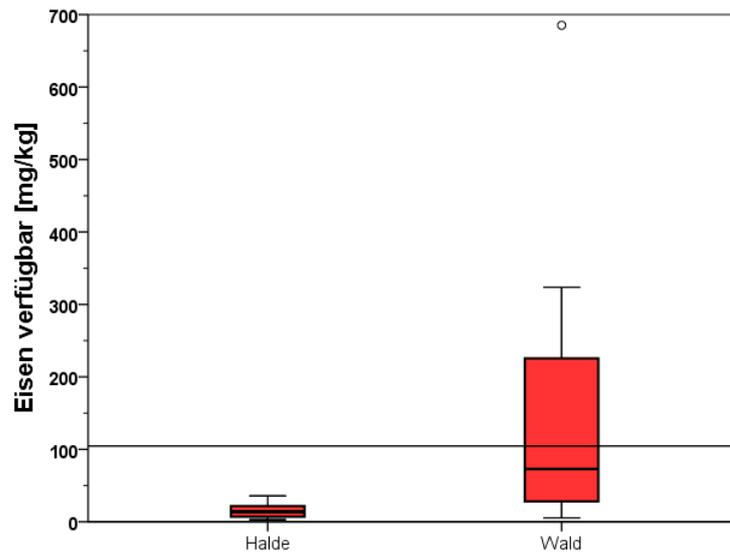


Abbildung 52: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt das verfügbare Mangan der Messpunkte



Der Unterschied der Verfügbarkeit von **Eisen** [mg/kg] (Abbildung 53) zwischen der *Halde* (> 50 mg/kg) und dem *Wald* (ca. 80 mg/kg) erweist sich als hoch signifikant.



**Abbildung 53: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Eisens (Mann-Whitney Test)**

#### Modell der Eisen-Verfügbarkeit (schrittweise lineare Regression)

Fe verfügbar in [mg/kg]  $R^2=0,57^*$

Fe verfügbar in [mg/kg] =  $399,6 - 142,1 \times \text{pH} + 9,844 \times \text{Schluff fein} + 179 \times \text{Skelettanteil}$

Das Eisen ist bei niedrigem pH-Wert, hohem Schluffanteil im Feinboden und hohem Skelettanteil gut verfügbar.

Betrachtet man die Karte in Abbildung 54, welche den hoch signifikanten Unterschied zwischen Halde und Wald graphisch darstellt, so ist zu erkennen, dass die höchste Verfügbarkeit von Eisen [mg/kg] an den Messpunkten im Wald zu finden ist. Auf der Halde hingegen sinkt die Verfügbarkeit des Eisens extrem ab. Auf den Messpunkten HW 41, 42, 45 und 48 im Wald ist die Verfügbarkeit von Eisen ähnlich wie auf der Halde relativ niedrig.

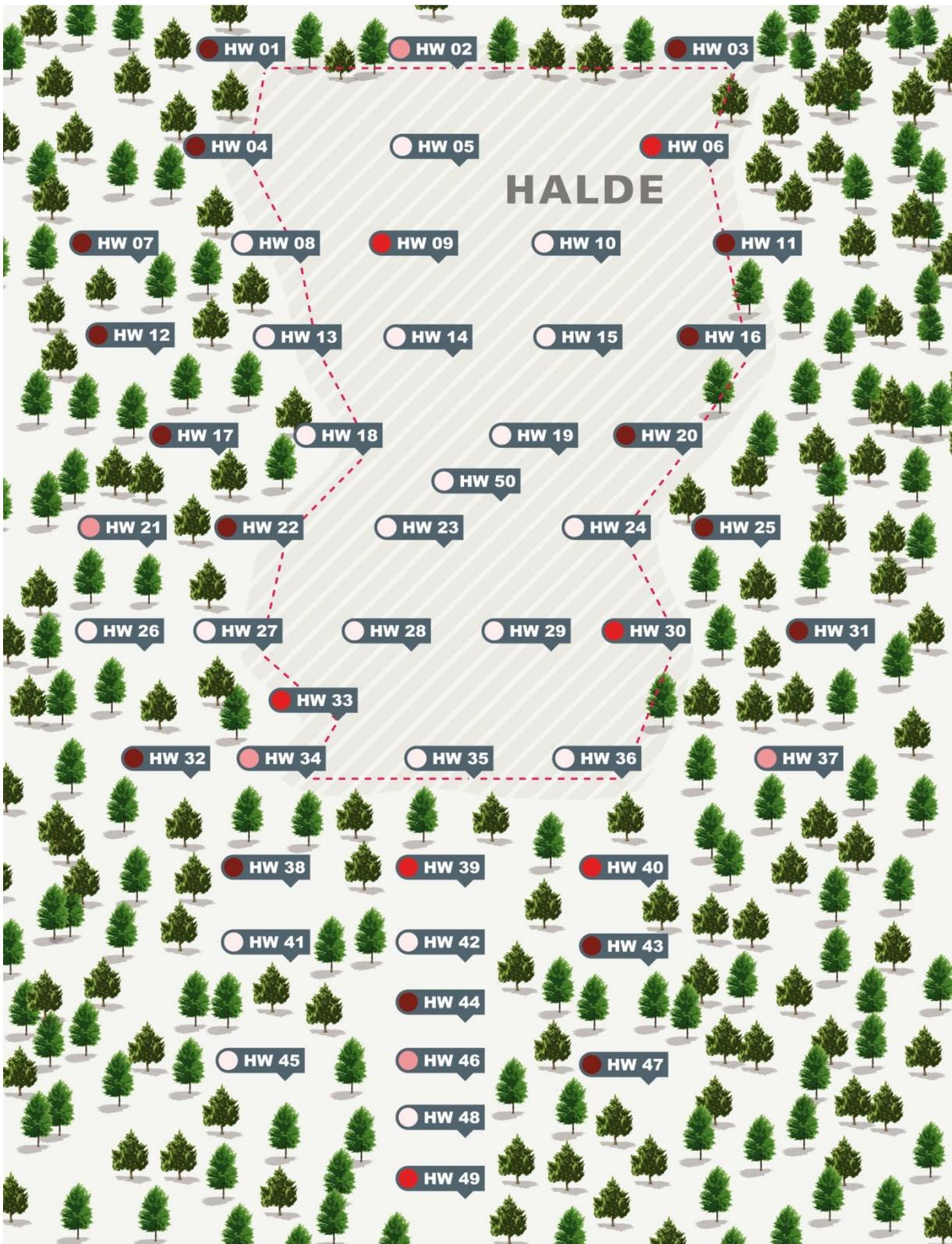
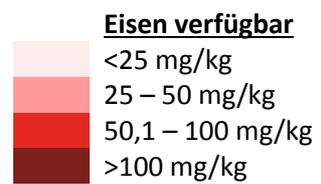
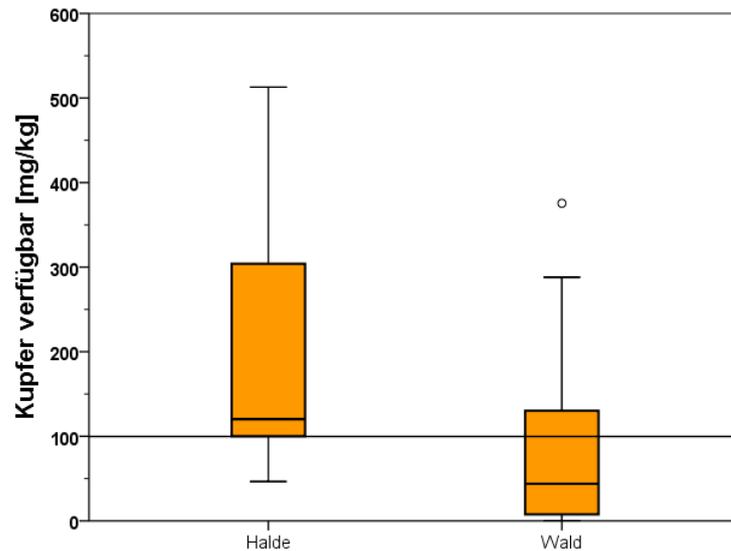


Abbildung 54: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt das verfügbare Eisen der Messpunkte



Auch das Ergebnis des verfügbaren **Kupfers** (Abbildung 55) weist einen hoch signifikanten Unterschied zwischen der *Halde* mit einem Wert von etwa 120 mg/kg und dem umliegenden *Wald* mit einer Kupfer-Verfügbarkeit von ca. 45 mg/kg auf.



**Abbildung 55: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Kupfers (Mann-Whitney Test)**

#### Modell der Kupfer-Verfügbarkeit (schrittweise lineare Regression)

Cu verfügbar in [mg/kg]  $R^2=0,61^*$

Cu verfügbar in [mg/kg] =  $-46,72 + 0,025 \times \text{Cu ges} - 0,001 \times \text{Fe ges} + 1,65 \times \text{Skelettanteil}$

Das Kupfer ist gut verfügbar bei einem hohen Kupfer-Gesamtgehalt, einem hohen Skelettanteil und einem eher geringen Eisen-Gesamtgehalt.

Die Karte in Abbildung 56 stellt graphisch dar, dass das Kupfer [mg/kg] auf der Halde, aber auch auf den Messpunkten am Fuße der Halde (HW 42, 44, 48, 49) gut verfügbar ist.

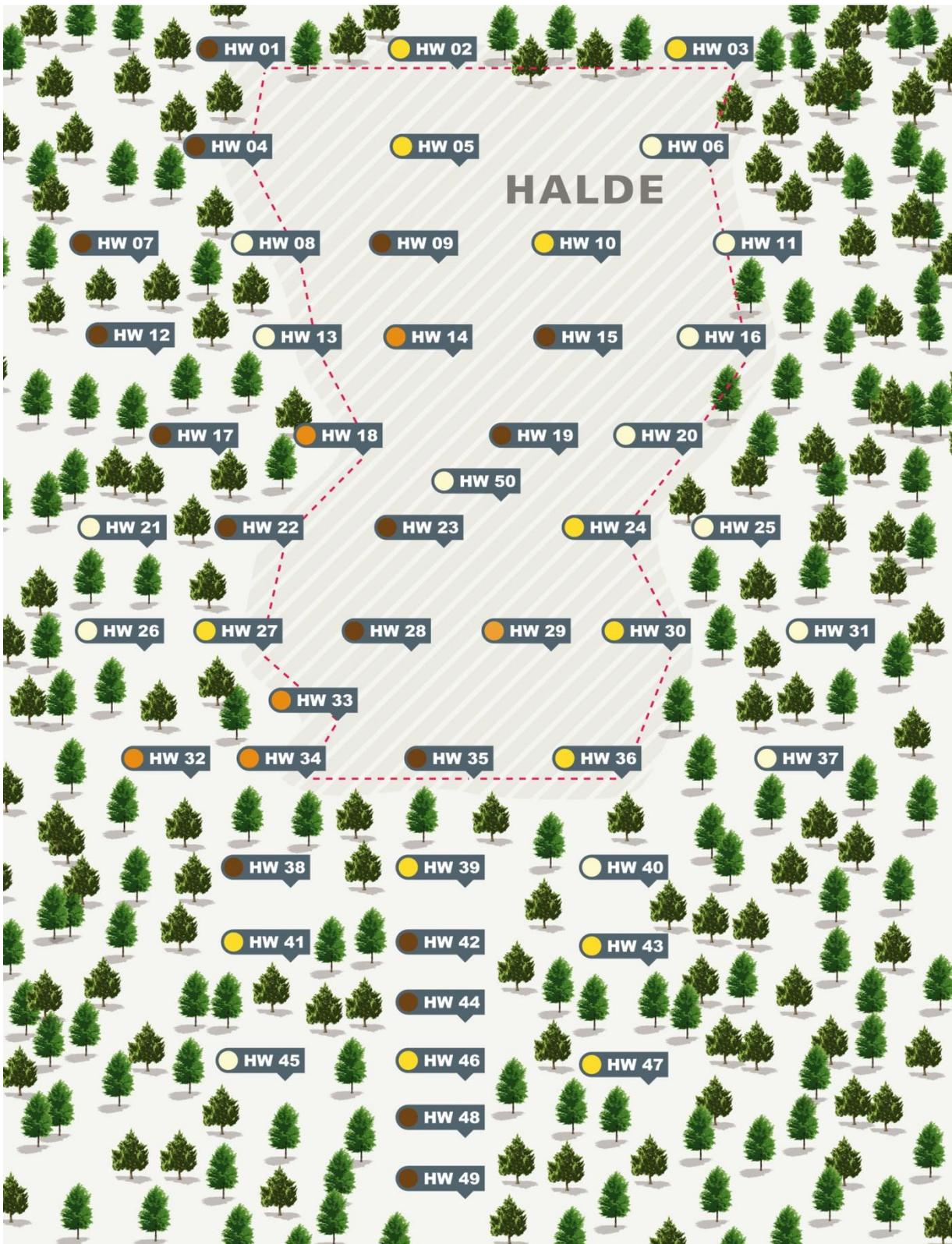
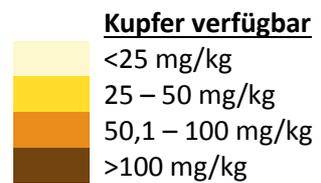


Abbildung 56: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt das verfügbare Kupfer der Messpunkte



Der hoch signifikante Unterschied des verfügbaren **Blei** zwischen *Halde* mit <0,5 mg/kg und *Wald* mit ca. 2,5 mg/kg ist in Abbildung 57 graphisch dargestellt.

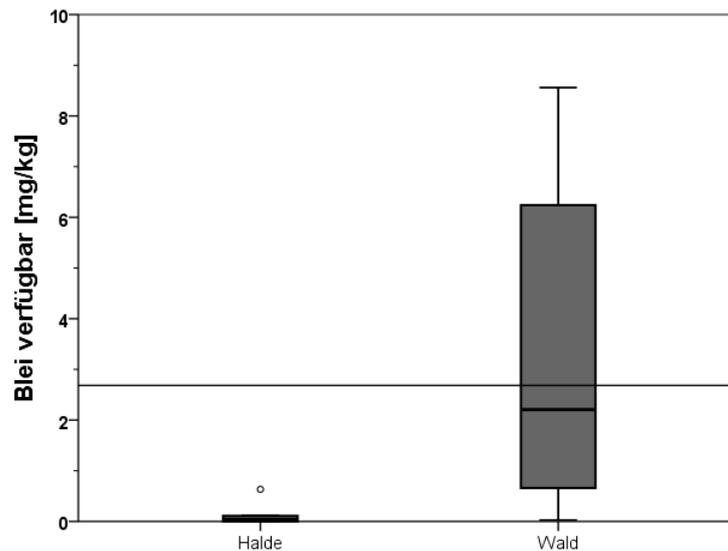


Abbildung 57: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Blei (Mann-Whitney Test)

#### Modell der Blei-Verfügbarkeit (Schrittweise lineare Regression)

Pb verfügbar in [mg/kg]  $R^2=0,78^{**}$       Pb verfügbar in [mg/kg] =  $16,31 - 3,68 \times \text{pH}$

Die Verfügbarkeit von Blei steigt mit sinkendem pH-Wert.

Einen signifikanten Unterschied ergibt die Auswertung für das verfügbare **Zink** (Abbildung 58) auf der *Halde* im Vergleich zum *Wald*. Eine geringe Zink-Verfügbarkeit auf der *Halde* (ca. 4 mg/kg) steht einer höheren Zink-Verfügbarkeit von ca. 12 mg/kg im umliegenden *Wald* gegenüber.

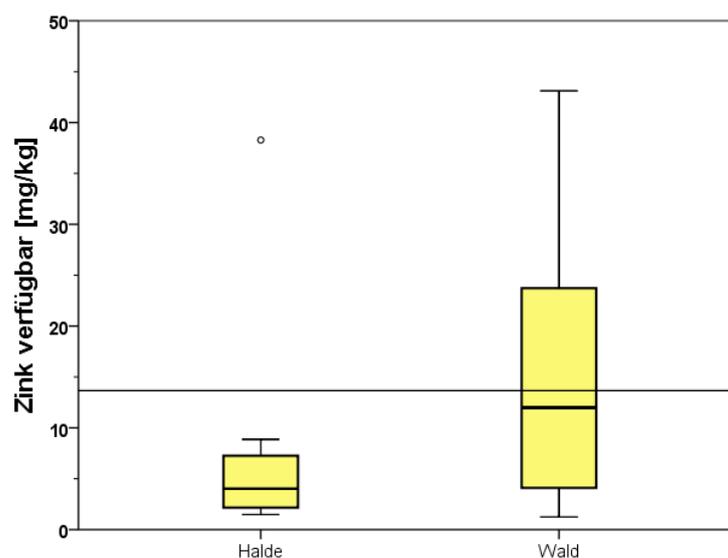


Abbildung 58: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Zink (Mann-Whitney Test)

### Modell der Zink-Verfügbarkeit (Schrittweise lineare Regression)

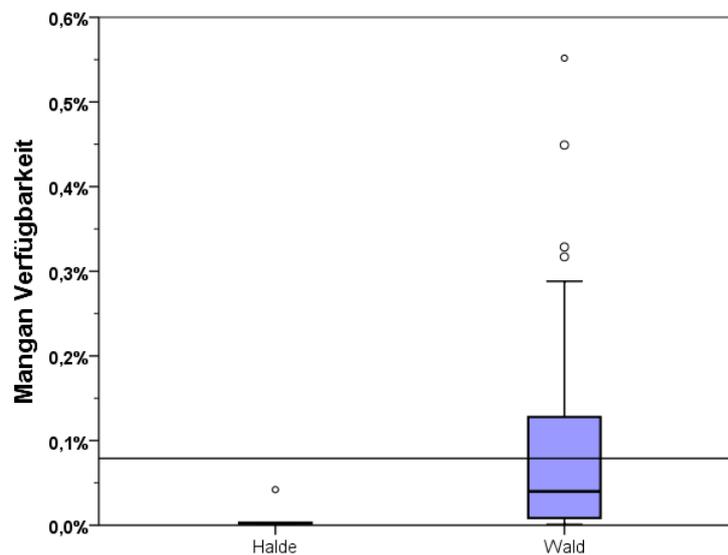
Zn verfügbar in [mg/kg]  $R^2=0,89^*$

Zn verfügbar in [mg/kg]  $=5,53 + 0,45 \times \text{Grobschluff fein} - 3,24 \times 10^{-5} \times \text{Fe ges}$

Zink ist gut verfügbar bei einem hohen Grobschluffanteil im Feinboden und geringen Eisen-Gesamtgehalt.

Die prozentuellen Schwermetall-Verfügbarkeiten mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen *Halde* und *Wald* werden wie folgt graphisch dargestellt:

Der hoch signifikante Unterschied der prozentuellen **Mangan**-Verfügbarkeit zwischen *Halde* und *Wald* ist aus Abbildung 59 ersichtlich. Während auf der *Halde* < 0,02% des Mangans verfügbar sind, findet man im *Wald* Werte von ca. 0,45% und höher.



**Abbildung 59: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Mangan-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test)**

Ähnlich stellt sich die prozentuelle **Eisen**-Verfügbarkeit in Abbildung 60 dar. Auch hier ist ein hoch signifikanter Unterschied zwischen *Halde* (ca. 0,01%) und umliegenden *Wald* mit 0,09% und höher hervorzuheben.

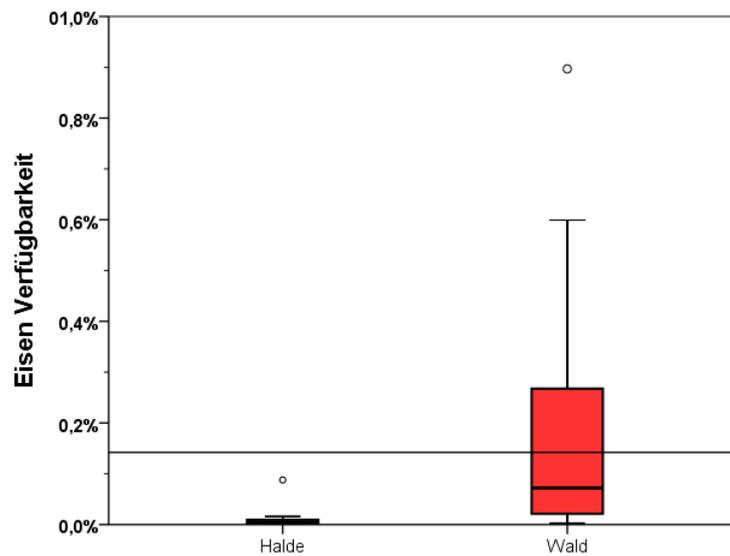


Abbildung 60: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Eisen-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test)

Die prozentuelle **Kupfer**-Verfügbarkeit (Abbildung 61) weist keinen signifikanten Unterschied zwischen *Halde* und *Wald* auf. Beide liegen ca. zwischen 1,6% und 1,8%.

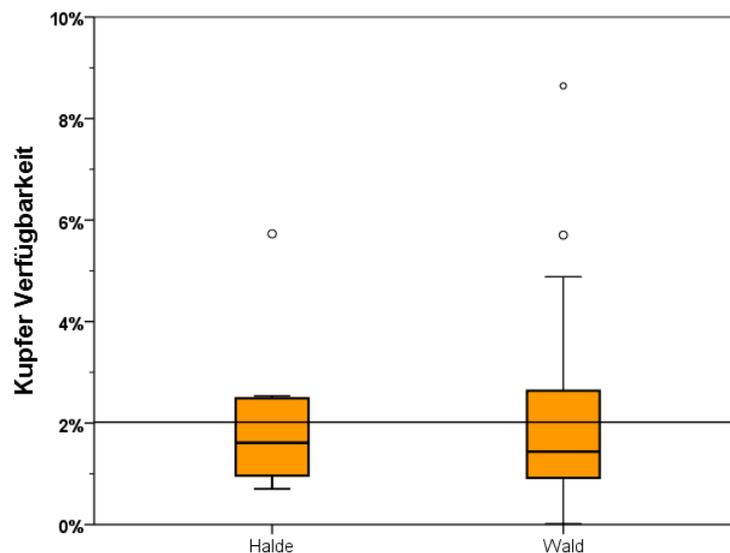


Abbildung 61: kein signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Kupfer-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test)

Die prozentuelle **Blei**-Verfügbarkeit liefert als Ergebnis in Abbildung 62 einen hoch signifikanten Unterschied zwischen *Halde* und *Wald*. Liegt die Blei-Verfügbarkeit auf der *Halde* bei < 1%, so erreicht sie im *Wald* ca. 5%.

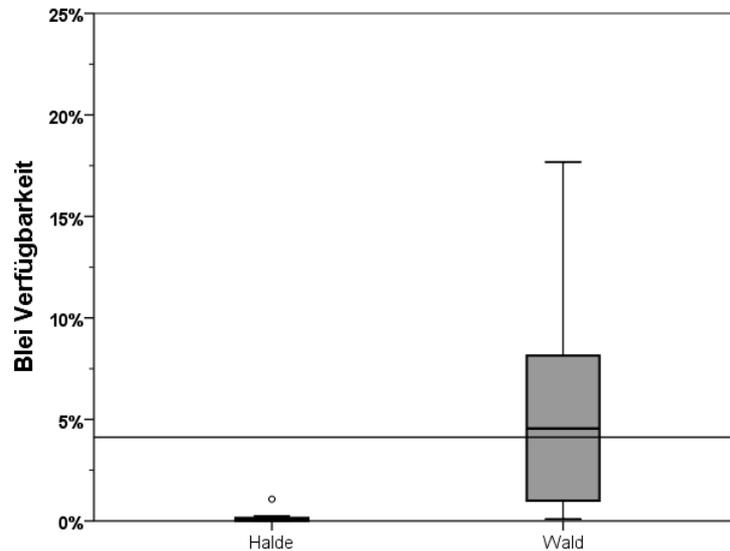


Abbildung 62: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Blei-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test)

Einen signifikanten Unterschied ergibt das Ergebnis des prozentuell verfügbaren **Zinks** (Abbildung 63) auf der *Halde* im Vergleich zum *Wald*. Eine geringe Zink-Verfügbarkeit auf der *Halde* (ca. 2,5%) steht einer höheren prozentuellen Zink-Verfügbarkeit von ca. 6% im umliegenden *Wald* gegenüber.

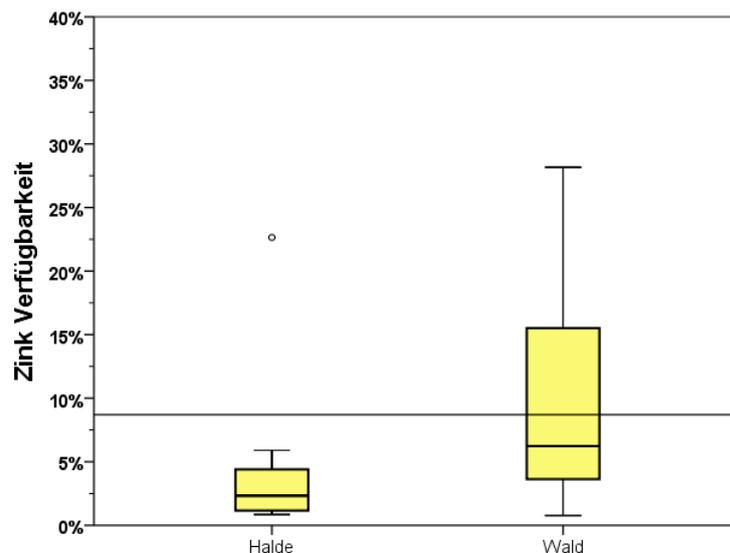


Abbildung 63: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Zink-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test)

Abbildung 64 weist einen hoch signifikanten Unterschied der prozentuellen **Kadmium-**Verfügbarkeit zwischen der *Halde* von ca. 12% und dem *Wald* von ca. 42% auf.

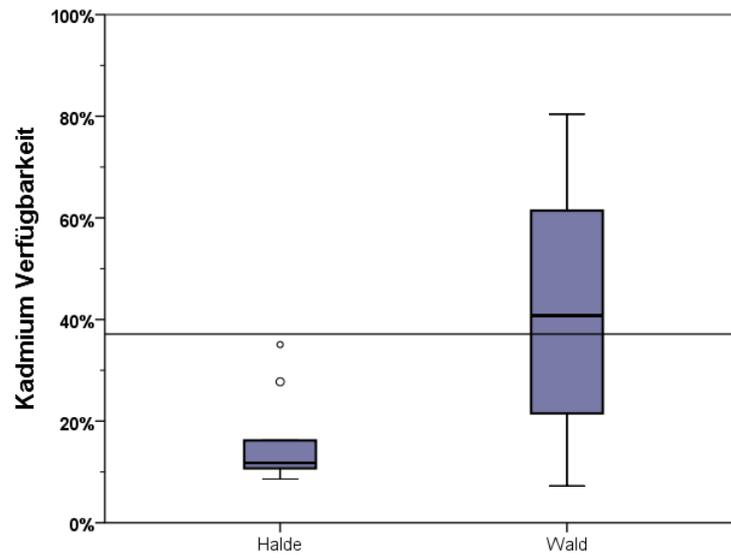


Abbildung 64: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Kadmium-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test)

### 5.3.4 Bodenzusammensetzung der Cluster

Die Messpunkte werden zu den bereits beschriebenen Clustern zusammengefasst und die Zusammensetzung der Bodenparameter in den Clustern ermittelt. Tabelle 13 enthält die Bodenparameterzusammensetzung der Cluster mit deren Standardabweichung. Signifikante Unterschiede der Bodenparameter zwischen den Clustern (Kruskall Wallis Test) sind mit \*signifikant und \*\* hoch signifikant gekennzeichnet.

Tabelle 13: Bodenzusammensetzung der Cluster (\*signifikant, \*\* hoch signifikant)

	Halde (Moose, Flechten)	Halde ( <i>Rumex acetosella</i> )	Waldrand ( <i>Rumex acetosella</i> )	Wald ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	Wald ( <i>Avenella flexuosa</i> )	Wald ( <i>Vaccinium, Avenella</i> )
Skelettanteil *	87,7 ± 4,2%	80,5 ± 9,4%	74,6 ± 7,0%	56,6 ± 22,8%	69,9 ± 14,3%	59,4 ± 9,9%
Feinerde gesamt *	12,3 ± 4,2%	19,5 ± 9,4%	25,4 ± 7,0%	43,4 ± 22,8%	30,1 ± 14,3%	40,6 ± 9,9%
WHC (Feinerde)	42,7 ± 2,6%	109,1 ± 138,8%	56,9 ± 12,2%	177,1 ± 153,0%	116,6 ± 67,1%	241,1 ± 132,2%
Sandgehalt gesamt	8,6 ± 4,3%	10,0 ± 5,1%	13,5 ± 3,1%	9,7 ± 4,9%	12,9 ± 4,4%	7,0 ± 7,1%
Grobschluff gesamt	2,1 ± 0,1%	3,6 ± 1,3%	4,8 ± 1,8%	13,8 ± 18,1%	9,3 ± 9,5%	21,4 ± 16,5%
Feinschluff gesamt *	0,4 ± 0,2%	2,2 ± 2,3%	2,3 ± 0,6%	7,1 ± 7,2%	2,9 ± 1,6%	3,9 ± 0,4%
Ton gesamt	0,7 ± 0,1%	1,6 ± 0,9%	1,3 ± 0,9%	5,8 ± 6,8%	2,1 ± 1,2%	4,4 ± 1,4%
Humus gesamt *	0,7 ± 0,5%	1,2 ± 0,3%	1,1 ± 0,0%	7,0 ± 6,1%	3,9 ± 4,0%	9,5 ± 4,3%
Sand (Feinboden) **	68,0 ± 11,8%	49,4 ± 22,6%	53,6 ± 2,4%	25,7 ± 16,9%	47,3 ± 15,1%	19,9 ± 22,4%
Grobschluff (Feinboden)	18,3 ± 5,3%	24,7 ± 22,9%	18,4 ± 2,2%	33,0 ± 29,4%	26,6 ± 15,4%	49,3 ± 28,6%
Feinschluff (Feinboden)	4,0 ± 2,8%	9,0 ± 6,5%	11,5 ± 0,9%	14,8 ± 9,4%	9,7 ± 3,3%	10,0 ± 3,5%
Ton (Feinboden) *	5,7 ± 0,9%	7,9 ± 2,2%	4,9 ± 2,0%	11,6 ± 7,7%	6,7 ± 1,8%	10,8 ± 0,8%
Humus (Feinboden)	7,0 ± 6,6%	8,0 ± 6,2%	4,5 ± 1,2%	16,4 ± 10,1%	11,1 ± 7,3%	9,5 ± 4,3%
pH *	4,6 ± 0,4	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,2	3,4 ± 0,7	3,7 ± 0,7	3,0 ± 0,3
Nitrat	0 mg/kg	0 mg/kg	0 mg/kg	0 mg/kg	0 mg/kg	0 mg/kg
Sulfat	1,8 ± 2,6 mg/kg	4,8 ± 4,6 mg/kg	16,1 ± 19,8 mg/kg	9,6 ± 7,6 mg/kg	8,0 ± 7,7 mg/kg	16,8 ± 7,6 mg/kg

	<b>Halde (Moose, Flechten)</b>	<b>Halde (<i>Rumex acetosella</i>)</b>	<b>Waldrand (<i>Rumex acetosella</i>)</b>	<b>Wald (<i>Vaccinium myrtillus</i>)</b>	<b>Wald (<i>Avenella flexuosa</i>)</b>	<b>Wald (<i>Vaccinium, Avenella</i>)</b>
<b>Ammonium</b>	0,0 ± 0,0 mg/kg	0,1 ± 0,3 mg/kg	0,3 ± 0,1 mg/kg	0,2 ± 0,3 mg/kg	0,3 ± 0,3 mg/kg	0,7 ± 1,1 mg/kg
<b>Kalium</b>	61,0 ± 26,2 mg/kg	173,0 ± 294,4 mg/kg	93,5 ± 22,4 mg/kg	359,8 ± 329,5 mg/kg	201,3 ± 234,1 mg/kg	483,5 ± 419,4 mg/kg
<b>Phosphat</b>	7,1 ± 6,1 mg/kg	11,4 ± 9,1 mg/kg	9,7 ± 0,9 mg/kg	21,4 ± 15,9 mg/kg	16,7 ± 9,8 mg/kg	35,3 ± 4,0 mg/kg
<b>Neigung in Grad</b>	25 ± 4	16 ± 14	21 ± 13	18 ± 10	21 ± 8	27 ± 10
<b>Mangan gesamt **</b>	25705 ± 421 mg/kg	29350 ± 6828 mg/kg	32800 ± 232 mg/kg	4637 ± 4021 mg/kg	9862 ± 7830 mg/kg	3568 ± 1237 mg/kg
<b>Eisen gesamt **</b>	255853 ± 47190 mg/kg	234502 ± 111470 mg/kg	254157 ± 15219 mg/kg	82195 ± 49993 mg/kg	165251 ± 69910 mg/kg	56044 ± 49085 mg/kg
<b>Kupfer gesamt **</b>	7762 ± 1683 mg/kg	10384 ± 3812 mg/kg	9006 ± 3376 mg/kg	2191 ± 1589 mg/kg	4810 ± 3534 mg/kg	1104 ± 1067 mg/kg
<b>Zink gesamt</b>	141,1 ± 12,7 mg/kg	175,8 ± 10,9 mg/kg	176,0 ± 15,6 mg/kg	155,9 ± 27,5 mg/kg	164,3 ± 33,7 mg/kg	126,5 ± 31,9 mg/kg
<b>Kadmium gesamt</b>	0,50 ± 0,07 mg/kg	0,74 ± 0,22 mg/kg	0,72 ± 0,00 mg/kg	0,50 ± 0,26 mg/kg	0,49 ± 0,24 mg/kg	0,56 ± 0,52 mg/kg
<b>Blei gesamt</b>	34,4 ± 0,8 mg/kg	63,9 ± 16,3 mg/kg	85,0 ± 50,0 mg/kg	69,0 ± 24,7 mg/kg	64,2 ± 24,0 mg/kg	62,5 ± 15,4 mg/kg
<b>Mangan verfügbar</b>	0,61 ± 0,26 mg/kg	1,73 ± 2,93 mg/kg	0,93 ± 0,22 mg/kg	3,59 ± 3,29 mg/kg	2,01 ± 2,34 mg/kg	4,81 ± 4,18 mg/kg
<b>Eisen verfügbar *</b>	21,5 ± 20,4 mg/kg	15,2 ± 9,9 mg/kg	12,8 ± 4,9 mg/kg	161,1 ± 179,2 mg/kg	99,7 ± 98,3 mg/kg	146,1 ± 130,7 mg/kg
<b>Kupfer verfügbar</b>	311,9 ± 284,2 mg/kg	192,6 ± 113,2 mg/kg	78,3 ± 44,9 mg/kg	64,5 ± 81,7 mg/kg	88,8 ± 96,6 mg/kg	27,4 ± 36,1 mg/kg
<b>Zink verfügbar</b>	5,8 ± 4,4 mg/kg	9,1 ± 14,4 mg/kg	4,8 ± 3,6 mg/kg	17,8 ± 14,6 mg/kg	12,4 ± 10,3 mg/kg	24,5 ± 15,9 mg/kg
<b>Kadmium verfügbar</b>	0,099 ± 0,073 mg/kg	0,128 ± 0,125 mg/kg	0,102 ± 0,175 mg/kg	0,240 ± 0,179 mg/kg	0,154 ± 0,083 mg/kg	0,329 ± 0,263 mg/kg
<b>Blei verfügbar **</b>	0,021 ± 0,029 mg/kg	0,155 ± 0,237 mg/kg	0,059 ± 0,083 mg/kg	4,353 ± 3,128 mg/kg	2,460 ± 2,673 mg/kg	4,524 ± 3,077 mg/kg
<b>Mn% verfügbar **</b>	0,00 ± 0,00%	0,01 ± 0,02%	0,00 ± 0,00%	0,16 ± 0,17%	0,05 ± 0,06%	0,17 ± 0,17%
<b>Eisen% verfügbar **</b>	0,01 ± 0,01%	0,02 ± 0,03%	0,01 ± 0,00%	0,28 ± 0,28%	0,09 ± 0,11%	0,26 ± 0,01%
<b>Kupfer% verfügbar</b>	3,71 ± 2,86%	1,82 ± 0,74%	0,83 ± 0,19%	2,75 ± 2,35%	1,50 ± 0,97%	1,70 ± 1,63%
<b>Zink% verfügbar</b>	3,98 ± 2,73%	5,27 ± 8,54%	2,78 ± 2,30%	11,66 ± 9,73%	7,53 ± 6,01%	18,35 ± 7,96%
<b>Kadmium% verfügbar **</b>	19,2 ± 12,0%	15,2 ± 10,1%	14,2 ± 2,4%	47,6 ± 22,1%	36,8 ± 20,9%	64,3 ± 12,3%
<b>Blei% verfügbar **</b>	0,06 ± 0,09%	0,26 ± 0,41%	0,05 ± 0,07%	6,71 ± 4,93%	3,77 ± 3,99%	6,34 ± 3,23%

### 5.3.5 Unterschiede der Bodenparameter zwischen den Clustern

Die Parameter mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen den Clustern werden wie folgt graphisch dargestellt (nicht signifikante Unterschiede werden nicht aufgeführt):

Einen signifikanten Unterschied zwischen den Clustern weist der **Skelettanteil** auf (Abbildung 65). Auf der *Halde (Moose, Flechten)* ist mit ca. 88% der höchste Skelettanteil lokalisiert. Je weiter man sich von der Halde entfernt, desto geringer wird der Skelettanteil im Boden. Im Cluster *Halde (Rumex acetosella)* liegt der Skelettanteil noch bei etwa 85%, Am *Waldrand* sind es ca. 75%. Im *Wald (Vaccinium myrtillus)* liegt der Skelettanteil, ähnlich dem *Wald (Avenella und Vaccinium)*, bei etwa 58%. Im Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* ist im Gegensatz zu den beiden anderen Wald Clustern ein etwas erhöhter Skelettanteil von ca. 74% zu erkennen.

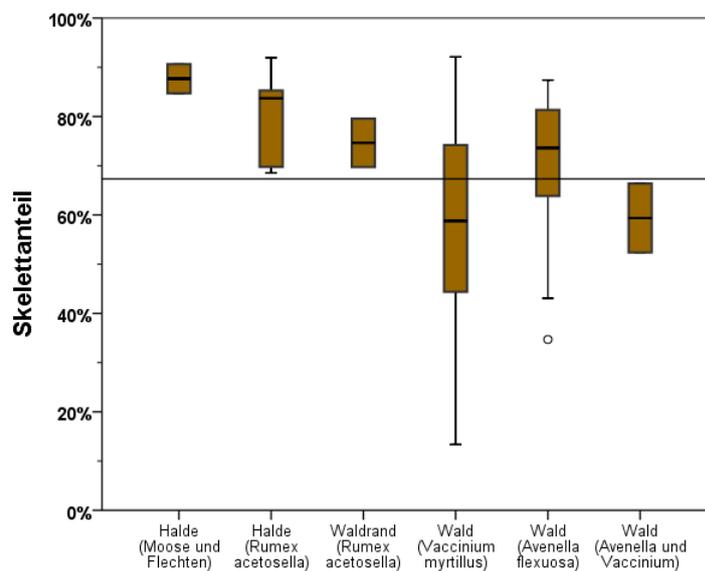


Abbildung 65: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Skelettanteil (Kruskal-Wallis Test); der waagrechte Strich zeigt das arithmetische Mittel aller Proben, Kreise kennzeichnen Extremwerte;

Aus Abbildung 66 geht hervor, dass bei steigendem Skelettanteil der Tongehalt gesamt abnimmt, allerdings nicht in linearer Beziehung ( $R^2=0,59$ ).

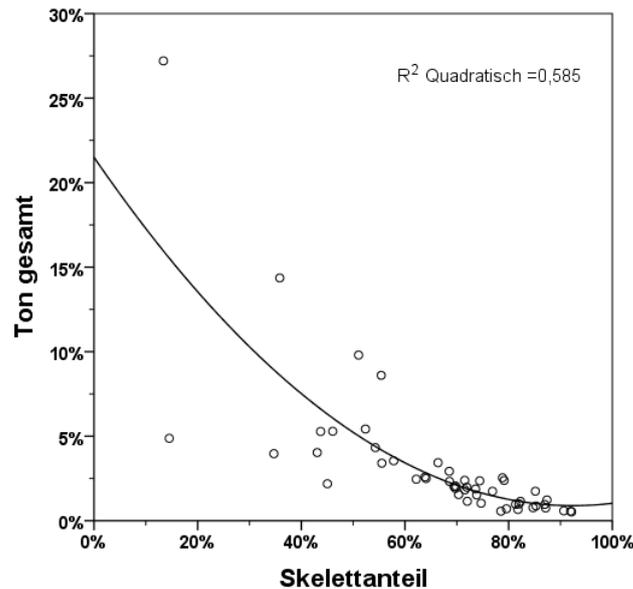


Abbildung 66: quadratische Korrelation zwischen Ton gesamt und dem Skelettanteil

Signifikante Unterschiede des **Feinerde**-Gesamtgehalts (Abbildung 67) und des **Feinschluff**-Gesamtgehalts (Abbildung 68) zwischen den Clustern zeigen auf den Clustern der Halde jeweils einen geringeren Anteil von Feinerde (etwa 12%) und Feinschluff (ca. 0,5%) als in den Clustern des Waldes mit Feinerde ca. 40% und Feinschluff ca. 4%. Entgegen des Skelettanteils nehmen diese beiden Parameter mit Entfernung zum Cluster *Halde (Moose, Flechten)* zu. Der Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* weist hier die geringsten Gehalte an Feinerde (ca. 28%) und Feinschluff (2,5%) im Wald auf.

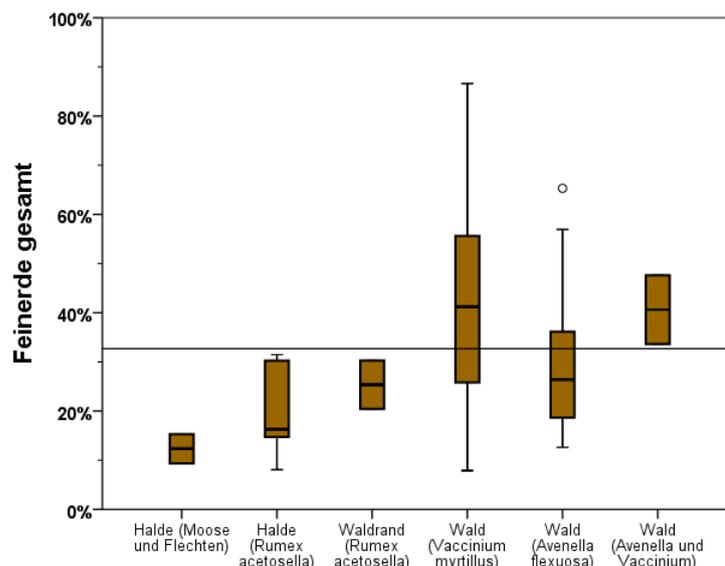


Abbildung 67: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Feinerde gesamt (Kruskal-Wallis Test)

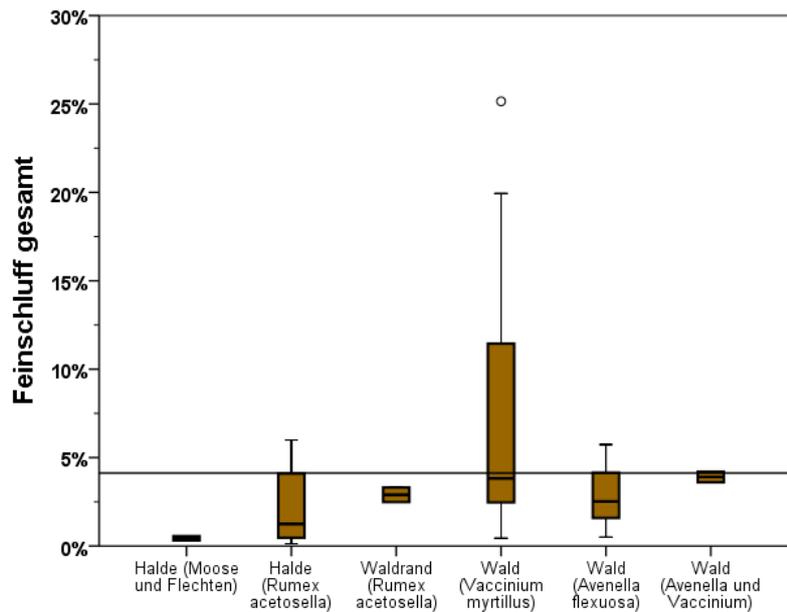


Abbildung 68: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Feinschluff gesamt (Kruskal-Wallis Test)

Der **Humus**-Gesamtgehalt (Abbildung 69) zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den Clustern auf. Während die Cluster *Halde* und *Waldrand* sich bei unter 2% Humus-Gesamtgehalt bewegen, steigt der Humus-Gesamtgehalt im Cluster *Wald (Vaccinium myrtillus)* auf ca. 6%, der Cluster *Wald (Avenella, Vaccinium)* besitzt mit etwa 9% den höchsten Humus-Gesamtgehalt. Der *Wald (Avenella flexuosa)* hat mit ca. 3% den geringsten Humus-Gesamtgehalt im Wald.

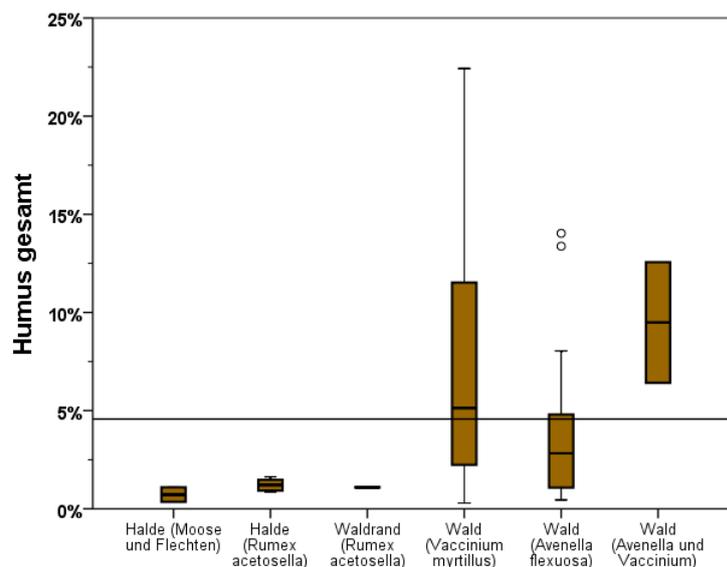
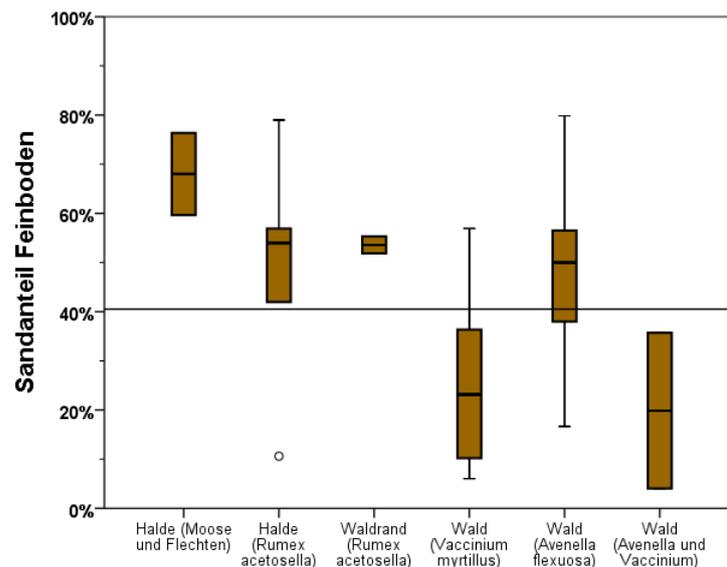


Abbildung 69: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Humus-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test)

Der **Sandanteil** im Feinboden (Abbildung 70) ergibt hoch signifikante Unterschiede zwischen den Clustern. Der Cluster *Halde (Moose, Flechten)* weist mit etwa 69% den höchsten Sandanteil im Feinboden auf. *Halde (Rumex acetosella)* und *Waldrand (Rumex acetosella)* kommen auf etwa 55%. Der Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* hat ca. 50% Sandanteil im Feinboden. 20-23% Sandanteil im Feinboden sind in den Clustern *Wald (Vaccinium myrtillus)* und *Wald (Avenella, Vaccinium)* zu finden. In Abbildung 70 ist eine Trennung zwischen Halde mit höherem Sandanteil im Feinboden und dem umliegenden Wald mit einem geringeren Sandanteil im Feinboden gut zu erkennen.



**Abbildung 70: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Sandanteil im Feinboden (Kruskal-Wallis Test)**

Signifikante Unterschiede zeigen die Cluster im Bezug auf den **Tonanteil** im Feinboden (Abbildung 71). Während am *Waldrand* der Tonanteil im Feinboden bei ca. 5% liegt, weisen die zwei Cluster der *Halde* mit 6-7% einen etwas höheren Tonanteil im Feinboden auf. Der Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* liegt mit etwa 7,5% nahe den Clustern der Halde. 9% Tonanteil im Feinboden erreicht der *Wald (Vaccinium myrtillus)*. Der höchste Tonanteil im Feinboden ist im *Wald (Avenella und Vaccinium)* zu finden.

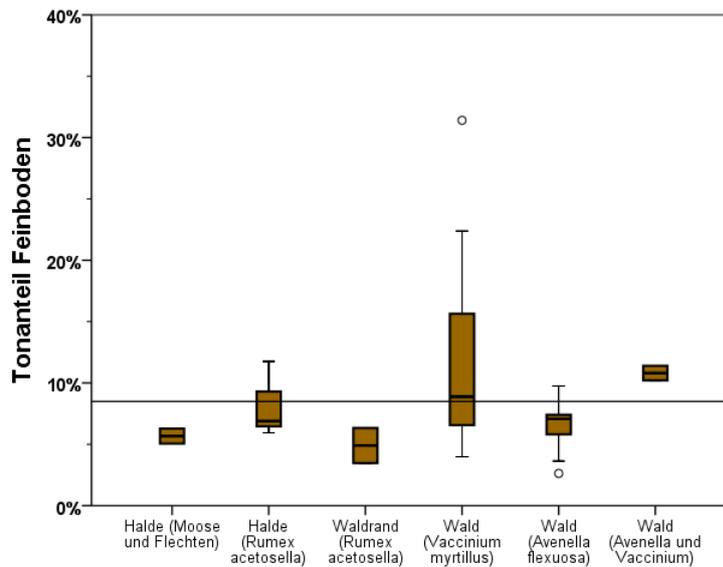


Abbildung 71: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Tonanteil im Feinboden (Kruskal-Wallis Test)

Abbildung 72 zeigt die signifikant unterschiedlichen **pH-Werte** der Cluster. Der höchste pH von 4,6 zeichnet den Cluster *Halde (Moose, Flechten)* aus. Ein pH-Wert von 4,4 geht mit den Clustern *Halde (Rumex acetosella)* und *Waldrand (Rumex acetosella)* einher. Im eher saureren Bereich befinden sich die Cluster des Waldes mit pH 3,8 *Wald (Avenella flexuosa)*, pH 3,2 *Wald (Vaccinium myrtillus)* und pH 3 *Wald (Avenella, Vaccinium)*.

Gut erkennbar ist die Auftrennung zwischen der weniger sauren Halde und dem saureren Wald in Abbildung 72.

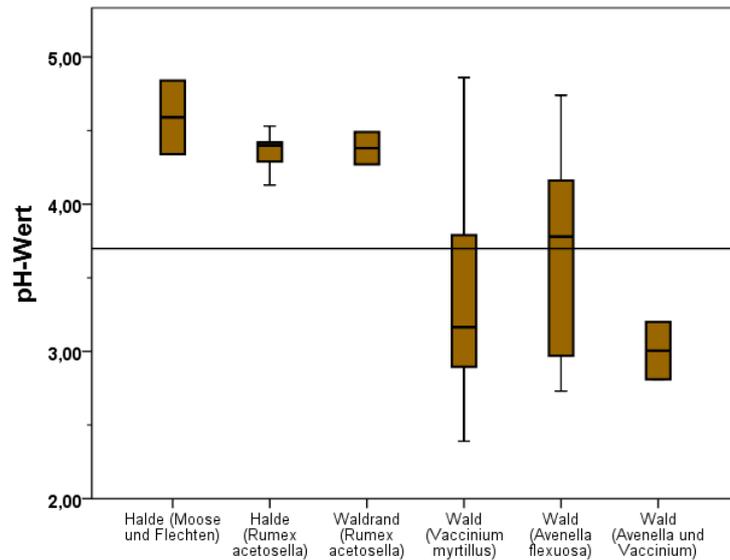


Abbildung 72: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich pH-Wert (Kruskal-Wallis Test)

Die **Schwermetall-Gesamtgehalte** mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen den Clustern werden wie folgt graphisch dargestellt:

In Abbildung 73 sind hohe **Mangan**-Werte auf den Clustern der *Halde* im Gegensatz zu denen der Cluster im *Wald* erkennbar. Die höchsten Mangan-Werte sind bei Anwesenheit von *Rumex acetosella* im Cluster zu finden. Ein klarer Unterschied zwischen den Clustern der *Halde* und den Clustern im *Wald* kristallisiert sich heraus.

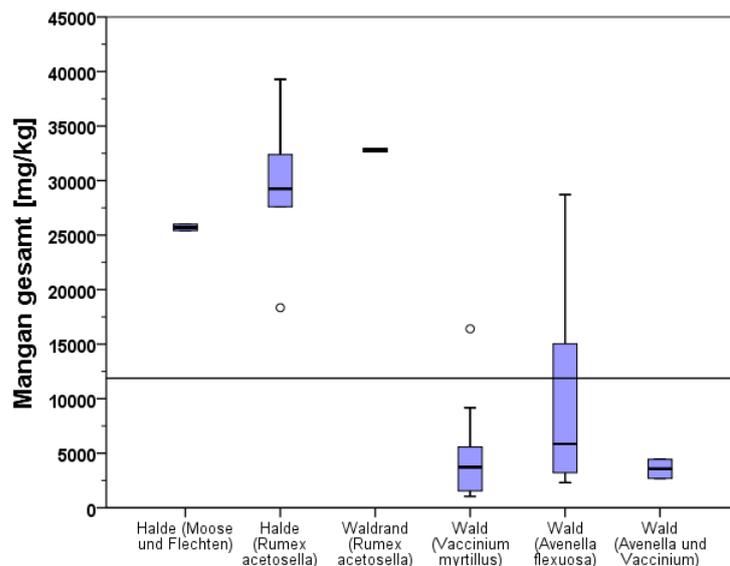
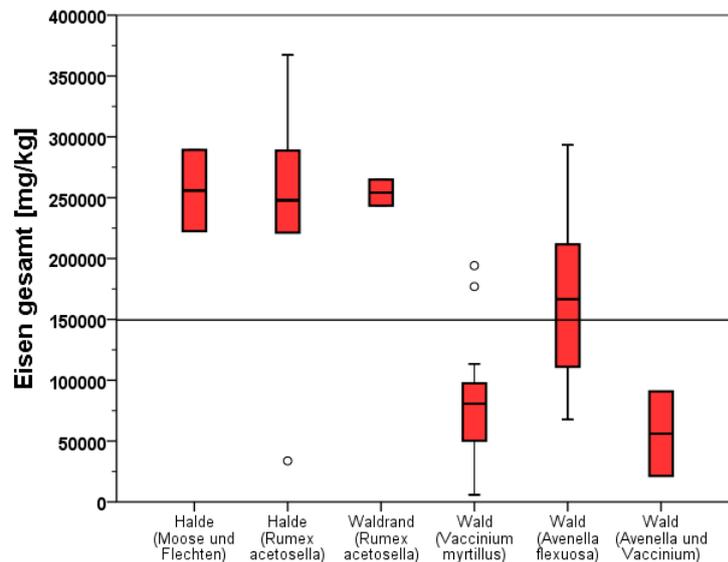


Abbildung 73: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Mangan-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test)

Hoch signifikant verhält sich der Unterschied des **Eisen**-Gesamtgehalts zwischen den Clustern. So ist auf den Clustern *Halde* und *Waldrand* mit 250.000 mg/kg (Abbildung 74) ein höherer Eisen-Gesamtgehalt als in den Clustern im *Wald* (50.000 – 100.000 mg/kg) vorzufinden. Auffallend ist, dass im Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* mit 160.000 mg/kg ein relativ hoher Eisen-Gesamtgehalt vorhanden ist. Auch hier ist die *Halde* klar vom *Wald* abgegrenzt.



**Abbildung 74: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Eisen-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test)**

Eine ähnliche Situation zeigt sich beim **Kupfer**-Gesamtgehalt (Abbildung 75). Die Cluster auf der *Halde* weisen einen Kupfer-Gesamtgehalt von 8.000-101.1000 mg/kg auf, während der Kupfer-Gesamtgehalt der Cluster im *Wald* bei 1.000-4.000 mg/kg liegt. Die höchsten Kupfer-Werte sind bei den beiden Clustern *Waldrand* und *Halde* mit *Rumex acetosella* zu finden. In Abbildung 75 sind die Cluster der *Halde* und die Cluster des *Waldes* in Bezug auf ihren Kupfer-Gesamtgehalt gut sichtbar voneinander getrennt.

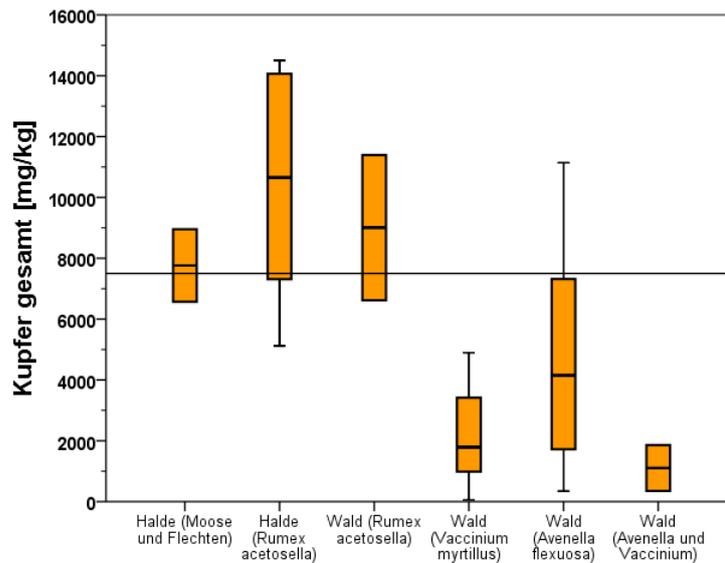


Abbildung 75: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Kupfer-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test)

Die **Schwermetall-Verfügbarkeiten** mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen den Clustern werden wie folgt graphisch dargestellt:

In Abbildung 76 ist zu erkennen, dass die **Eisen-Verfügbarkeit** in den Clustern auf der *Halde* mit < 50 mg/kg geringer als in den Clustern des umliegenden *Waldes* (100-150 mg/kg) ist. Ähnliches zeigt die **Blei-Verfügbarkeit** (Abbildung 78). Die Blei-Verfügbarkeit der Cluster auf der *Halde* und am *Waldrand* liegt bei 0, in den Clustern im *Wald* hingegen kann eine Blei-Verfügbarkeit von 5 mg/kg festgestellt werden.

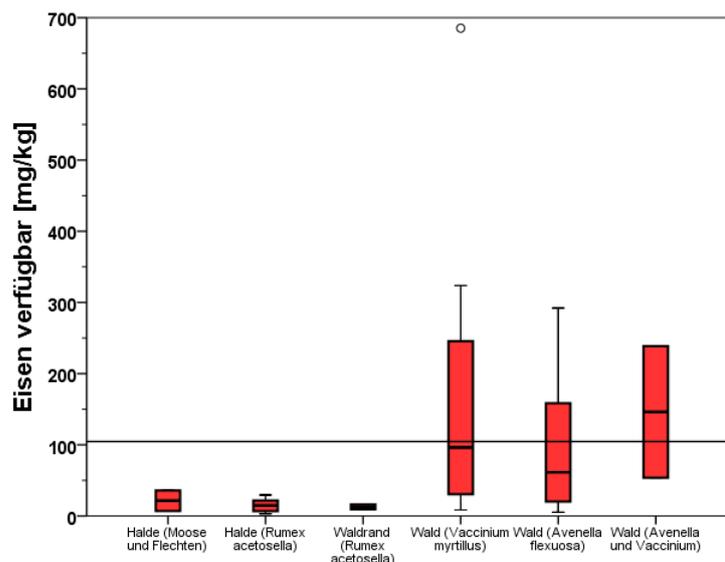


Abbildung 76: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich verfügbarem Eisen (Kruskal-Wallis Test)

Die **Kupfer**-Verfügbarkeit, dargestellt in Abbildung 77, ist in den beiden Clustern auf der *Halde* höher (ca. 150 – 300 mg/kg) als in den restlichen Clustern (< 100 mg/kg).

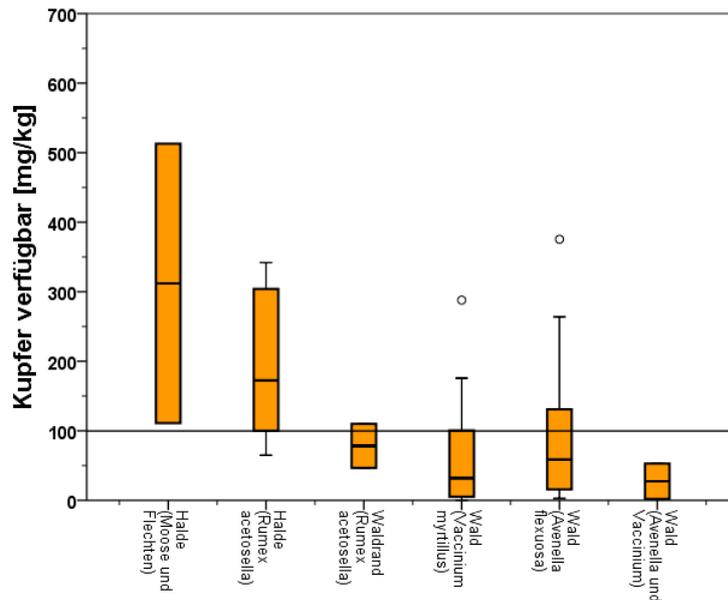


Abbildung 77: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich verfügbarem Kupfer (Kruskal-Wallis Test)

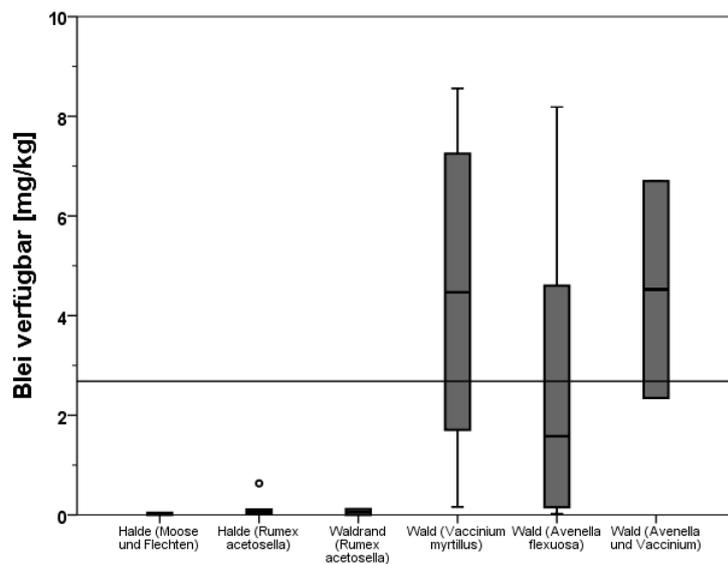


Abbildung 78: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich verfügbarem Blei (Kruskal-Wallis Test)

Die prozentuellen Schwermetall-Verfügbarkeiten mit (hoch) signifikanten Unterschieden zwischen den Clustern werden wie folgt graphisch dargestellt:

Hoch signifikante Unterschiede ergeben die Ergebnisse der prozentuellen **Mangan**-Verfügbarkeit zwischen den Clustern. Die Cluster der *Halde* und am *Waldrand* weisen eine sehr geringe, gegen null gehende prozentuelle Mangan-Verfügbarkeit auf. In den Clustern des *Waldes* ist die Mangan-Verfügbarkeit mit 0,1-0,2% etwas höher (Abbildung 79).

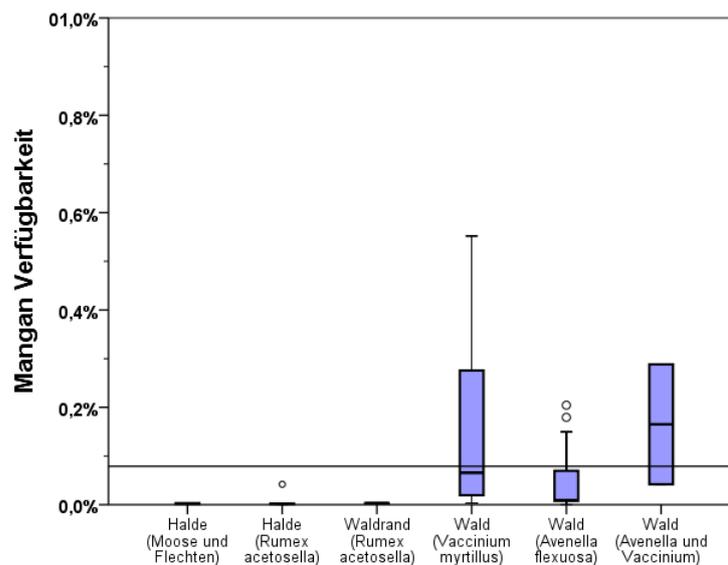


Abbildung 79: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Mangan-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test)

Ähnlich der prozentuellen Mangan-Verfügbarkeit verhält sich die prozentuelle **Eisen**-Verfügbarkeit (Abbildung 80), welche in den Clustern der *Halde* und am *Waldrand* den Wert 0% und in den Clustern des *Waldes* Werte von 0,05% bis 0,3% aufweist.

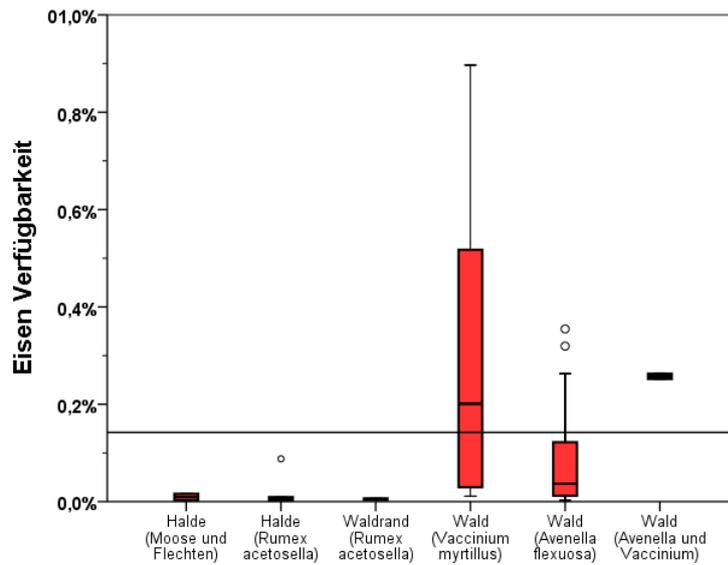


Abbildung 80: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Eisen-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test)

Die prozentuelle **Kupfer**-Verfügbarkeit (Abbildung 81) ist im Cluster *Halde (Moose, Flechten)* mit 4% am höchsten. Die Cluster im *Wald* weisen eine Kupfer-Verfügbarkeit von 1,5-2% auf. Die geringste Kupfer-Verfügbarkeit ist im Cluster *Waldrand* mit 1% vorzufinden. Es treten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Clustern auf.

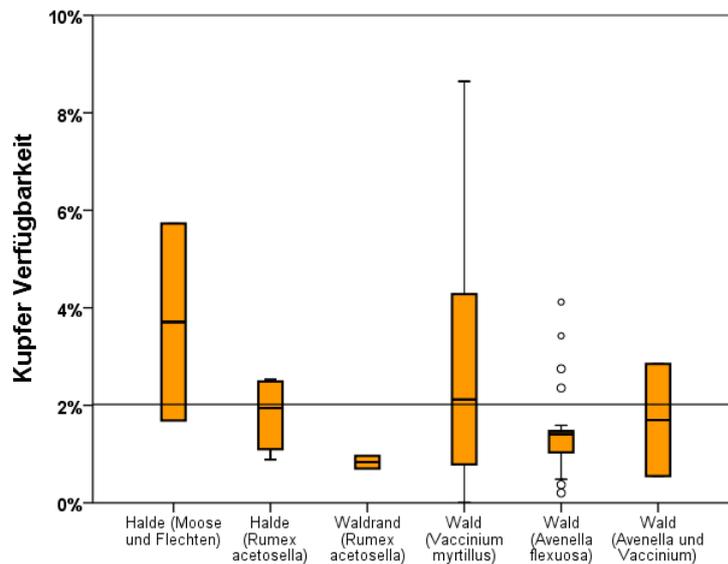
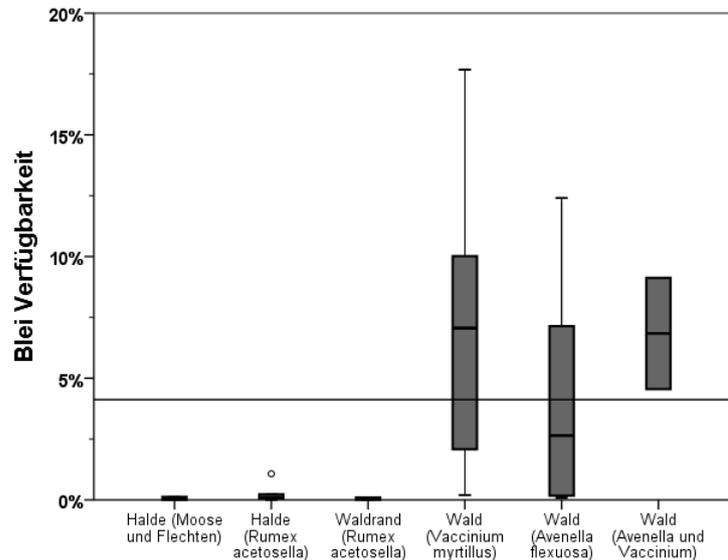


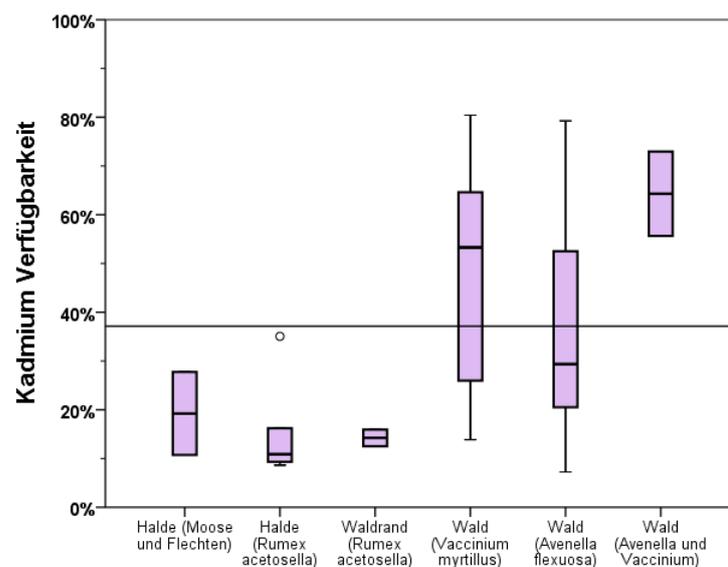
Abbildung 81: keine signifikanten Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Kupfer-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test)

Hoch signifikante Unterschiede der Cluster weist die prozentuelle **Blei**-Verfügbarkeit auf. Die geringste prozentuelle Blei-Verfügbarkeit ist in den Clustern *Halde* und *Waldrand* lokalisiert. In den Clustern des *Waldes* schwankt die Blei-Verfügbarkeit zwischen 2,5% im *Wald (Avenella flexuosa)* und 7,5% im *Wald (Avenella und Vaccinium)* und *Wald (Vaccinium myrtillus)* (Abbildung 82).



**Abbildung 82: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Blei-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test)**

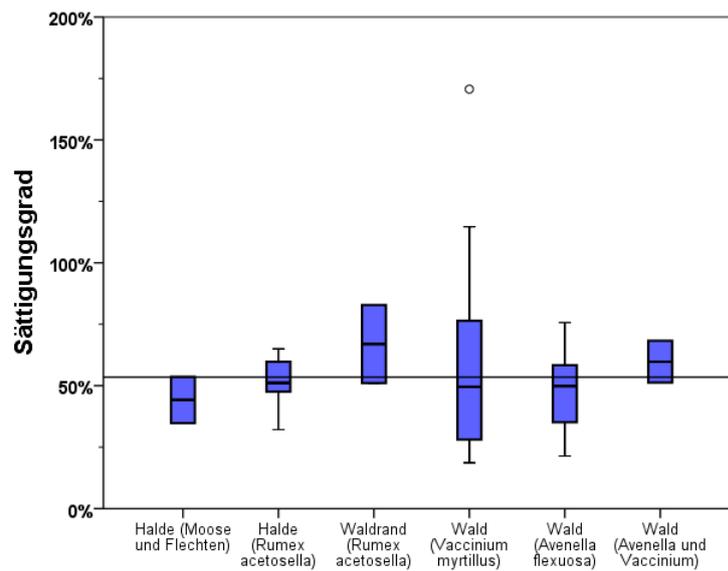
Abbildung 83 lässt erkennen, dass die prozentuelle **Kadmium**-Verfügbarkeit in den Clustern *Halde* und *Waldrand* zwischen 15% und 20%, die Kadmium-Verfügbarkeit im Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* bei 30% und in den übrigen Clustern bei 50-65% liegt und somit hoch signifikante Unterschiede zwischen den Clustern darstellt.



**Abbildung 83: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich der prozentuellen Kadmium-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test)**

Der Sättigungsgrad ohne (hoch) signifikanten Unterschied zwischen den Clustern wird wie folgt graphisch dargestellt:

Zwischen den Clustern gibt es keinen signifikanten Unterschied des **Sättigungsgrades**, wie in Abbildung 84 dargestellt.



**Abbildung 84: keine signifikanten Unterschiede des Sättigungsgrades zwischen den Clustern (Kruskal-Wallis Test)**

### 5.3.6 Wasserhaushalt

Aus Tabelle 14 lassen sich die Korrelationen zwischen dem aktuellen Wassergehalt und den für den Wasserhaushalt wichtigen Bodenparametern ablesen (\*\* hoch signifikant, \* signifikant). Ton fein und Feinschluff fein korrelieren nicht mit dem aktuellen Wassergehalt.

Tabelle 14: Korrelationen ( $R^2$ ) zwischen aktuellem Wassergehalt und Bodenparametern (Spearman Test)

aktueller Wassergehalt	
WHC	0,79**
Skelettanteil	-0,40**
Humus fein	0,79**
Sand fein	-0,72**
Grobschluff fein	0,67**
Ton fein	-
Feinschluff fein	-
Beschattung	0,41**

Eine partielle Korrelation von aktuellem Wassergehalt und Hangneigung ergibt  $R^2 = 0,39^{**}$ , bei gleicher Wasserhaltekapazität ist der Standort mit größerer Hangneigung trockener.

Eine lineare Korrelation ( $R^2 = 0,60$ ) zwischen dem aktuellen Wassergehalt und der Wasserhaltekapazität ist in Abbildung 85 graphisch dargestellt. Je höher die Wasserhaltekapazität, desto höher ist auch der aktuelle Wassergehalt. Der Unterschied zur Korrelation ( $R^2$ ) der Wasserhaltekapazität in Tabelle 14 ergibt sich aus der Anwendung von verschiedenen Tests.

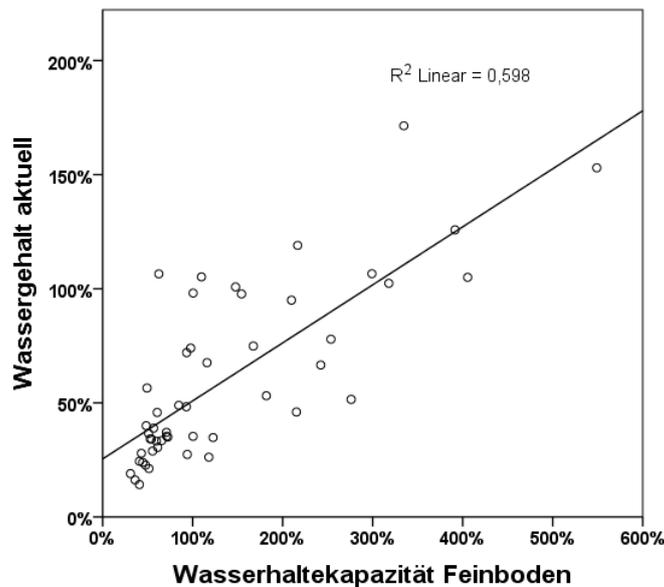
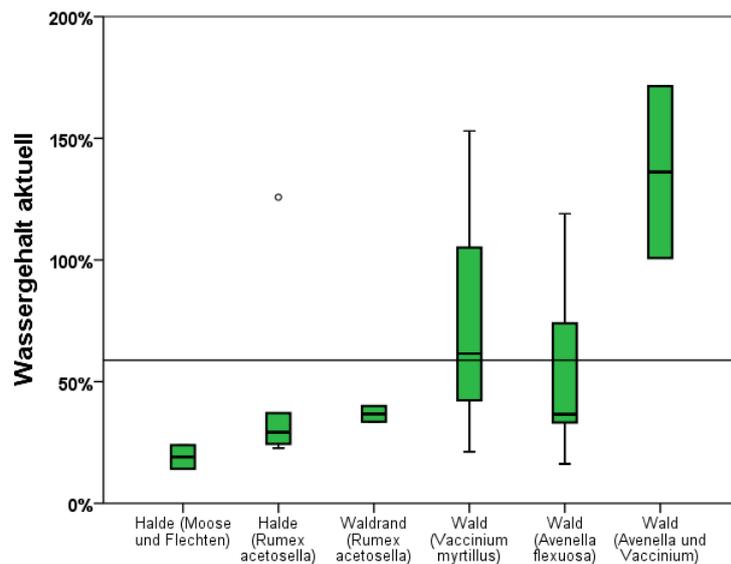


Abbildung 85: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen aktuellem Wassergehalt und Wasserhaltekapazität (Pearson Test)

## Wasserhaushalt der Cluster und Bewaldung

Einen signifikanten Unterschied zwischen den Clustern stellt der aktuelle Wassergehalt in Abbildung 86 dar. In den Clustern auf der *Halde* liegt er zwischen ca. 20% und 40%, wobei der Cluster *Halde* (Moose, Flechten) den geringsten aktuellen Wassergehalt aufweist. Der Cluster *Wald* (*Avenella flexuosa*) liegt mit seinen Werten nahe den Clustern auf der *Halde* und am *Waldrand*. Im *Wald* (*Vaccinium myrtillus*) hingegen liegt der aktuelle Wassergehalt bei etwa 60%. Mit ca. 130% aktuellem Wassergehalt zeigt der Cluster *Wald* (*Avenella* und *Vaccinium*) die höchsten Werte auf.



**Abbildung 86: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Wassergehalt aktuell (Kruskal-Wallis Test)**

Vergleicht man die *Halde* mit dem *Wald* auf signifikante Unterschiede bezüglich ihres aktuellen Wassergehalts, so zeigt Abbildung 87 einen signifikant höheren aktuellen Wassergehalt im *Wald* (etwa 50%) als auf der *Halde* mit ca. 30% (Abbildung 87).

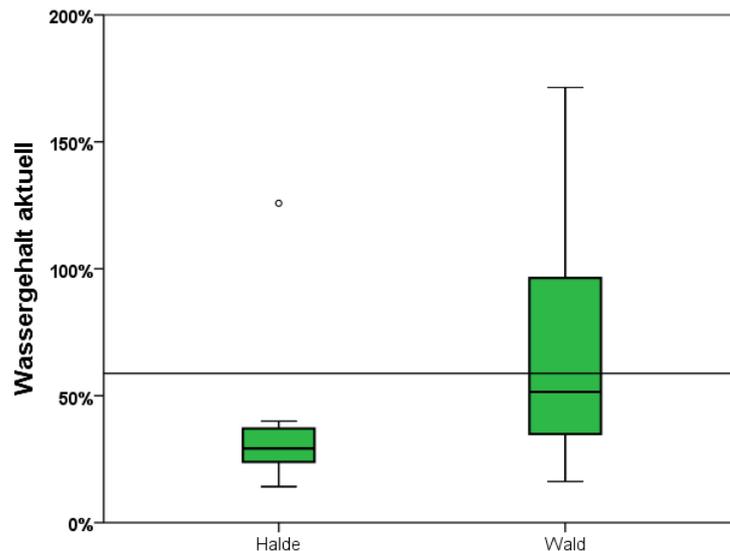


Abbildung 87: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der Feinerde gesamt (Mann-Whitney Test)

#### Wasserhaushalt bei verschiedenen Parametern

Signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt treten bei unterschiedlich hoher **Beschattung** auf (Abbildung 88). Mit zunehmender Beschattung nimmt auch der aktuelle Wassergehalt zu, so liegt der aktuelle Wassergehalt an vollsonnigen Standorten bei ca. 30%. Im Halbschatten steigt er leicht an auf etwa 40%. Im Schatten wird mit etwa 75% der höchste aktuelle Wassergehalt gemessen, im tiefen Schatten sinkt er auf etwa 70%.

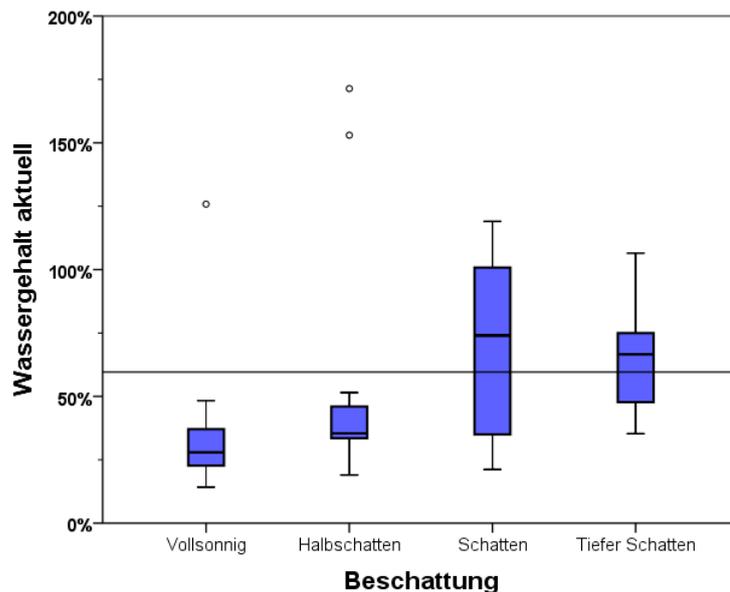
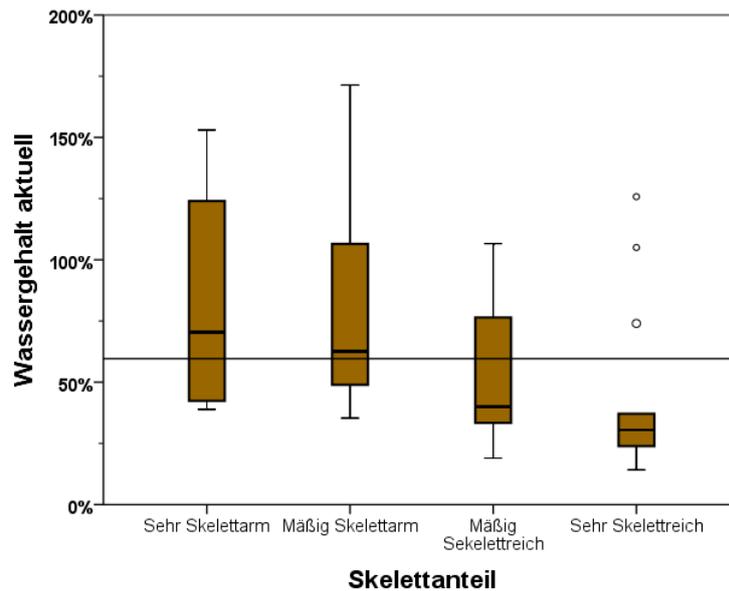


Abbildung 88: signifikanter Unterschied im aktuellen Wassergehalt im Bezug auf die Beschattung (Kruskal-Wallis Test)

Signifikant unterschiedlich verhält sich der aktuelle Wassergehalt bei verschieden hohen **Skelettanteilen** (Abbildung 89). Je geringer der Skelettanteil ist, desto höher ist der prozentuelle aktuelle Wassergehalt. Sehr skelettarme Bereiche weisen mit etwa 74% den höchsten aktuellen Wassergehalt auf, im mäßig Skelettarmen liegt er bei etwa 70%. Mäßig skelettreiche Standorte kommen auf 40%, sehr skelettreiche auf 30% aktuellen Wassergehalt (Legende Skelettanteil siehe Tabelle 3).



**Abbildung 89: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen Skelettanteile im Boden (Kruskal-Wallis Test)**

Signifikant unterschiedliche aktuelle Wassergehalte sind bei verschiedenen **pH-Werten** zu beobachten. Im extrem Sauren und sehr Sauren ist der aktuelle Wassergehalt mit etwa 75% bzw. ca. 100% höher als im mäßig Sauren mit etwa 35% und im schwach Sauren mit etwa 30% aktuellem Wassergehalt (Abbildung 90) (Legende pH-Wert siehe Tabelle 3).

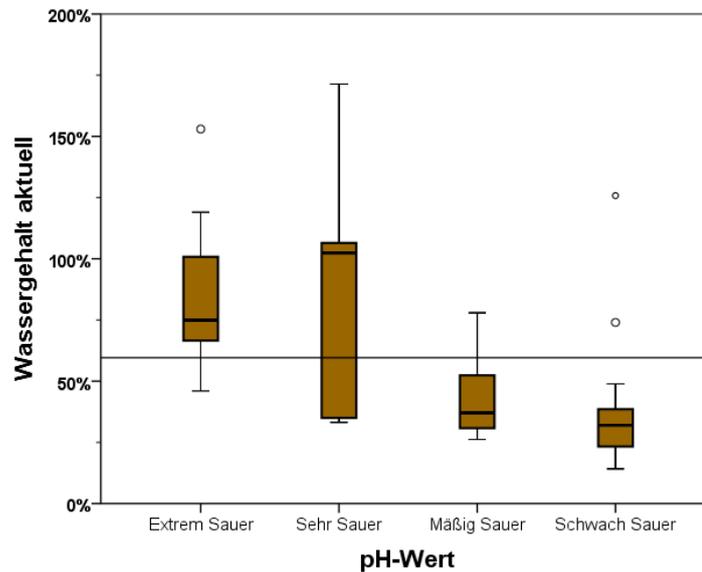


Abbildung 90: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen pH-Werte im Boden (Kruskal-Wallis Test)

Mit steigendem **Humusanteil im Feinboden** steigt auch der aktuelle Wassergehalt (Abbildung 91). Im Humusfreien liegt der Wassergehalt bei etwa 25%, im Humusarmen steigt er auf ca. 35%. Mäßig humose Bereiche zeigen einen aktuellen Wassergehalt von ca. 53% und humose Standorte kommen auf einen aktuellen Wassergehalt von etwa 103% (Legende Humusanteil siehe Tabelle 3).

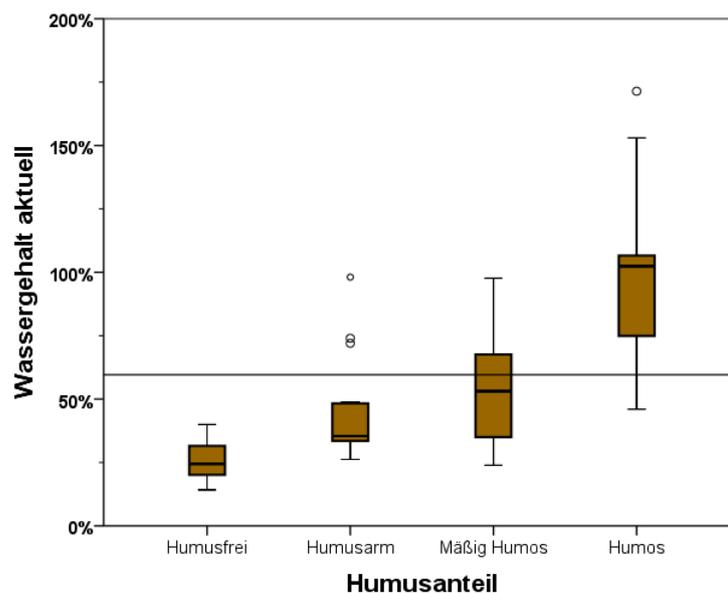
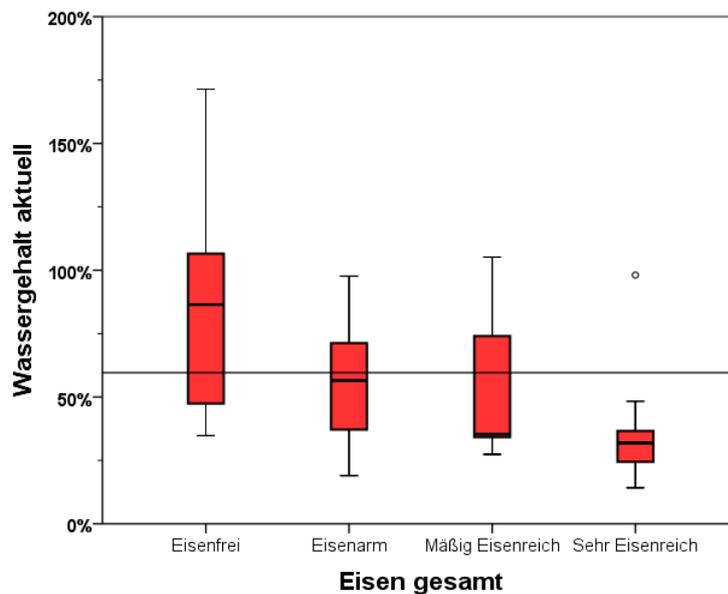


Abbildung 91: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen Humusanteile im Feinboden (Kruskal-Wallis Test)

Der aktuelle Wassergehalt mit (hoch) signifikanten Unterschieden bei steigenden **Schwermetall-Gesamtgehalten** wird wie folgt graphisch dargestellt:

Signifikant unterschiedlich zeigt sich der aktuelle Wassergehalt bei steigendem **Eisen-Gesamtgehalt** im Boden (Abbildung 92). Den höchsten aktuellen Wassergehalt von etwa 85% findet man auf eisenfreien Standorten. In eisenarmen Bereichen sinkt der aktuelle Wassergehalt auf ca. 54%, im mäßig Eisenreichen liegt der aktuelle Wassergehalt bei etwa 35%. Ca. 30% Wassergehalt zeichnen die sehr eisenreichen Standorte aus (Legende Eisen-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).



**Abbildung 92: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] im Boden (Kruskall Wallis Test)**

Vergleicht man die Wassergehalte bei verschiedenen hohen **Kupfer-Gesamtgehalten** im Boden, so geht daraus hervor, dass in kupferarmen Bereichen mit etwa 85% der höchste aktuelle Wassergehalt vorliegt. Kupferfreie Standorte liegen bei etwa 75% aktuellem Wassergehalt. Mit zunehmendem Kupfer-Gesamtgehalt sinkt der aktuelle Wassergehalt, im mäßig Kupferreichen auf etwa 35% und im sehr Kupferreichen auf ca. 30% (Abbildung 93), (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

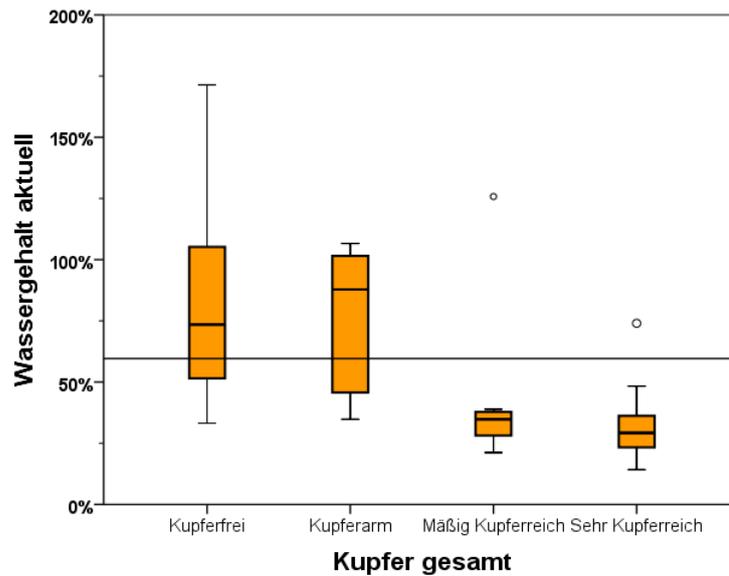


Abbildung 93: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen Kupfer-Gesamtgehalte im Boden (Kruskall-Wallis Test)

Korrelationen zwischen aktuellem Wassergehalt und repräsentativen Pflanzen:

Aus Tabelle 15 lassen sich die Korrelationen zwischen aktuellem Wassergehalt und ausgewählten, repräsentativen Pflanzenarten ablesen (\*\* hoch signifikant, \* signifikant, nicht signifikant).

Tabelle 15: Korrelation( $R^2$ ) zwischen aktuellem Wassergehalt und Pflanzenarten (Spearman Test)

<u>aktueller Wassergehalt</u>
<i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) positiv **
<i>Rumex acetosella</i> negativ**
<i>Vaccinium myrtillus</i>
<i>Avenella flexuosa</i>
<i>Quercus petrea</i>
<i>Melampyrum pratense</i>
<i>Hypnum cupressiforme</i> positiv**
<i>Pleurozium schreberi</i>
<i>Pohlia sp.</i> negativ*
<i>Cladonia cervicornis</i> negativ*
<i>Cladonia pyxidata</i> negativ**
<i>Porpidia macrocarpa</i> negativ*

Die Korrelationen zwischen aktuellem Wassergehalt und ausgewählten, repräsentativen Pflanzen werden wie folgt graphisch dargestellt:

*Pinus sylvestris* ist bei einem aktuellen Wassergehalt von etwa 50% vorhanden und fehlt bei einem geringeren aktuellen Wassergehalt von ca. 30% (Abbildung 94).

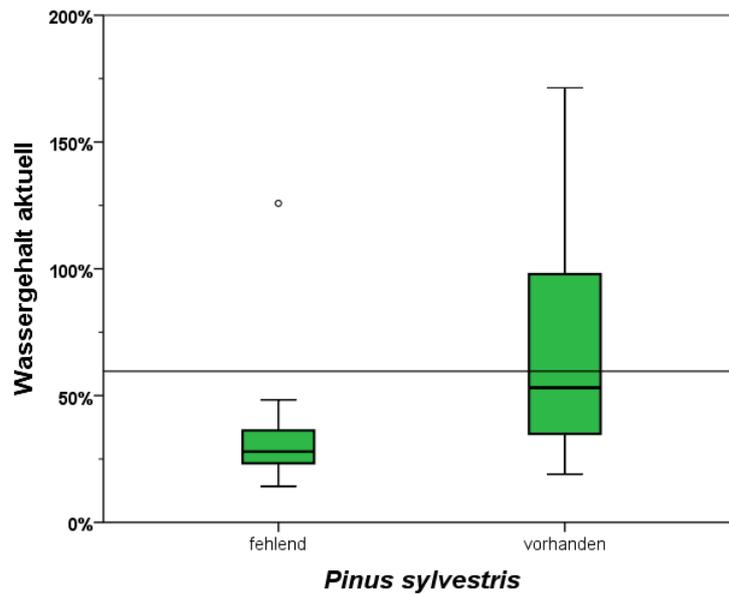


Abbildung 94: hoch signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Pinus sylvestris* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

*Rumex acetosella* bevorzugt einen aktuellen Wassergehalt von ca. 35% und fehlt bei höherem Wassergehalt (Abbildung 95).

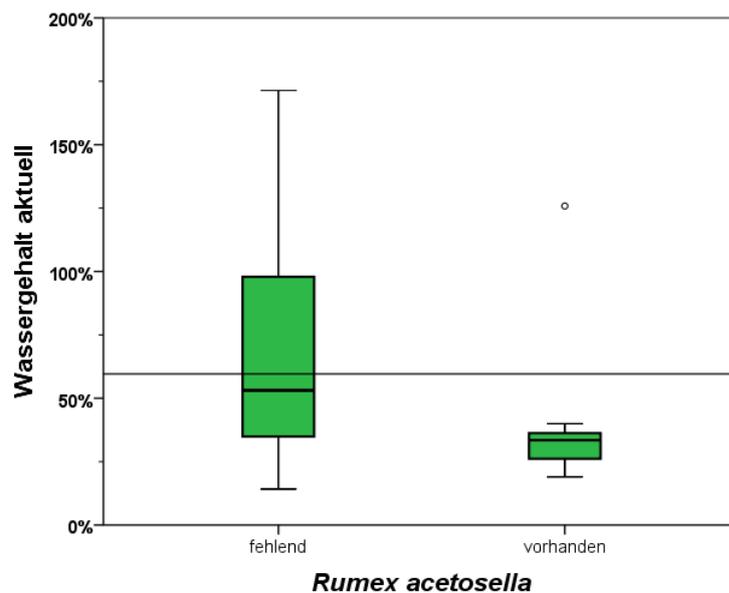


Abbildung 95: hoch signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Rumex acetosella* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

Keine signifikanten Unterschiede treten bei *Avenella flexuosa* auf (Abbildung 96). *Avenella flexuosa* freie Standorte weisen einen aktuellen Wassergehalt von etwa 45%, die von *Avenella flexuosa* besiedelten Standorte einen aktuellen Wassergehalt von ca. 48% auf.

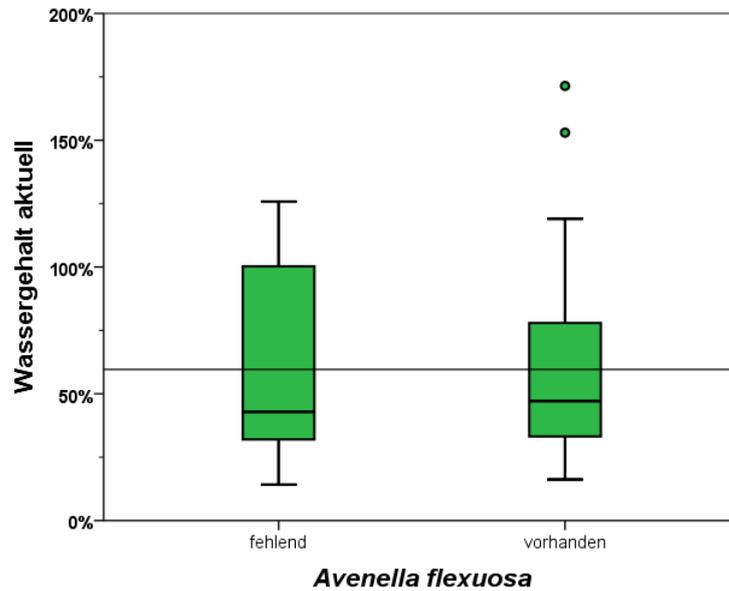


Abbildung 96: kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Avenella flexuosa* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

*Vaccinium myrtillus* ist bei einem höheren aktuellen Wassergehalt von etwa 75% vorhanden und fehlt bei einem geringeren aktuellen Wassergehalt von ca. 35% (Abbildung 97).

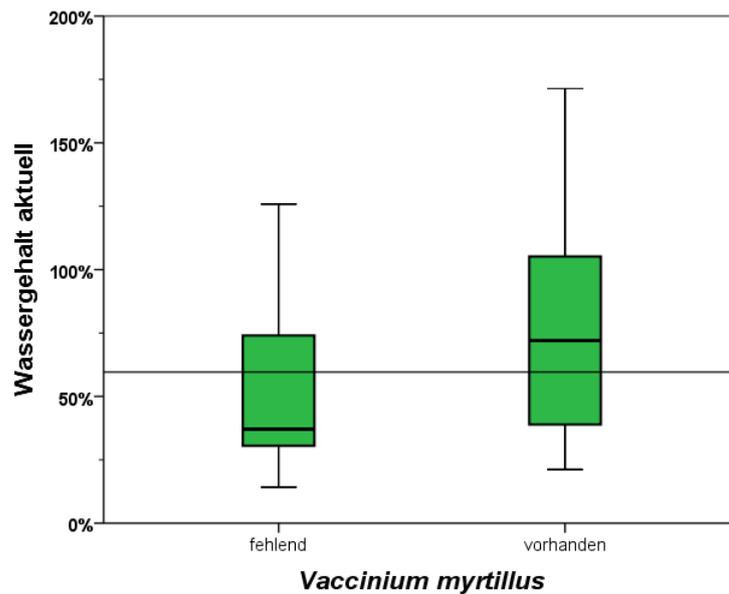


Abbildung 97: kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Vaccinium myrtillus* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

Ähnlich verhält sich *Hypnum cupressiforme*. Das Moos findet man bei einem aktuellen Wassergehalt von ca. 75%, sinkt der aktuelle Wassergehalt auf ca. 35%, so fehlt *Hypnum cupressiforme* auf den Standorten (Abbildung 98).

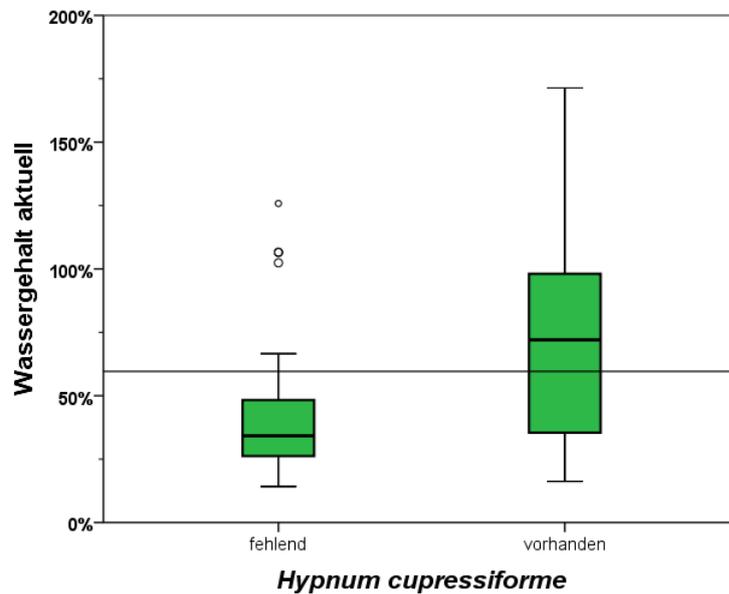


Abbildung 98: kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Hypnum cupressiforme* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

Abbildung 99 stellt einen Unterschied zwischen dem Vorhandensein oder Fehlen von *Pohlia sp.* bei einem bestimmten aktuellen Wassergehalt dar, *Pohlia sp.* ist bei einem Wassergehalt von <50% vorhanden.

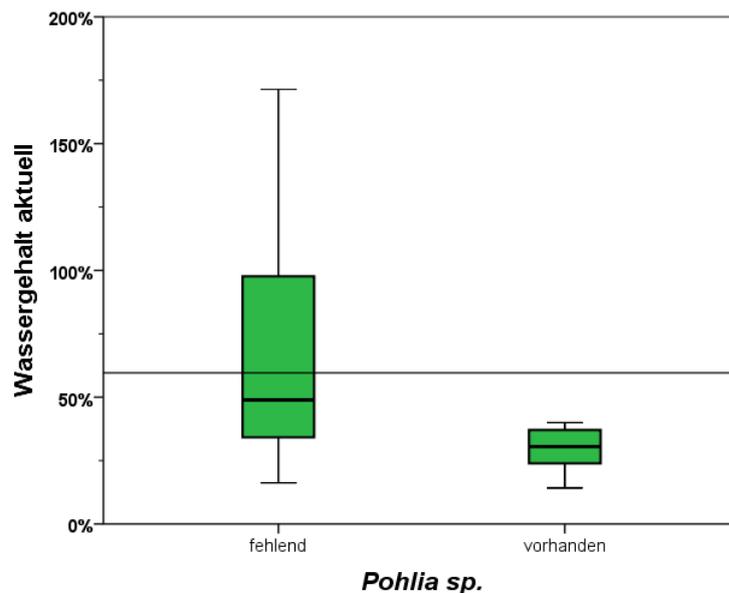


Abbildung 99: signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Pohlia sp.* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

*Cladonia pyxidata* ist bei einem aktuellen Wassergehalt von ca. 30% vorhanden. Steigt der aktuelle Wassergehalt, fehlt diese Flechte auf den Standorten (Abbildung 100).

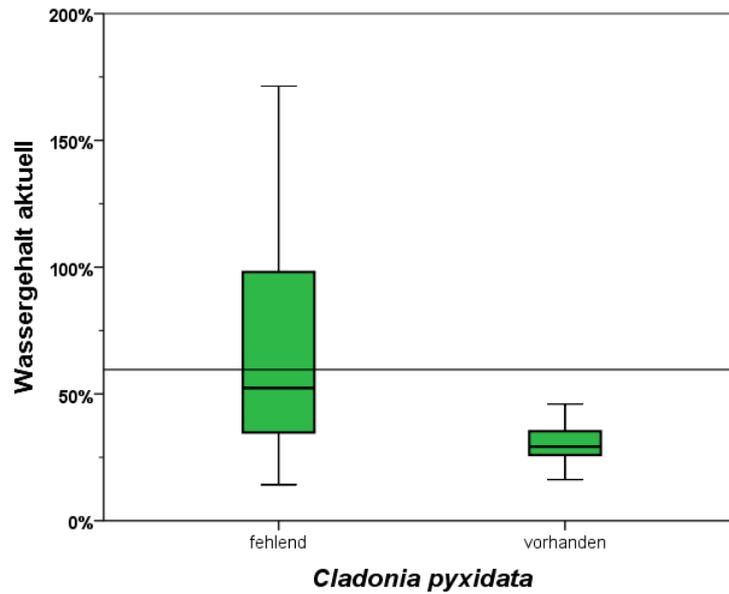


Abbildung 100: hoch signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Cladonia pyxidata* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

Bei etwa 30% aktuellem Wassergehalt ist *Porpidia macrocarpa* vorhanden, steigt der Wassergehalt an, verschwindet sie aus der Vegetation (Abbildung 101).

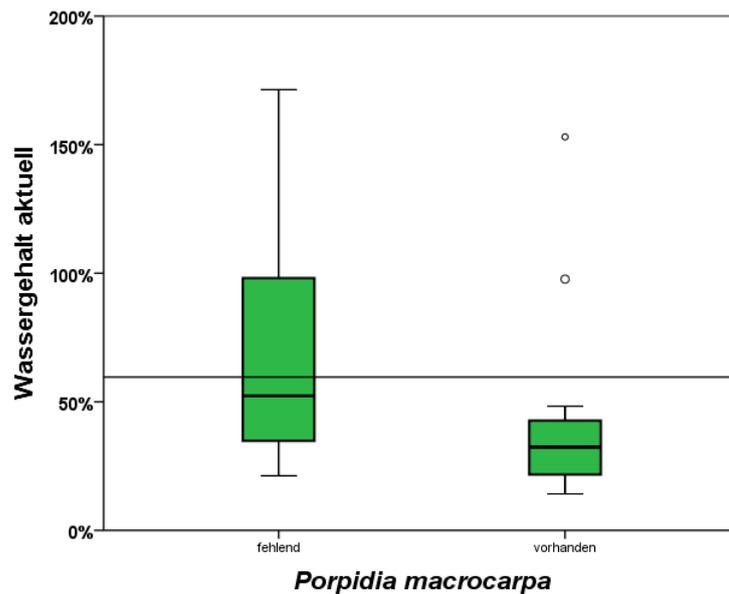


Abbildung 101: signifikanter Unterschied beim Auftreten von *Porpidia macrocarpa* in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test)

### 5.3.7 Korrelationen zwischen den Bodenparametern

Die Korrelationen zwischen den erhobenen Bodenparametern werden wie folgt ermittelt. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Korrelationen ( $R^2$ ) zwischen den Bodenparametern (Spearman-Test, \*signifikant, \*\*hochsignifikant).

Tabelle 16: Korrelation ( $R^2$ ) zwischen den Bodenparametern (\* signifikant, \*\* hoch signifikant), (Spearman-Test)

	Skelett	pH-Wert	Humus fein
Sand gesamt	-0,35*	--	-0,32*
Ton gesamt	-0,89**	-0,34*	--
Feinschluff gesamt	-0,83**	--	--
Grobschluff gesamt	-0,51**	-0,66**	0,79**
Humus gesamt	-0,72**	-0,73**	0,85**
Feinerde gesamt	-1**	-0,39**	0,30*
Grobschluff fein	--	-0,58**	0,82**
Feinschluff fein	-0,33**	--	-0,40**
Sand fein	0,58**	0,46**	-0,62**
Ton fein	-0,34*	--	--
WHC	--	-0,72**	0,83**
Pb %	-0,40**	-0,88**	0,62**
Cd %	-0,34*	-0,89**	0,79**
Zn %	--	-0,74**	0,88**
Fe %	-0,35*	-0,80**	0,71**
Cu %	--	--	--
Mn %	-0,47**	-0,76**	0,86**
Pb gesamt	--	--	0,36**
Cd gesamt	--	0,35*	--
Zn gesamt	--	--	--
Cu gesamt	0,53**	0,68**	-0,58**
Fe gesamt	0,45**	0,53**	-0,68**
Mn gesamt	0,54**	0,79**	-0,67**
Cu verfügbar	0,57**	-0,51**	-0,31*
Cd verfügbar	--	-0,53**	0,82**
Pb verfügbar	-0,42**	-0,93**	0,72**
Zn verfügbar	--	-0,71**	0,88**
Fe verfügbar	-0,29*	-0,80**	0,54**
Mn verfügbar	-0,29*	-0,62**	0,87**
Kalium	-0,30*	-0,62**	0,87**
Phosphat	--	-0,57**	0,68**
Ammonium	--	--	--
Sulfat	--	-0,34*	0,29*
Humus fein	-0,30*	-0,73**	X
pH-Wert	0,39**	X	-0,73**
Skelett	X	0,39**	-0,30*

	Sulfat	Ammonium	Phosphat	Kalium	Mn verf
Sand gesamt	--	--	-0,33*	-0,36*	-0,36**
Ton gesamt	--	--	--	--	--
Feinschluff gesamt	--	--	--	--	--
Grobschluff gesamt	0,34*	--	0,48**	0,76**	0,75**
Humus gesamt	0,29*	--	0,54**	0,75**	0,75**
Feinerde gesamt	--	--	--	0,30*	0,29*
Grobschluff fein	0,32*	--	0,57**	0,80**	0,80**
Feinschluff fein	--	--	--	--	--
Sand fein	--	--	-0,43**	-0,74**	0,74**
Ton fein	--	--	--	--	--
WHC	0,39**	--	0,60**	0,88**	0,88**
Pb %	0,30*	--	0,47**	0,53**	0,53**
Cd%	0,30*	--	0,65**	0,74**	0,64**
Zn %	0,38**	--	0,65**	0,91**	0,91**
Fe %	--	--	0,60**	0,69**	0,69**
Cu %	--	--	--	--	--
Mn %	0,36*	--	0,68**	0,89**	0,89**
Pb gesamt	0,30*	--	-0,31*	--	--
Cd gesamt	--	--	--	--	--
Zn gesamt	--	--	--	--	--
Cu gesamt	--	--	-0,47**	-0,51**	-0,51**
Fe gesamt	-0,28*	--	-0,60**	-0,78**	-0,78**
Mn gesamt	-0,32*	--	-0,51**	-0,60**	-0,60**
Cu verfügbar	--	--	--	--	--
Cd verfügbar	0,39**	0,28*	0,56**	0,88**	0,88**
Pb verfügbar	0,35*	--	0,53**	0,61**	0,61**
Zn verfügbar	0,40**	--	0,65**	0,91**	0,91**
Fe verfügbar	--	--	0,45**	0,49**	0,49**
Mn verfügbar	0,31*	--	0,69**	1**	X
Kalium	0,31*	--	0,69**	X	1**
Phosphat	--	--	X	0,69**	0,69**
Ammonium	0,41**	X	--	--	--
Sulfat	X	0,41**	--	0,31*	0,31*
Humus fein	0,29*	--	0,68**	0,87**	0,87**
pH-Wert	-0,34*	--	-0,57**	-0,62**	-0,62**
Skelett	--	--	--	-0,30*	-0,29*

	Fe verf	Zn verf	Pb verf	Cd verf	Cu verf
Sand gesamt	--	-0,32*	--	-0,44**	--
Ton gesamt	0,32*	--	0,38**	--	-0,47**
Feinschluff gesamt	0,28*	--	--	--	-0,46**
Grobschluff gesamt	0,41**	--	0,58**	0,70**	-0,32**
Humus gesamt	0,54**	0,70**	0,75**	0,63**	-0,61**
Feinerde gesamt	0,29*	--	0,42**	--	-0,57**
Grobschluff fein	0,31*	0,85**	0,47**	0,83**	--
Feinschluff fein	--	-0,35*	--	-0,32*	--
Sand fein	-0,34*	-0,62**	-0,52**	-0,65**	0,33**
Ton fein	--	--	--	--	--
WHC	0,53**	0,85**	0,72**	0,80**	--
Pb %	0,75**	0,55**	0,96**	0,39**	-0,56**
Cd%	0,79**	0,77**	0,89**	0,66**	-0,45**
Zn %	0,58**	0,98**	0,67**	0,89**	--
Fe %	0,90**	0,72**	0,82**	0,56**	-0,39**
Cu %	--	0,33*	--	0,43**	0,68**
Mn %	0,65**	0,84**	0,79**	0,74**	-0,39**
Pb gesamt	--	--	0,29*	0,30*	-0,36**
Cd gesamt	-0,52**	--	-0,39**	0,43**	0,56**
Zn gesamt	--	--	-0,30*	--	--
Cu gesamt	-0,62**	-0,42**	-0,76**	-0,29*	0,82**
Fe gesamt	-0,50**	-0,71**	-0,61**	-0,65**	0,30**
Mn gesamt	-0,75**	-0,62**	-0,86**	-0,46**	0,54**
Cu verfügbar	-0,41**	--	-0,56**	--	X
Cd verfügbar	0,62**	0,91**	0,49**	X	--
Pb verfügbar	0,78**	0,64**	X	0,49**	-0,56**
Zn verfügbar	0,55**	X	0,64**	0,91**	--
Fe verfügbar	X	0,55**	0,78**	0,62**	-0,41**
Mn verfügbar	0,49**	0,91**	0,61**	0,88**	--
Kalium	0,49**	0,91**	0,61**	0,88**	--
Phosphat	0,45**	0,65**	0,53**	0,56**	--
Ammonium	--	--	--	0,28*	--
Sulfat	--	0,40**	0,35*	0,39**	--
Humus fein	0,54**	0,88**	0,72**	0,82**	-0,31*
pH-Wert	-0,80**	-0,71**	-0,93**	-0,53**	-0,51**
Skelett	-0,29*	--	-0,42**	--	0,57**

	Mn gesamt	Fe gesamt	Cu gesamt	Zn gesamt	Cd gesamt
Sand gesamt	--	0,40**	--	--	--
Ton gesamt	-0,52***	-0,49**	-0,49**	--	--
Feinschluff gesamt	-0,36*	-0,32*	-0,39**	--	--
Grobschluff gesamt	-0,59**	-0,50**	-0,49**	--	--
Humus gesamt	-0,76**	-0,70**	-0,74**	--	--
Feinerde gesamt	-0,54**	-0,45**	-0,53**	--	-0,28**
Grobschluff fein	-0,43**	-0,50**	-0,29*	--	0,33**
Feinschluff fein	--	--	--	--	-0,33*
Sand fein	0,61**	0,86**	0,57**	--	--
Ton fein	--	-0,40**	--	--	--
WHC	-0,67**	-0,72**	-0,54**	--	--
Pb %	-0,83**	-0,59**	-0,72**	-0,38**	0,46**
Cd %	-0,87**	-0,71**	-0,77**	-0,37**	-0,33*
Zn %	-0,66**	-0,73**	-0,47**	--	--
Fe %	-0,85**	-0,78**	-0,71**	-0,31*	-0,34*
Cu %	--	-0,34*	--	--	0,38**
Mn %	-0,88**	-0,88**	--	--	--
Pb gesamt	--	--	-0,37**	0,27*	--
Cd gesamt	0,42**	--	0,55**	0,53**	X
Zn gesamt	0,37**	--	0,36**	X	0,53**
Cu gesamt	0,84**	0,64**	X	0,36**	0,55**
Fe gesamt	0,76**	X	0,64**	--	--
Mn gesamt	X	0,76**	0,84**	0,37**	0,42**
Cu verfügbar	0,54**	0,30**	0,82**	--	0,56**
Cd verfügbar	-0,46**	-0,65**	-0,29*	--	0,43**
Pb verfügbar	-0,86**	-0,61**	-0,76**	-0,30*	-0,39**
Zn verfügbar	-0,62**	-0,71**	-0,42**	--	--
Fe verfügbar	-0,75**	-0,50**	-0,62**	--	-0,52**
Mn verfügbar	-0,60**	-0,78**	-0,51**	--	--
Kalium	-0,60**	-0,78**	-0,51**	--	--
Phosphat	-0,51**	-0,60**	-0,47**	--	--
Ammonium	--	--	--	--	--
Sulfat	-0,32*	-0,28*	--	--	--
Humus fein	-0,67**	-0,68**	-0,58**	--	--
pH-Wert	0,79**	0,53**	0,68**	--	0,35*
Skelett	0,54**	0,45**	0,53**	--	--

	Pb gesamt	Mn %	Cu %	Fe %	Zn %
Sand gesamt	--	-0,30*	-0,58**	--	-0,32*
Ton gesamt	--	0,43**	--	0,36**	--
Feinschluff gesamt	--	--	--	--	--
Grobschluff gesamt	0,40**	--	--	0,53**	0,75**
Humus gesamt	0,43**	0,84**	--	0,67**	0,70**
Feinerde gesamt	--	0,47**	--	0,35*	--
Grobschluff fein	0,33**	-0,68**	0,30*	0,49**	0,83**
Feinschluff fein	--	--	--	--	-0,33*
Sand fein	--	-0,78**	--	-0,62**	-0,64**
Ton fein	--	--	--	--	--
WHC	--	-0,85**	--	0,71**	0,86**
Pb %	--	0,73**	--	0,76**	0,60**
Cd %	--	0,87**	--	0,88**	0,82**
Zn %	--	0,87**	0,34*	0,75**	X
Fe %	--	0,86**	--	X	0,75**
Cu %	--	--	X	--	0,34*
Mn %	--	X	--	0,86**	0,87**
Pb gesamt	X	--	--	--	--
Cd gesamt	--	--	0,38**	-0,34*	--
Zn gesamt	0,27*	--	--	-0,31*	--
Cu gesamt	-0,37**	--	--	-0,71**	-0,47**
Fe gesamt	--	-0,88**	-0,34*	-0,78**	-0,73**
Mn gesamt	--	-0,88**	--	-0,85**	-0,66**
Cu verfügbar	-0,36**	-0,39**	0,68**	-0,39**	--
Cd verfügbar	0,30*	0,74**	0,43**	0,56**	0,89**
Pb verfügbar	0,29*	0,79**	--	0,82**	0,67**
Zn verfügbar	--	0,84**	0,33*	0,72**	0,98**
Fe verfügbar	--	0,65**	--	0,90**	0,58**
Mn verfügbar	--	0,89**	--	0,69**	0,91**
Kalium	--	0,89**	--	0,69**	0,91**
Phosphat	-0,31*	0,68**	--	0,60**	0,65**
Ammonium	--	--	--	--	--
Sulfat	0,30*	0,36*	--	--	0,38**
Humus fein	0,36**	0,86**	--	0,71**	0,88**
pH-Wert	--	-0,76**	--	-0,80**	-0,74**
Skelett	--	-0,47**	--	-0,35*	--

	Cd%	Pb %	WHC	Ton fein	Sand fein
Sand gesamt	--	--	-0,30*	--	0,40**
Ton gesamt	0,30*	0,39**	--	0,69**	-0,63**
Feinschluff gesamt	--	--	--	0,86**	-0,45**
Grobschluff gesamt	0,63**	0,46**	0,70**	--	-0,61**
Humus gesamt	0,73**	0,67**	0,72**	--	-0,71**
Feinerde gesamt	0,34*	0,40**	--	0,34*	-0,58**
Grobschluff fein	0,61**	0,35*	0,74**	--	-0,56**
Feinschluff fein	--	--	--	0,63**	--
Sand fein	-0,59**	-0,48**	-0,67**	-0,49**	X
Ton fein	--	--	--	X	-0,49**
WHC	0,79**	0,65**	X	--	-0,67**
Pb %	0,83**	X	0,65**	--	-0,48**
Cd%	X	0,83**	0,79**	--	-0,59**
Zn %	0,82**	0,60**	0,86**	--	-0,64**
Fe %	0,88**	0,76**	0,71**	--	-0,62**
Cu %	--	--	--	--	--
Mn %	0,87**	0,73**	-0,85**	--	-0,78**
Pb gesamt	--	--	--	--	--
Cd gesamt	-0,33*	0,46**	--	--	--
Zn gesamt	-0,37**	-0,38**	--	--	--
Cu gesamt	-0,77**	-0,72**	-0,54**	--	0,57**
Fe gesamt	-0,71**	-0,59**	-0,72**	-0,40**	0,86**
Mn gesamt	-0,87**	-0,83**	-0,67**	--	0,61**
Cu verfügbar	-0,45**	-0,56**	--	--	0,33**
Cd verfügbar	0,66**	0,39**	0,80**	--	-0,65**
Pb verfügbar	0,89**	0,96**	0,72**	--	-0,52**
Zn verfügbar	0,77**	0,55**	0,85**	--	-0,62**
Fe verfügbar	0,79**	0,75**	0,53**	--	-0,34*
Mn verfügbar	0,64**	0,53**	0,88**	--	0,74**
Kalium	0,74**	0,53**	0,88**	--	-0,74**
Phosphat	0,65**	0,47**	0,60**	--	-0,43**
Ammonium	--	--	--	--	--
Sulfat	0,30*	0,30*	0,39**	--	--
Humus fein	0,79**	0,62**	0,83**	--	-0,62**
pH-Wert	-0,89**	-0,88**	-0,72**	--	0,46**
Skelett	-0,34*	-0,40**	--	-0,34*	0,58**

	Feinschluff fein	Grobschluff fein	Feinerde gesamt	Humus gesamt	Grobschluff gesamt
Sand gesamt	--	0,39**	0,35**	--	--
Ton gesamt	--	--	0,89**	0,61**	0,38**
Feinschluff gesamt	--	--	0,83**	0,39**	--
Grobschluff gesamt	--	0,85**	0,51**	0,82**	X
Humus gesamt	--	0,62**	0,72**	X	0,82**
Feinerde gesamt	--	--	X	0,72**	0,51**
Grobschluff fein	--	X	--	0,62**	0,85**
Feinschluff fein	X	--	--	--	--
Sand fein	--	-0,56**	-0,58**	-0,71**	-0,61**
Ton fein	0,63**	--	0,34*	--	--
WHC	--	0,74**	--	0,72**	0,70**
Pb %	--	0,35*	0,40**	0,67**	0,46**
Cd %	--	0,61**	0,34*	0,73**	0,63**
Zn %	-0,33*	0,83**	--	0,70**	0,75**
Fe %	--	0,49**	0,35*	0,67**	0,53**
Cu %	--	0,30*	--	--	--
Mn %	--	-0,68**	0,47**	0,84**	--
Pb gesamt	--	0,33**	--	0,43**	0,40**
Cd gesamt	-0,33*	0,33**	-0,28**	--	--
Zn gesamt	--	--	--	--	--
Cu gesamt	--	-0,29*	-0,53**	-0,74**	-0,49**
Fe gesamt	--	-0,50**	-0,45**	-0,70**	-0,50**
Mn gesamt	--	-0,43**	-0,54**	-0,76**	-0,59**
Cu verfügbar	--	--	-0,57**	-0,61**	-0,32**
Cd verfügbar	-0,32*	0,83**	--	0,63**	0,70**
Pb verfügbar	--	0,47**	0,42**	0,75**	0,58**
Zn verfügbar	-0,35*	0,85**	--	0,70**	--
Fe verfügbar	--	0,31*	0,29*	0,54**	0,41**
Mn verfügbar	--	0,80**	0,29*	0,75**	0,75**
Kalium	--	0,80**	0,30*	0,75**	0,76**
Phosphat	--	0,57**	--	0,54**	0,48**
Ammonium	--	--	--	--	--
Sulfat	--	0,32*	--	0,29*	0,34*
Humus fein	-0,40**	0,82**	0,30*	0,85**	0,79**
pH-Wert	--	-0,58**	-0,39**	-0,73**	-0,66**
Skelett	-0,33**	--	-1**	-0,72**	-0,51**

	Feinschluff gesamt	Ton gesamt	Sand gesamt
Sand gesamt	0,38**	--	X
Ton gesamt	0,87**	X	--
Feinschluff gesamt	X	0,87**	0,38**
Grobschluff gesamt	--	0,38**	--
Humus gesamt	0,39**	0,61**	--
Feinerde gesamt	0,83**	0,89**	0,35**
Grobschluff fein	--	--	0,39**
Feinschluff fein	--	--	--
Sand fein	-0,45**	-0,63**	0,40**
Ton fein	0,86**	0,69**	--
WHC	--	--	-0,30*
Pb %	--	0,39**	--
Cd%	--	0,30*	--
Zn %	--	--	-0,32*
Fe %	--	0,36**	--
Cu %	--	--	-0,58**
Mn %	--	0,43**	-0,30*
Pb gesamt	--	--	--
Cd gesamt	--	--	--
Zn gesamt	--	--	--
Cu gesamt	-0,39**	-0,49**	--
Fe gesamt	-0,32*	-0,49**	0,40**
Mn gesamt	-0,36*	-0,52**	--
Cu verfügbar	-0,46**	-0,47**	--
Cd verfügbar	--	--	-0,44**
Pb verfügbar	--	0,38**	--
Zn verfügbar	--	--	-0,32*
Fe verfügbar	0,28*	0,32*	--
Mn verfügbar	--	--	-0,36**
Kalium	--	--	-0,36*
Phosphat	--	--	-0,33*
Ammonium	--	--	--
Sulfat	--	--	--
Humus fein	--	--	-0,32*
pH-Wert	--	-0,34*	--
Skelett	-0,83**	-0,89**	-0,35*

Ausgewählte Korrelationen aus Tabelle 16 werden nun graphisch dargestellt, das 95%-Konfidenzintervall ist jeweils strichliert angezeigt:

Die lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen **pH-Wert** und **Humusanteil im Feinboden** ergibt  $R^2=0,54$  (Abbildung 102). Mit sinkendem pH-Wert steigt der Humusanteil im Feinboden linear an.

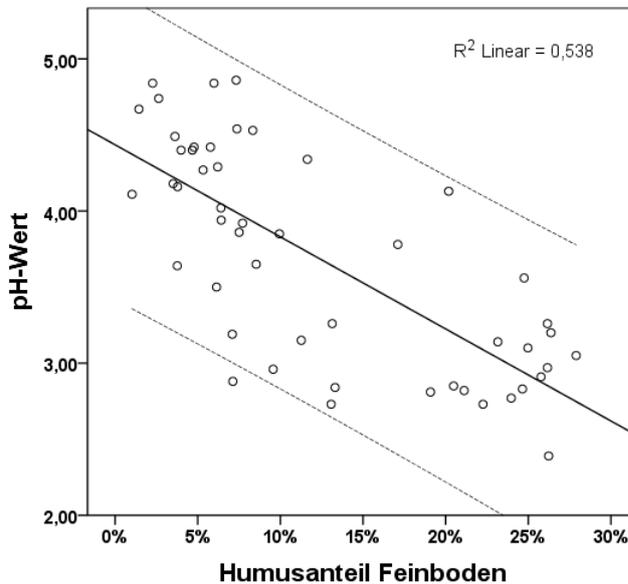


Abbildung 102: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und Humusanteil im Feinboden (Pearson Test)

Eine lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen **Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]** und **Skelettanteil** beträgt  $R^2=0,21$  (Abbildung 103). Der Eisen-Gesamtgehalt im Boden steigt mit zunehmendem Skelettanteil im Boden.

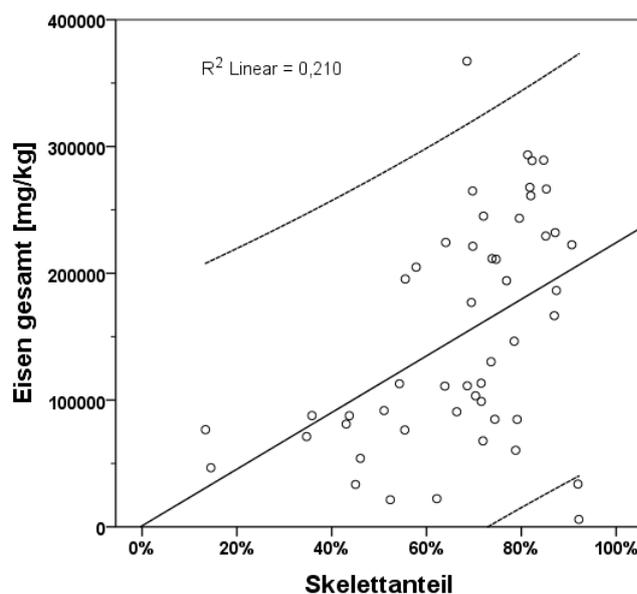


Abbildung 103: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] und Skelettanteil (Pearson Test)

Die quadratische Korrelation ( $R^2$ ) zwischen **Kupfer-Gesamtgehalt** [mg/kg] und **Skelettanteil** ergibt für  $R^2=0,22$  (Abbildung 104). Eine Zunahme des Skelettanteils geht einher mit einer starken Erhöhung des Kupfer-Gesamtgehalts im Boden. Zu beachten ist, dass der Zusammenhang nicht linear, sondern quadratisch ist.

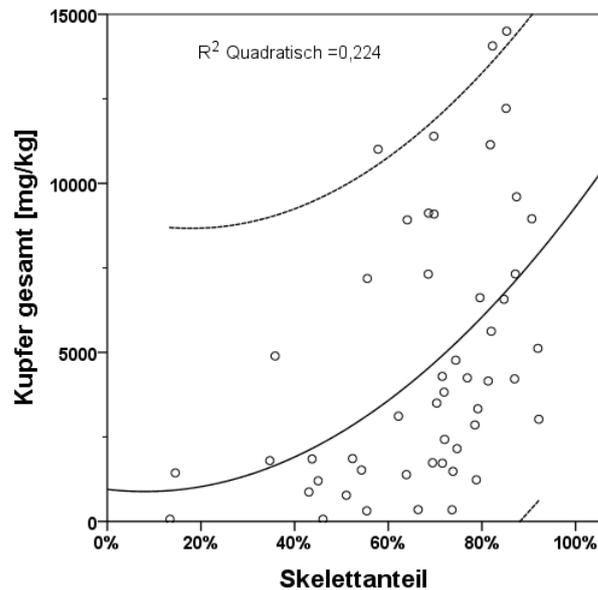


Abbildung 104: quadratische Korrelation ( $R^2$ ) zwischen Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] und Skelettanteil (Pearson Test)

Die lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen **Humus-Gesamtgehalt** und **Skelettanteil** ergibt  $R^2=0,53$  (Abbildung 105). Je höher der Skelettanteil im Boden ist, desto weniger Humus-Gesamtgehalt ist vorhanden.

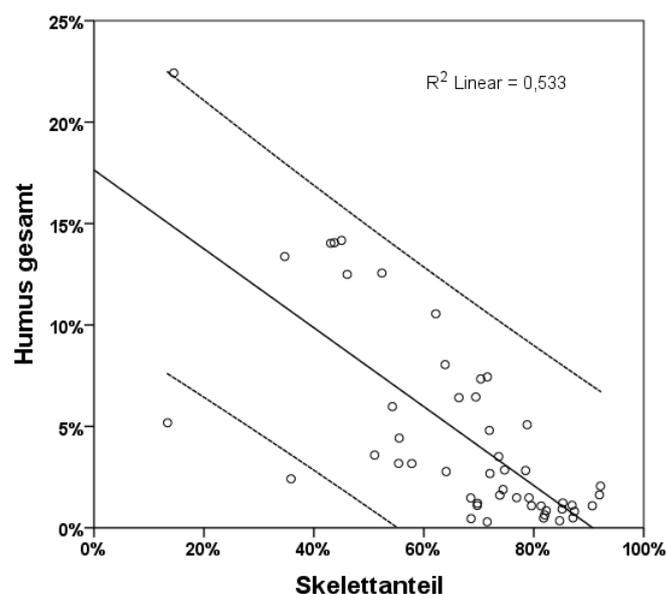


Abbildung 105: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen Humus-Gesamtgehalt und Skelettanteil (Pearson Test)

Die lineare Korrelation zwischen **pH-Wert** und **Mangan-Gesamtgehalt** [mg/kg] erreicht  $R^2=0,51$ . Mit einem steigenden pH-Wert steigt auch der Gesamtgehalt des Mangans im Boden (Abbildung 106).

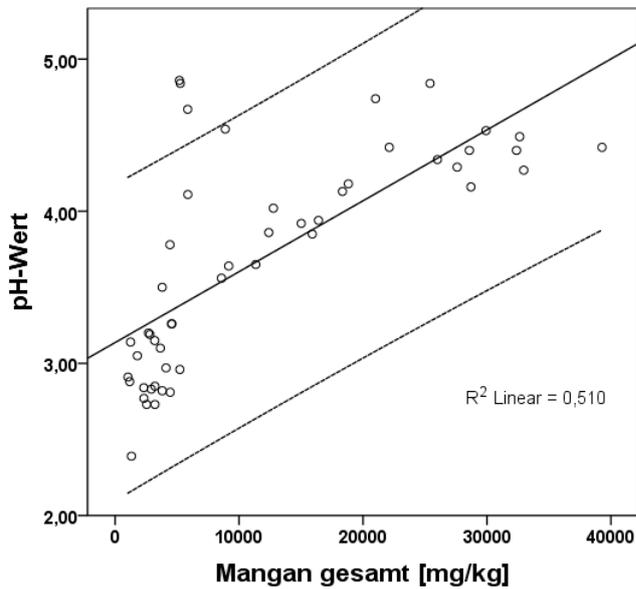


Abbildung 106: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] (Pearson Test)

Zwischen **pH-Wert** und **Kupfer-Gesamtgehalt** [mg/kg] besteht eine lineare Korrelation ( $R^2=0,45$ ), mit steigendem pH-Wert nimmt der Gesamtgehalt an Kupfer im Boden zu (Abbildung 107).

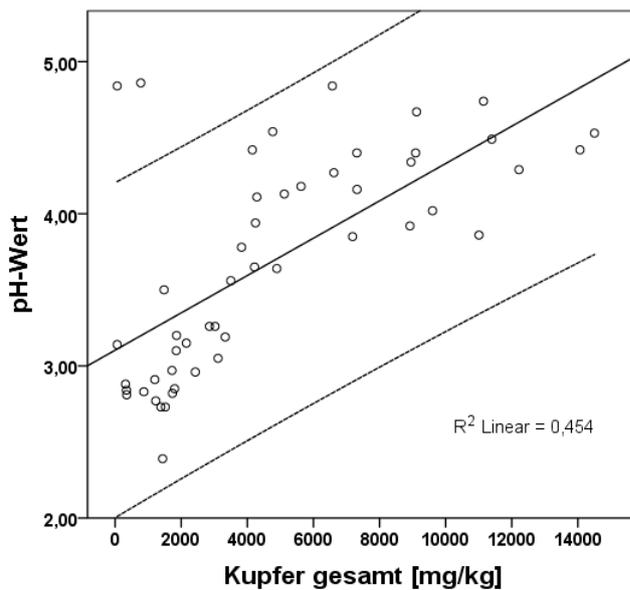


Abbildung 107: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] (Pearson Test)

Abbildung 108 zeigt die kubische Korrelation  $R^2=0,44$  zwischen **pH-Wert** und der prozentuellen **Mangan-Verfügbarkeit**. Mit steigendem pH-Wert steigt die prozentuelle Mangan-Verfügbarkeit. Hier handelt es sich um einen kubischen, nicht um einen linearen Zusammenhang.

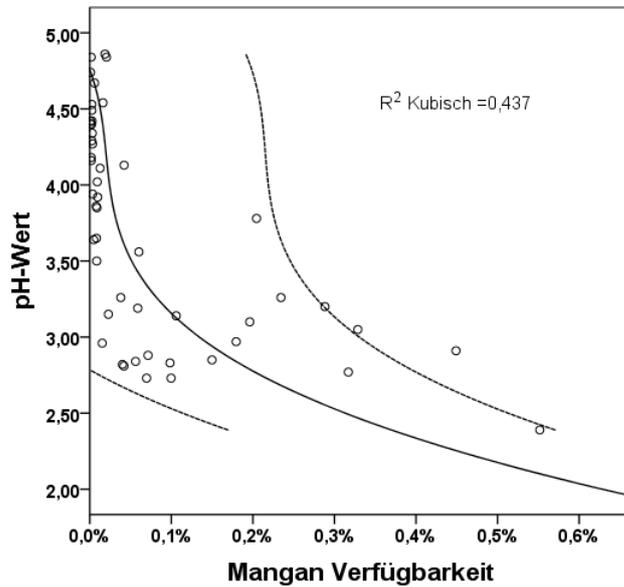


Abbildung 108: kubische Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und prozentueller Mangan-Verfügbarkeit (Pearson Test)

$R^2=0,82$  entspricht der linearen Korrelation zwischen **pH-Wert** und **Kadmium-Verfügbarkeit** in Abbildung 109. Je niedriger der pH-Wert ist, desto höher wird die prozentuelle Kadmium-Verfügbarkeit.

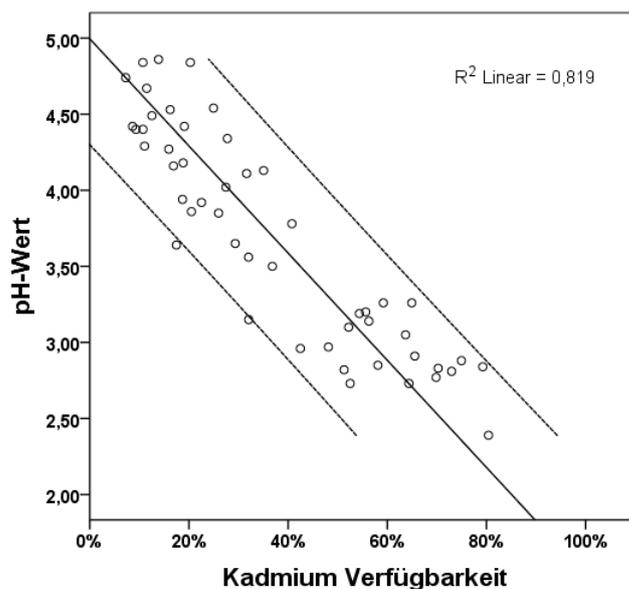


Abbildung 109: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und prozentueller Kadmium-Verfügbarkeit (Pearson Test)

Die in Abbildung 110 dargestellte lineare Korrelation zwischen **prozentueller Zink-Verfügbarkeit** und dem **Humusanteil im Feinboden** ergibt für  $R^2 = 0,75$ .

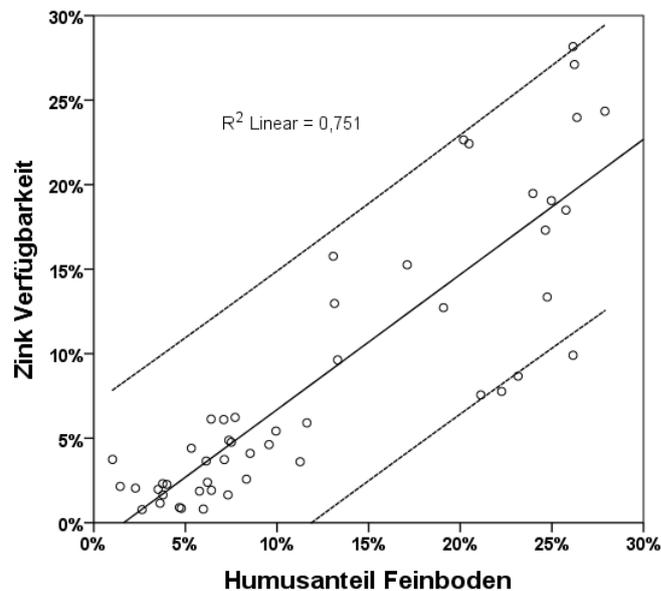


Abbildung 110: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen prozentuelle Zink-Verfügbarkeit und Humusanteil im Feinboden (Pearson Test)

### 5.3.8 Faktorenanalyse

Bei der Faktorenanalyse werden die Ähnlichkeit der Gesamtgehalte, die Ähnlichkeit der Verfügbarkeit und die Ähnlichkeit der prozentuellen Verfügbarkeit der Elemente ermittelt.

Die Ähnlichkeit der **Verteilung von Elementen (Gesamtgehalt)** wird in Abbildung 111 graphisch dargestellt. Eine Ähnlichkeit zwischen Zink-Gesamtgehalt und Kadmium-Gesamtgehalt auf der einen Seite sowie zwischen Kupfer-Gesamtgehalt, Mangan-Gesamtgehalt und Eisen-Gesamtgehalt auf der anderen Seite lässt sich erkennen. Der Blei-Gesamtgehalt hingegen ist eher abseits der anderen Elemente.

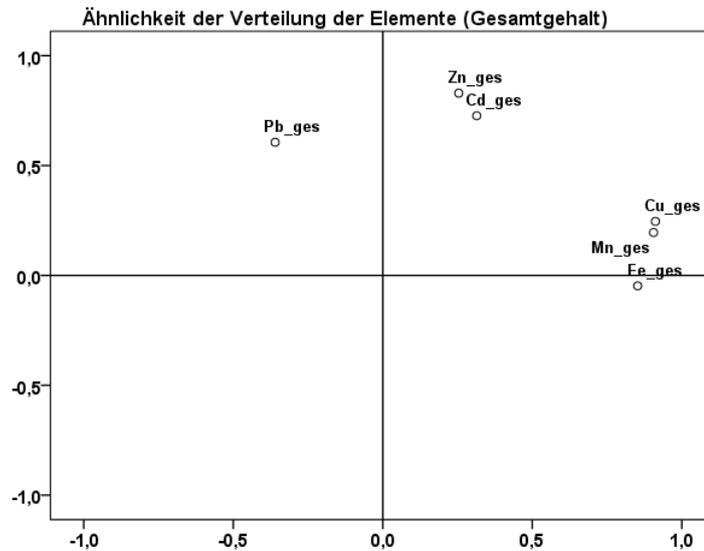


Abbildung 111: Verteilung der Elemente nach ihrem Gesamtgehalt [mg/kg]

Abbildung 112 fasst die Verteilung der **Elemente nach ihrer Verfügbarkeit** und die Nährstoffe zusammen. Das verfügbare Kupfer [mg/kg] steht isoliert von den anderen Elementen. Eine Gruppe bilden Ammonium, Phosphat, Sulfat, verfügbares Zink, verfügbares Mangan, verfügbares Kadmium und verfügbares Kalium. Leicht abseits sind das verfügbare Eisen und das verfügbare Blei zu finden.

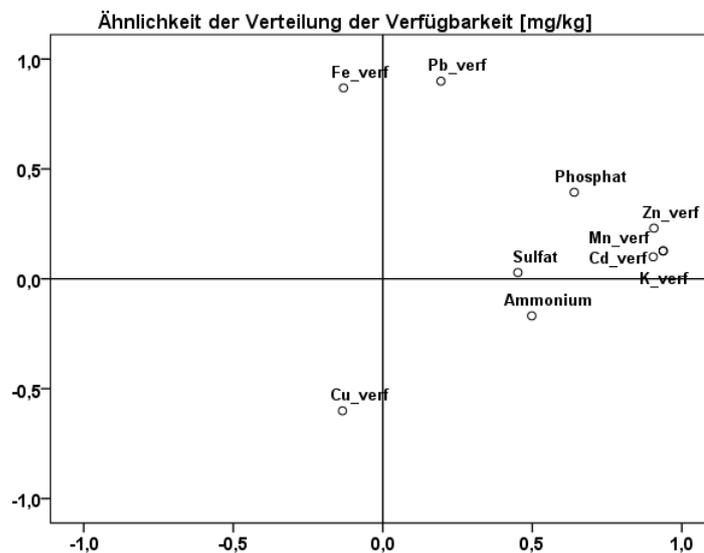


Abbildung 112: Verteilung der Elemente nach ihrer Verfügbarkeit [mg/kg]

Auch bei der **prozentuellen Verfügbarkeit der Elemente** (Abbildung 113) steht das Kupfer abseits der anderen Elemente. Nahe zusammen scheinen prozentuell verfügbares Eisen, Mangan, Zink, Kadmium und Blei auf.

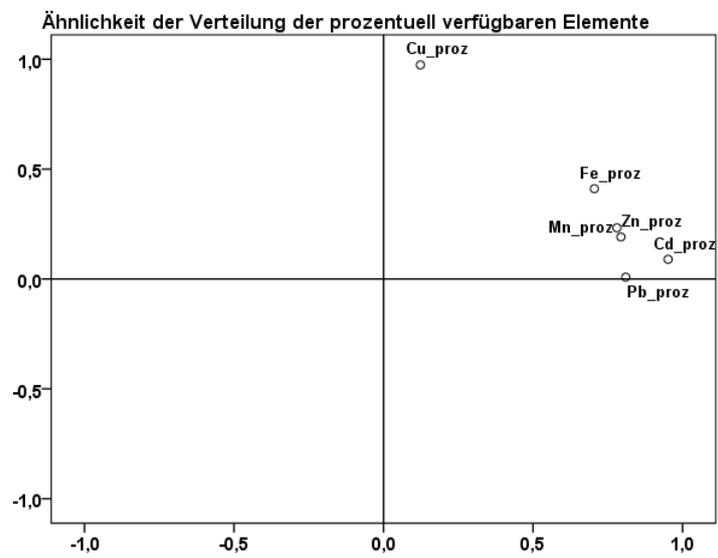


Abbildung 113: Verteilung der Elemente nach ihrer prozentuellen Verfügbarkeit

## 5.4 Pflanzen

### 5.4.1 Artenliste

#### Gehölze

*Acer pseudoplatanus* (Sapindaceae)

*Crataegus monogyna* (Rosaceae)

*Fagus sylvatica* (Fagaceae)

*Fraxinus excelsior* (Oleaceae)

*Larix decidua* (Pinaceae)

*Picea abies* (Pinaceae)

*Pinus sylvestris* (Pinaceae)

*Quercus petraea* (Fagaceae)

*Rosa canina* (Rosaceae)

*Sorbus aria* (Rosaceae)

*Oxalis acetosella* (Oxalidaceae)

*Phyteuma spicatum* (Campanulaceae)

*Ranunculus nemorosus* (Ranunculaceae)

*Rumex acetosella* (Polygonaceae)

*Sesleria albicans* (Poaceae)

*Silene nemoralis* (Caryophyllaceae)

*Tanacetum corymbosum* ssp.

*subcorymbosum* (Asteraceae)

*Trifolium alpestre* (Fabaceae)

*Trifolium* sp. (Fabaceae)

*Vaccinium myrtillus* (Ericaceae)

*Vaccinium vitis-idaea* (Ericaceae)

#### Krautige

*Athyrium filix femina* (Woodsiaceae)

*Avenella flexuosa* (Poaceae)

*Campanula persicifolia* (Campanulaceae)

*Carex flacca* (Cyperaceae)

*Dactylis glomerata* (Poaceae)

*Dactylorhiza maculata* (Orchidaceae)

*Dryopteris filix mas* (Dryopteridaceae)

*Euphorbia amygdaloides* (Euphorbiaceae)

*Euphorbia cyparissias* (Euphorbiaceae)

*Fragaria vesca* (Rosaceae)

*Galium rotundifolium* (Rubiaceae)

*Galium sylvaticum* (Rubiaceae)

*Gentiana asclepiadea* (Gentianaceae)

*Helleborus niger* (Ranunculaceae)

*Hieracium murorum* (Cichoriaceae)

*Luzula luzuloides* (Juncaceae)

*Melampyrum pratense* (Scrophulariaceae)

*Orchis* sp. (Orchidaceae)

#### Moose

*Ceratodon purpureus* (Ditrichaceae)

*Cynodontium polycarpum* var. *strumiferum*  
(Oncophoraceae)

*Dicranum scoparium* (Dicranaceae)

*Hylocomium splendens* (Hylocomiaceae)

*Hypnum cupressiforme* (Hypnaceae)

*Orthodicranum montanum* (Dicranaceae)

*Orthotrichum anomalum* (Orthotrichaceae)

*Pleurozium schreberi* (Hylocomiaceae)

*Pohlia drummondii* (Mniaceae)

*Pohlia lutescens* (Mniaceae)

*Pohlia nutans* (Mniaceae)

*Polytrichum juniperinum* (Polytrichaceae)

*Thuidium tamariscinum* (Thuidiaceae)

*Tortella tortuosa* (Pottiaceae)

## **Flechten**

*Cetraria islandica* (Parmeliaceae)

*Cladonia arbuscula* ssp. *squarrosa*  
(Cladoniaceae)

*Cladonia cervicornis* (Cladoniaceae)

*Cladonia coniocraea* (Cladoniaceae)

*Cladonia digitata* (Cladoniaceae)

*Cladonia fimbriata* (Cladoniaceae)

*Cladonia furcata* (Cladoniaceae)

*Cladonia macroceras* (Cladoniaceae)

*Cladonia pyxidata* (Cladoniaceae)

*Cladonia rangiferina* (Cladoniaceae)

*Cladonia squamosa* (Cladoniaceae)

*Hypogymnia physodes* (Parmeliaceae)

*Porpidia macrocarpa* (Porpidiaceae)

*Pseudevernia furfuracea* var. *ceratea*  
(Parmeliaceae)

*Pseudevernia furfuracea* var. *furfuracea*  
(Parmeliaceae)

*Scoliciosporum chlorococcum*  
(Scoliciosporaceae)

*Trapelia coarctata* (Agyriaceae)

*Usnea hirta* (Parmeliaceae)

#### 5.4.2 Deckungsgrad der Pflanzen in den Clustern

Tabelle 17 listet den Deckungsgrad der Pflanzen in den sechs Clustern auf. Es handelt sich hierbei um die Mediane, in Klammer angegeben sind Minimum und Maximum der Deckungsgrade. Mit \* gekennzeichnete Bereiche beinhalten Ausreißer, diese Pflanze ist also in dem jeweiligen Cluster vereinzelt vorhanden, erreicht aber nur in weniger als 25% der Probennahmepunkte einen Deckungsgrad > 0. Zu beachten ist, dass jene Arten aus der Liste, die Epiphyten sind oder zwar auf der Halde vorkommen, aber nicht auf einem der Probennahmepunkte wachsen in dieser Tabelle unberücksichtigt bleiben.

Tabelle 17: Median des Deckungsgrades der Pflanzen in den 6 Clustern (\* vereinzelt vorhanden), in Klammer angegeben sind Minimum und Maximum der Deckungsgrade

	Halde (Moose, Flechten)	Halde ( <i>Rumex acetosella</i> )	Waldrand ( <i>Rumex acetosella</i> )	Wald ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	Wald ( <i>Avenella flexuosa</i> )	Wald ( <i>Vaccinium, Avenella</i> )
<i>P. sylvestris</i> Baumschicht	0 (0 - 0)	0 (0-0)	3 (2-4)	4 (4-4)	4(4-4)	4(4-4)
<i>P. sylvestris</i> Strauchschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	r (0 - r)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>p. sylvestris</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	r (0 - r)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>P. abies</i> Baumschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	1 (0 - 4)
<i>P. abies</i> Strauchschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	+ (0 - 2)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	+ (0 - 2)
<i>P. abies</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	r (0 - r)	0 (0 - r)	0 (0 - 0) *	r (0 - +)
<i>L. decidua</i> Baumschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>L. decidua</i> Strauchschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	+ (0 - 1)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>L. decidua</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Quercus petrea</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - r)	0 (0 - 0) *	+ (0 - 1)
<i>F. excelsior</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>A. pseudoplatanus</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Vaccinium vitis - idaea</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - +)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)

	Halde (Moose, Flechten)	Halde ( <i>Rumex acetosella</i> )	Waldrand ( <i>Rumex acetosella</i> )	Wald ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	Wald ( <i>Avenella flexuosa</i> )	Wald ( <i>Vaccinium, Avenella</i> )
<i>Vaccinium myrtillus</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	2 (0 - 2)	0 (0 - 0) *	1 (+ - 2)
<i>Oxalis acetosella</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Rumex acetosella</i>	0 (0 - 0)	1 (+ - 2)	1 (+ - 1)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Melampyrum pratense</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - +)	0 (0 - 0) *	+ (0 - 2)
<i>Luzula luzuloides</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Helleborus niger</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Silene nemoralis</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Rosa canina</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Fragaria vesca</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Euphorbia cyparissias</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Trifolium alpestre</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Hieracium murorum</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Tanacetum corymbosum</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Carex flacca</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Sesleria albicans</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Avenella flexuosa</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - r)	0 (0 - 0)	0 (0 - +)	1 (+ - 2)	2 (1 - 2)
<i>Hypnum cupressiforme</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)	+ (0 - 2)	1 (1 - 1)
<i>Dicranum scoparium</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)	+ (0 - 2)	1 (1 - 1)
<i>Pleurozium schreberi</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - +)	+ (0 - 1)
<i>Ceratodon purpureus</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Thuidium tamariscinum</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Hylocomium splendens</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)

	Halde (Moose, Flechten)	Halde ( <i>Rumex acetosella</i> )	Waldrand ( <i>Rumex acetosella</i> )	Wald ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	Wald ( <i>Avenella flexuosa</i> )	Wald ( <i>Vaccinium, Avenella</i> )
<i>Pohlia nutans</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Pohlia lutescens</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Pohlia drummondii</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Pohlia sp.</i>	+ (r - +)	0 (0 - +)	r (0 - r)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Orthotrichum anomalum</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Cynodontium polycarpum</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Orthodicranum montanum</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Cetraria islandica</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Cladonia cervicornis</i>	0 (0 - 0)	+ (0 - 1)	r (0 - +)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Cladonia arbuscula</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Cladonia pyxidata</i>	0 (0 - 0)	+ (0 - +)	r (0 - +)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Cladonia furcata</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Cladonia fimbriata</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	r (0 - r)
<i>Cladonia rangiferina</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Cladonia squamosa</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - +)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Cladonia coniocraea</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	r (0 - r)
<i>Cladonia digitata</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	r (0 - r)
<i>Cladonia macroceras</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)
<i>Trapelia coarctata</i>	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
<i>Porpidia macrocarpa</i>	r (0 - r)	+ (0 - +)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0) *	0 (0 - r)	0 (0 - 0)

### 5.4.3 Korrelationen zwischen Pflanzen und Bodenparametern

In der Folge werden die Korrelationen zwischen Pflanzen, unterteilt nach Gehölzen, Krautige, Moose & Flechten, und den Bodenparametern tabellarisch dargestellt:

Anzumerken ist hierbei, dass Pflanzen mit Optimum bei mittleren Werten bei diesem Test keine Korrelationen aufweisen können. Die Korrelationen der **Gehölze** mit den Bodenparametern sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Tabelle 18: Korrelation zwischen Gehölzen und Bodenparametern

	<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	<i>Larix decidua</i> Baumschicht	<i>Larix decidua</i> Strautschicht	<i>Larix decidua</i> Krautschicht	<i>Quercus petraea</i> Krautschicht	<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht
pH	-0,57 **	0,32*	--	--	0,29*	--	--	--
Sulfat	--	-0,41**	--	--	--	--	--	--
Ammonium	--	--	--	--	--	--	--	--
Phosphat	0,36 *	--	--	--	--	--	--	--
Kalium	0,41 **	--	--	--	--	--	--	--
Mn verfügbar	0,41 **	--	--	--	--	--	--	--
Fe verfügbar	0,52 **	-0,41**	--	--	--	0,30*	--	--
Zn verfügbar	0,35 *	-0,31*	--	--	--	--	--	--
Pb verfügbar	0,61 **	-0,32*	--	--	--	--	--	--
Cd verfügbar	0,31*	--	--	--	--	--	--	--
Cu verfügbar	-0,49 **	--	--	--	--	--	--	-0,29*
Mn gesamt	-0,65 **	0,36**	--	--	--	--	--	--
Fe gesamt	-0,48 **	0,28*	--	--	--	--	--	--
Zn gesamt	--	--	--	--	--	--	--	--

	<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	<i>Larix decidua</i> Baumschicht	<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	<i>Larix decidua</i> Krautschicht	<i>Quercus petraea</i> Krautschicht	<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht
<b>Pb gesamt</b>	--	--	--	--	-0,28*	--	--	--
<b>Cd gesamt</b>	-0,30 *	--	--	--	--	--	--	--
<b>Cu gesamt</b>	-0,63**	0,30*	--	--	--	--	--	-0,31*
<b>Mn verf %</b>	0,61**	-0,33*	--	--	--	--	--	--
<b>Fe verf %</b>	0,56**	-0,32*	--	--	--	0,36*	--	--
<b>Zn verf %</b>	0,36**	-0,31*	--	--	--	--	--	--
<b>Pb verf %</b>	0,60**	-0,31*	--	--	--	--	--	--
<b>Cd verf %</b>	0,58**	-0,31*	--	--	--	--	--	--
<b>Cu verf %</b>	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Skelettanteil</b>	-0,47 **	0,28*	--	--	--	--	--	--
<b>Feinerde gesamt</b>	0,47**	-0,28*	--	--	--	--	--	--
<b>WHC (Feinerde)</b>	0,43**	-0,29*	--	--	--	--	--	--
<b>Sand (Feinboden)</b>	-0,44**	--	--	--	--	--	--	--
<b>Grobschluff (Feinboden)</b>	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Schluff (Feinboden)</b>	--	--	--	--	--	--	--	0,30*
<b>Ton (Feinboden)</b>	--	-0,30*	--	--	--	--	--	--
<b>Humus (Feinboden)</b>	0,38**	-0,29*	--	--	--	--	--	--
<b>Sand gesamt</b>	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Grobschluff gesamt</b>	0,41**	--	--	--	--	--	--	--
<b>Schluff gesamt</b>	0,38**	--	--	--	--	--	--	0,30*
<b>Ton gesamt</b>	0,40**	-0,35*	--	-0,31*	--	--	0,28*	0,30*
<b>Humus gesamt</b>	0,52**	-0,36*	0,30*	--	--	--	--	--

	<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	<i>Larix decidua</i> Baumschicht	<i>Larix decidua</i> Strauschschicht	<i>Larix decidua</i> Krautschicht	<i>Quercus petraea</i> Krautschicht	<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht
Neigung	--	--	0,36**	--	--	--	--	--
Beschattung	0,73**	--	--	--	--	--	--	--

Korrelationen zwischen den **krautigen Pflanzen** und den Bodenparametern zeigt Tabelle 19 auf.

Tabelle 19: Korrelation zwischen den krautigen Pflanzen und Bodenparametern

	<i>Vaccinium vitis-idea</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Oxalis acetosella</i>	<i>Rumex acetosella</i>	<i>Melampyrum pratense</i>	<i>Luzula luzulooides</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	<i>Euphorbia cyparissias</i>	<i>Trifolium alpestre</i>	<i>Hieracium murorum</i>	<i>Tanacetum corymbosum</i>
pH	--	-0,35*	--	0,52**	--	--	--	--	--	--	--	--
Sulfat	--	--	--	0,29*	--	--	--	--	--	--	--	--
Ammonium	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Phosphat	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,33*
Kalium	--	--	--	-0,33*	--	--	--	--	--	--	--	--
Mn verfügbar	--	--	--	-0,33*	--	--	--	--	--	--	--	--
Fe verfügbar	--	--	--	-0,50**	--	--	--	--	--	--	--	--
Zn verfügbar	--	--	--	-0,36*	--	-0,31*	--	--	--	--	--	--
Pb verfügbar	--	0,46**	--	-0,62**	--	--	--	--	--	--	--	--
Cd verfügbar	--	--	--	-0,31*	--	--	--	--	--	--	--	--
Cu verfügbar	-0,38**	--	-0,34*	0,43**	--	-0,39**	-0,41**	-0,33*	-0,29*	-0,33*	-0,31*	-0,30*

	<i>Vaccinium vitis-idea</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Oxalis acetosella</i>	<i>Rumex acetosella</i>	<i>Melampyrum pratense</i>	<i>Luzula luzulooides</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	<i>Euphorbia cyparissias</i>	<i>Trifolium alpestre</i>	<i>Hieracium murorum</i>	<i>Tanacetum corymbosum</i>
Mn gesamt	--	-0,40**	--	0,59**	--	--	--	--	--	--	--	--
Fe gesamt	-0,30*	-0,51**	--	0,32*	--	--	--	--	--	--	--	--
Zn gesamt	--	-0,31*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Pb gesamt	--	--	--	--	--	--	--	0,29*	--	0,29*	--	--
Cd gesamt	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Cu gesamt	-0,34*	-0,34*	--	0,57**	--	--	--	-0,34*	-0,31*	-0,34*	--	--
Mn verf %	--	0,39**	--	-0,49**	--	--	--	--	--	--	--	--
Fe verf %	--	0,44**	--	-0,50**	--	--	--	--	--	--	--	--
Zn verf %	--	--	--	-0,37**	--	-0,31*	--	--	--	--	--	--
Pb verf %	--	0,48**	--	-0,61**	--	--	--	--	--	--	--	--
Cd verf %	--	0,42**	--	-0,55**	--	--	--	--	--	--	--	--
Cu verf %	--	--	0,30*	--	--	-0,38**	--	--	--	--	--	-0,33*
Skelettanteil	-0,39*	--	-0,33*	0,30*	--	-0,37**	-0,37**	-0,30*	--	-0,30*	--	--
Feinerde gesamt	0,39*	--	0,33*	-0,30*	--	0,37**	0,37**	0,30*	--	0,30*	--	--
WHC (Feinerde)	--	0,32*	--	-0,37**	--	--	--	--	--	--	--	--

Die Korrelationen zwischen **Moosen und Flechten** und den Bodenparametern sind der Tabelle 20 zu entnehmen.

Tabelle 20: Korrelationen zwischen Moosen und Flechten und den Bodenparametern

	<i>Hypnum cupressiforme</i>	<i>Dicranum scoparium</i>	<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pohlia lutescens</i>	<i>Pohlia sp.</i>	<i>Cladonia cervicornis</i>	<i>Cladonia pyxidata</i>	<i>Cladonia furcata</i>	<i>Cladonia rangiferina</i>	<i>Cladonia squamosa</i>	<i>Cladonia digitata</i>	<i>Porpidia macrocarpa</i>
pH	-0,63**	-0,39**	--	--	--	0,38**	--	0,29*	--	--	--	--	0,42**
Sulfat	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,28*	--	-0,30*
Ammonium	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,34*	--
Phosphat	0,49**	0,29*	--	--	--	-0,30*	--	--	--	--	--	--	-0,37**
Kalium	0,40**	--	--	--	-0,28*	--	--	--	--	--	--	--	-0,35*
Mn verfügbar	0,40**	--	--	--	-0,28*	--	--	--	--	--	--	--	-0,35*
Fe verfügbar	0,55**	--	--	-0,28*	--	-0,28*	-0,32*	-0,28*	--	--	--	--	-0,44**
Zn verfügbar	0,41**	--	--	-0,29*	-0,29*	--	--	--	--	--	--	--	-0,32*
Pb verfügbar	0,59**	0,38**	--	--	--	-0,44**	-0,29*	-0,32*	--	--	--	--	-0,44**
Cd verfügbar	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,29*
Cu verfügbar	-0,38**	-0,40**	--	--	--	0,40**	--	--	--	--	--	--	0,42*
Mn gesamt	-0,55**	--	--	--	0,31*	--	0,46**	0,43**	--	--	--	--	0,38**
Fe gesamt	-0,29*	--	--	--	--	0,39**	0,29*	0,38**	--	--	--	--	0,34*
Zn gesamt	-0,31*	-0,29*	--	--	--	--	0,31*	--	--	--	--	--	--
Pb gesamt	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Cd gesamt	-0,38**	-0,39**	--	--	--	--	--	--	-0,30*	--	--	0,29*	--
Cu gesamt	-0,48**	-0,29*	--	--	--	0,43**	0,41**	0,37**	--	--	--	--	0,47**
Mn verf %	0,48**	--	--	--	-0,32*	-0,39**	-0,36*	-0,37*	--	--	--	--	-0,42**
Fe verf %	0,51**	--	--	--	--	-0,35*	-0,37**	-0,37**	--	--	--	--	-0,48**
Zn verf %	0,44**	--	--	-0,29*	-0,30*	--	--	-0,28*	--	--	--	--	-0,31*

	<i>Hypnum cupressiforme</i>	<i>Dicranum scoparium</i>	<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pohlia lutescens</i>	<i>Pohlia sp.</i>	<i>Cladonia cervicornis</i>	<i>Cladonia pyxidata</i>	<i>Cladonia furcata</i>	<i>Cladonia rangiferina</i>	<i>Cladonia squamosa</i>	<i>Cladonia digitata</i>	<i>Porpidia macrocarpa</i>
Pb verf %	0,61**	0,42**	--	--	-0,30*	-0,45**	-0,29*	-0,35*	--	--	--	--	-0,42**
Cd verf %	0,62**	0,30*	--	--	--	-0,34*	-0,37**	-0,42**	--	--	--	--	-0,42**
Cu verf %	--	-0,43**	--	--	--	--	--	--	-0,36**	-0,33*	--	--	--
Skelettanteil	--	--	0,36*	--	--	0,34*	--	--	--	--	--	--	--
Feinerde gesamt	--	--	-0,36*	--	--	-0,34*	--	--	--	--	--	--	--
WHC (Feinerde)	0,50**	--	--	--	--	-0,33*	--	--	--	--	--	--	-0,34*
Sand (Feinboden)	--	--	--	--	--	0,39**	--	0,30*	0,29*	--	--	--	0,35*
Grobschluff (Feinboden)	0,28*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Schluff (Feinboden)	--	--	--	--	--	-0,35*	--	--	--	--	--	--	--
Ton (Feinboden)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Humus (Feinboden)	0,50**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,33*
Sand gesamt	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Grobschluff gesamt	0,36*	--	--	--	--	-0,28*	--	--	--	--	--	--	--
Schluff gesamt	--	--	-0,38**	--	--	-0,39**	--	--	--	--	--	--	--
Ton gesamt	--	--	-0,40**	--	--	-0,29*	--	--	--	--	--	--	--
Humus gesamt	0,45**	--	--	--	--	-0,35*	-0,30*	-0,29*	--	--	--	--	-0,35*
Neigung	--	--	--	--	--	--	-0,37**	--	--	--	--	--	--
Beschattung	0,31*	--	--	--	--	-0,45**	-0,38**	-0,42**	--	--	--	--	-0,57**

Signifikanz der Unterschiede zwischen repräsentativen Pflanzen und ausgewählten Bodenparametern bzw. Schwermetallen:

Tabelle 21 listet die \*\*hoch signifikanten oder \*signifikanten Unterschiede zwischen repräsentativen Pflanzen und Bodenparametern bzw. Schwermetallen auf. Im Abschnitt Beschreibung der wichtigsten Arten werden die wichtigsten (hoch) signifikanten Unterschiede graphisch dargestellt.

Tabelle 21: Signifikanz der Unterschiede zwischen Pflanzen, ausgewählten Bodenparametern und Schwermetallen (Mann-Whitney Test)

	Skelett	pH	Humus fein	Ton fein	Cu gesamt	Fe gesamt	Mn gesamt	Pb gesamt	Cu verfügbar	Fe verfügbar	Beschattung	Cu verf%	Fe verf%
<i>Pinus sylvestris</i>	**	**	*	--	**	**	**	--	**	**	--	--	**
<i>Quercus petrea</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Rumex acetosella</i>	--	**	**	--	**	--	**	--	*	**	**	--	**
<i>Vaccinium myrtillus</i>	--	--	--	**	*	**	*	--	--	--	--	--	*
<i>Avenella flexuosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	**	--
<i>Melampyrum pratense</i>	--	--	--	**	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Hypnum cupressiforme</i>	--	**	**	--	**	*	**	--	*	**	*	--	**
<i>Pleurozium schreberi</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia sp.</i>	*	*	--	--	**	*	*	--	*	--	**	--	--
<i>Cladonia cervicornis</i>	--	*	--	--	**	**	**	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia pyxidata</i>	--	--	--	--	*	**	*	--	--	*	*	--	--
<i>Porpidia macrocarpa</i>	--	*	*	--	**	**	--	--	*	**	**	--	*

#### **5.4.4 Beschreibung ausgewählter Arten (Cluster, Bodenparameter)**

In der Folge wird nur auf den Deckungsgrad der Arten in den Clustern und in Bezug auf die Beschattung, den pH-Wert und die Schwermetalle (Mn, Fe, Cu) eingegangen.

##### **Pinus sylvestris (Rotföhre)**

Die Rotföhre gehört zur Familie der Pinaceae. Sie ist ein immergrüner Baum und besitzt nadelförmige Blätter (=Nadeln). Die Borke älterer Bäume ist deutlich zweifärbig. Im unteren Bereich des Stammes ist sie schwarz bis grau, oben eher rötlich. *Pinus sylvestris* ist auf mageren, flachgründigen, trockenen wie nassen und basischen wie sauren Böden zu finden. Sie gilt als Zeiger der magersten Waldstandorte. *Pinus sylvestris* ist waldbildend auf Fels- und Felsschutthängen sowie auf Sandböden (Föhrenwälder) und an Hochmoorrändern (mit Fichte). Mit der Stieleiche kommt sie auch auf sauren Schotterböden vor (Fischer *et al.*, 2008).

Die Karten in Abbildung 114 zeigt das Vorkommen von *Pinus sylvestris* in der Baumschicht auf den Messpunkten des Untersuchungsgebietes. Anzumerken ist, dass bei Messpunkten HW 5, 15 und 19 *Pinus sylvestris* nicht auf dem Messpunkt wächst, sondern die Baumkrone über diesen Messpunkt ragt.

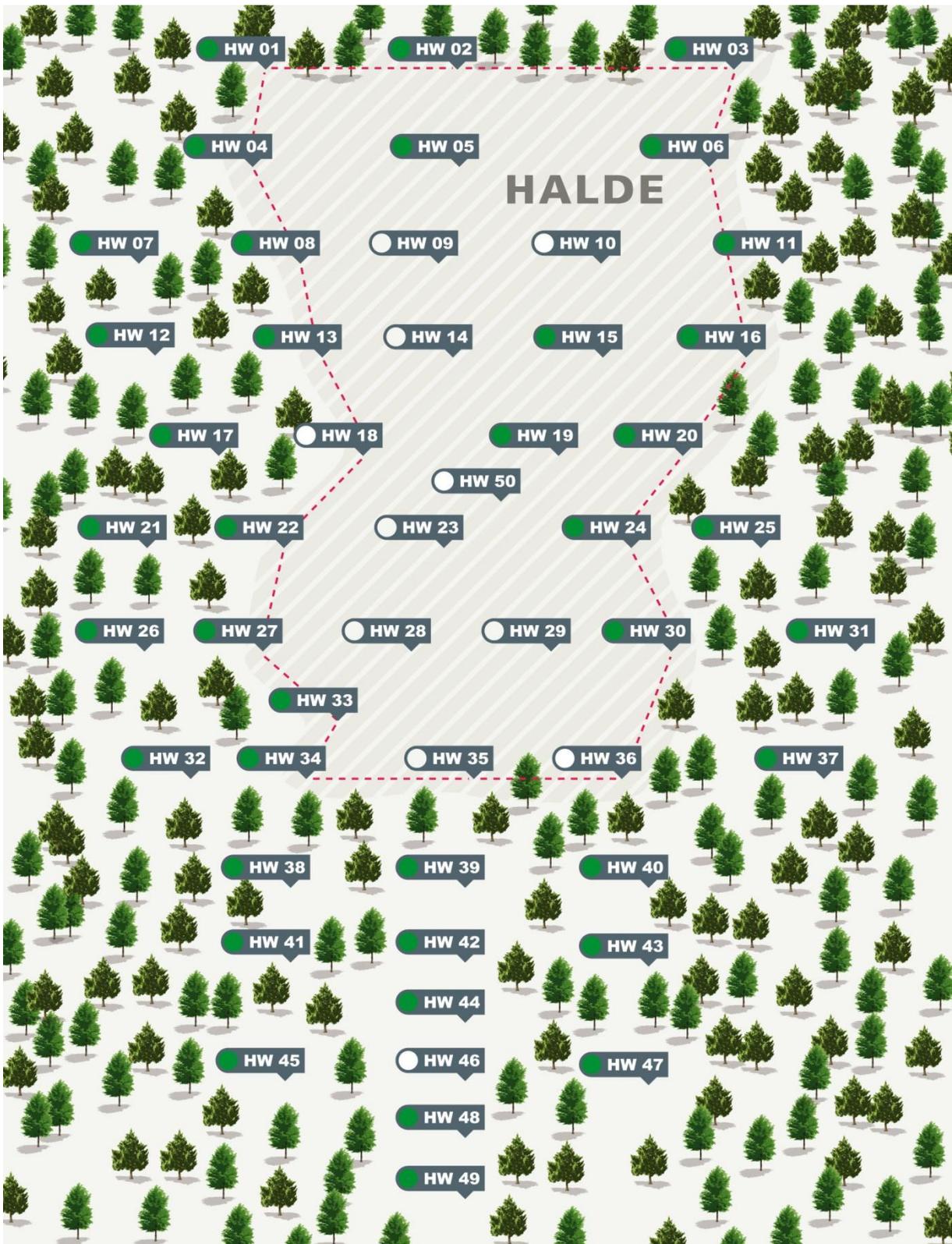


Abbildung 114: Vorkommen von *Pinus sylvestris* in der Baumschicht auf den Messpunkten (grün eingefärbt)

Im Untersuchungsgebiet ist *Pinus sylvestris* auf den Clustern der *Halde* nicht vertreten. Im Cluster *Waldrand* ist sie mit einem Deckungsgrad von drei zu finden. In den drei Clustern im *Wald* erreicht *Pinus sylvestris* jeweils den höchsten Deckungsgrad von vier. Der Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* weist drei Ausreißer auf (Abbildung 115).

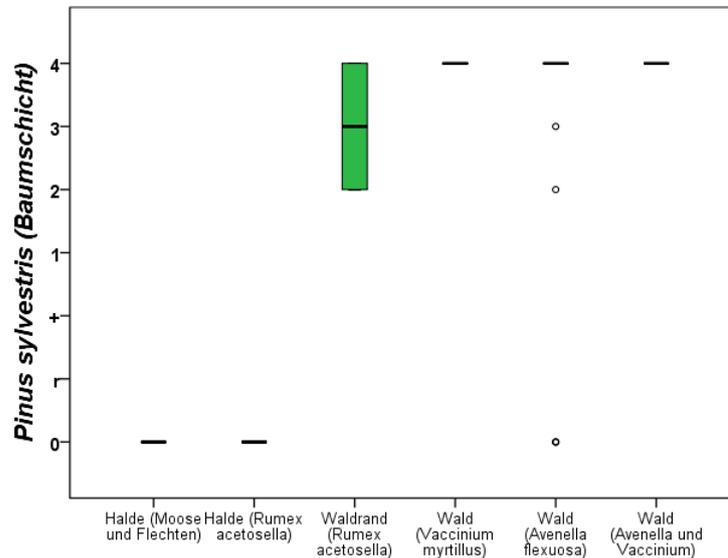


Abbildung 115: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) auf den verschiedenen Clustern

In den vollsonnigen Bereichen ist *Pinus sylvestris* in der Baumschicht nicht vertreten. Im Halbschatten liegt der Deckungsgrad zwischen zwei und vier (Median). Im Schatten und tiefen Schatten erreicht die Rotföhre jeweils einen Deckungsgrad von vier (Abbildung 116).

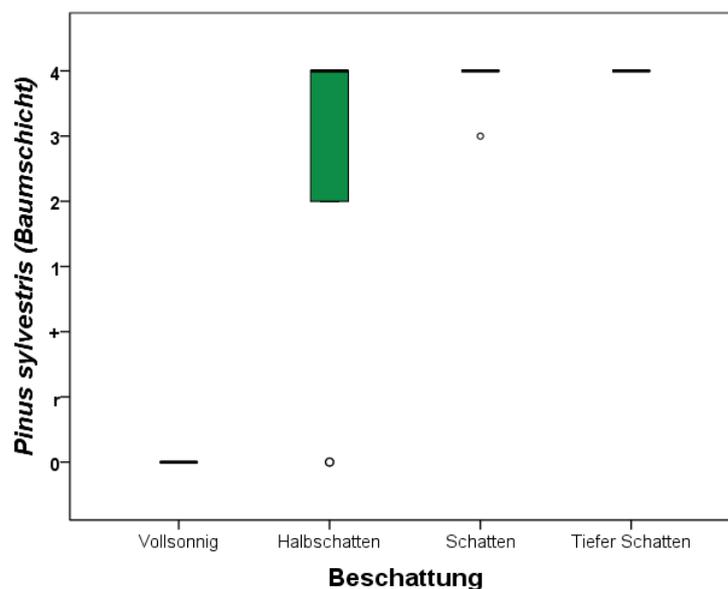


Abbildung 116: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei zunehmender Beschattung

Von den extrem sauren Bereichen bis in die mäßig sauren Bereiche weist *Pinus sylvestris* einen Deckungsgrad von vier auf. Im mäßig Sauren ist ein Ausreißer zu finden. im schwach Sauren liegt der Median des Deckungsgrades lediglich bei + (Abbildung 117) (Legende **pH-Wert** siehe Tabelle 3).

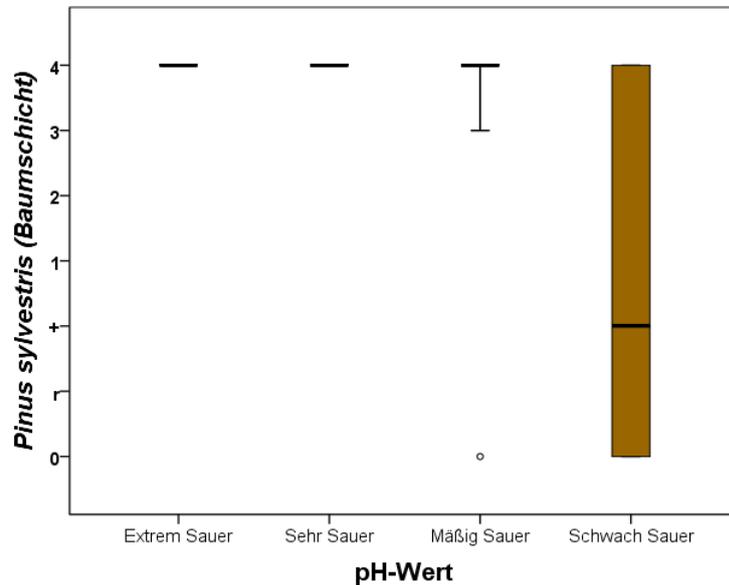


Abbildung 117: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem pH-Wert

Mit steigendem **Mangan-Gesamtgehalt** nimmt der Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* ab. In manganfreien und manganarmen Bereichen liegt der Deckungsgrad bei vier. an mäßig manganreichen Standorten erreicht die Rotföhre einen Deckungsgrad zwischen eins und vier (Median bei drei). Im sehr Manganreichen Bereich liegt der Deckungsgrad zwischen null und vier mit dem Median bei null (Abbildung 118) (Legende Mangan-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

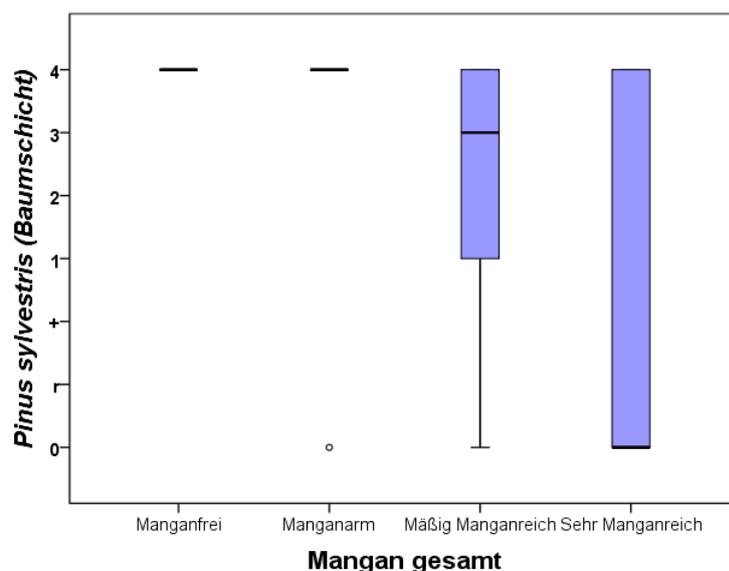


Abbildung 118: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]

Genau umgekehrt sieht der Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* beim **verfügbaren Mangan** aus. Auf manganfreien Messpunkten liegt der Deckungsgrad zwischen null und vier mit einem Median bei zwei. Die manganarmen Standorte weisen ebenfalls einen Deckungsgrad zwischen null und vier auf, der Median liegt jedoch bei vier. Mit steigender Mangan-Verfügbarkeit (mäßig manganreich, sehr manganreich) nimmt der Deckungsgrad bis auf Ausreißer auf vier zu (Abbildung 119) (Legende verfügbares Mangan siehe Tabelle 3).

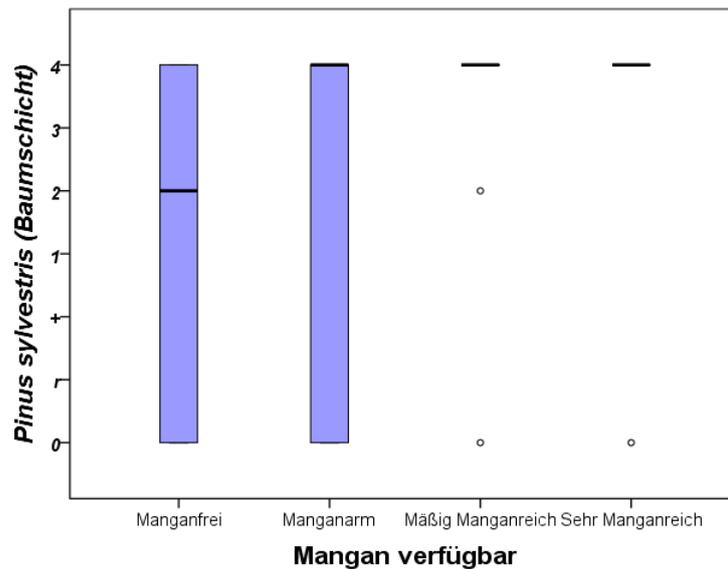


Abbildung 119: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

Vom eisenfreien bis zum mäßig eisenreichen Bereich weist *Pinus sylvestris* einen Deckungsgrad von vier auf. Lediglich an sehr eisenreichen Standorten liegt der Deckungsgrad zwischen null und vier mit dem Median bei + (Abbildung 120) (Legende **Eisen-Gesamtgehalt** Tabelle 3).

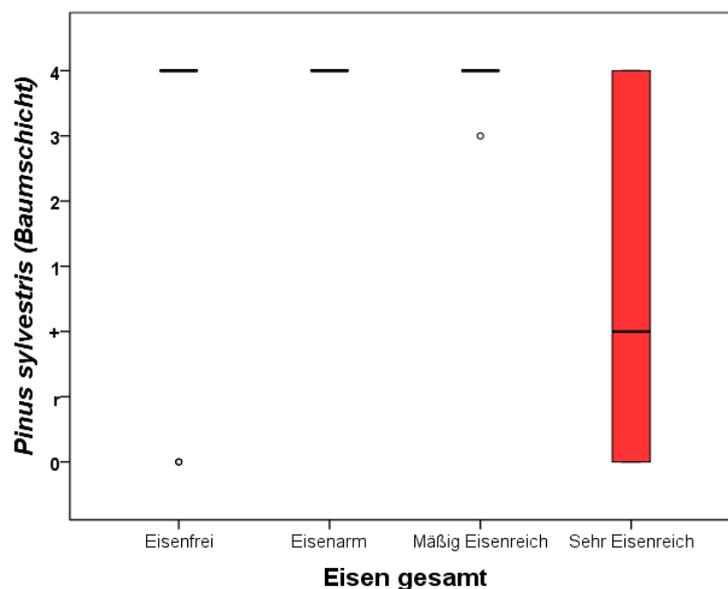


Abbildung 120: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Genau umgekehrt zeigt sich der Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* beim **verfügbaren Eisen**. An eisenfreien Standorten weist die Rotföhre mit null bis vier (Median bei 2) den geringsten Deckungsgrad auf. Mit steigendem verfügbarem Eisen (eisenarm, mäßig eisenreich, sehr eisenreich) nimmt der Deckungsgrad auf vier (Median) zu (Abbildung 121) (Legende verfügbares Eisen Tabelle 3).

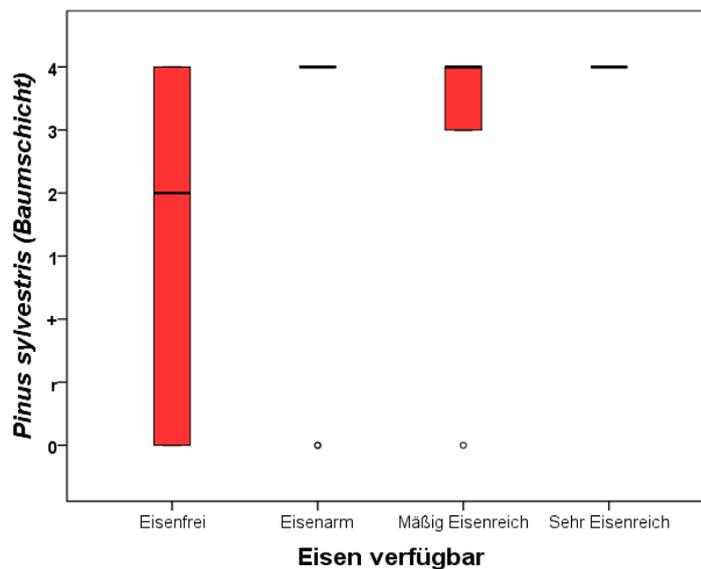


Abbildung 121: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

Mit steigendem **Kupfer-Gesamtgehalt** nimmt der Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* ab. Im kupferfreien und kupferarmen Bereich liegt der Deckungsgrad bei vier. An mäßig kupferreichen Standorten liegt der Deckungsgrad zwischen + und vier (Median bei vier). An sehr kupferreichen Messpunkten erreichen die Rotföhren einen Deckungsgrad zwischen null und vier mit einem Median bei null (Abbildung 122) (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

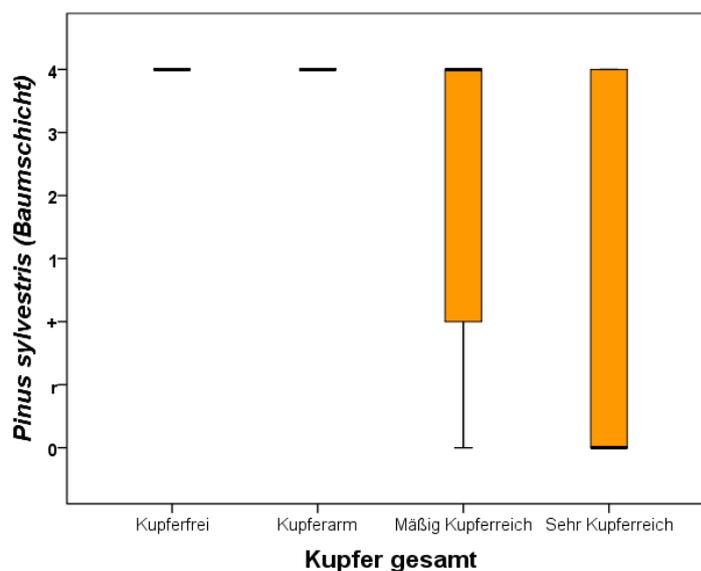
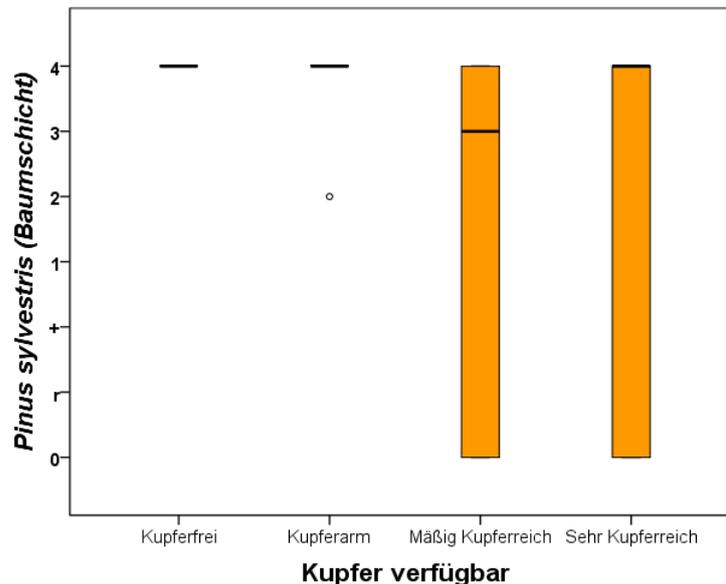


Abbildung 122: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

Bei steigendem **verfügbarem Kupfer** nimmt der Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* ab. Im kupferfreien und kupferarmen Bereich liegt der Deckungsgrad bei vier. An mäßig kupferreichen Standorten erreicht der Deckungsgrad (null bis vier) einen Median bei drei. Auf den sehr kupferreichen Messpunkten liegt der Deckungsgrad zwischen null und vier mit einem Median bei vier (Abbildung 123) (Legende verfügbares Kupfer siehe Tabelle 3).



**Abbildung 123: Deckungsgrad von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]**

Das Auftreten von *Pinus sylvestris* korreliert mit dem Vorkommen von *Larix decidua* (Strauchschicht) ( $R^2=-0,29^*$ ), *Larix decidua* (Krautschicht) ( $R^2=-0,35^*$ ), *Vaccinium myrtillus* ( $R^2=0,29^*$ ), *Rumex acetosella* ( $R^2=-0,52^{**}$ ), *Hypnum cupressiforme* ( $R^2=0,38^{**}$ ), *Pohlia sp.* ( $R^2=-0,43^{**}$ ), *Cladonia cervicornis* ( $R^2=-0,60^{**}$ ), *Cladonia pyxidata* ( $R^2=-0,55^{**}$ ) und *Porpidia macrocarpa* ( $R^2=-0,56^{**}$ ), siehe Tabelle 24.

*Pinus sylvestris* ist nur auf den Clustern der Halde und am vollsonnigen Standort nicht vertreten. Der Deckungsgrad dieser Art nimmt im schwach Sauren ab. Mit steigendem Gesamtgehalt an Mangan, Eisen und Kupfer sinkt der Deckungsgrad der Rotföhre. Mit steigender Mangan- und Eisenverfügbarkeit steigt auch der Deckungsgrad von *Pinus sylvestris*. Nur bei zunehmender Kupferverfügbarkeit sinkt der Deckungsgrad der Rotföhre.

### **Avenella flexuosa (Drahtschmiele)**

Sie gehört zu der Familie der Poaceae. *Avenella flexuosa* (Abbildung 124), auch bekannt unter dem Namen *Deschampsia flexuosa*, ist ein ausdauernder Hemikryptophyt. Sie ist als Säurezeiger in bodensauren Wäldern, bei Waldschlägen und in Rasengesellschaften, bevorzugt auf kalkarmen, mageren Böden, aufzufinden. Durch unterirdische Ausläufer vermehrt sich das Gras vegetativ. Die Rispe sitzt locker auf geschlängelten, oft violetten Ästen. Die Pflanze ist ab Spätsommer meist kupferrot (Fischer *et al.*, 2008).



**Abbildung 124: Herbar von *Avenella flexuosa*; Standort: Messpunkt HW 3, Sammler: Yasmin Weiss**

Die Karte in Abbildung 125 zeigt die Verteilung von *Avenella flexuosa* auf den Messpunkten im Untersuchungsgebiet.

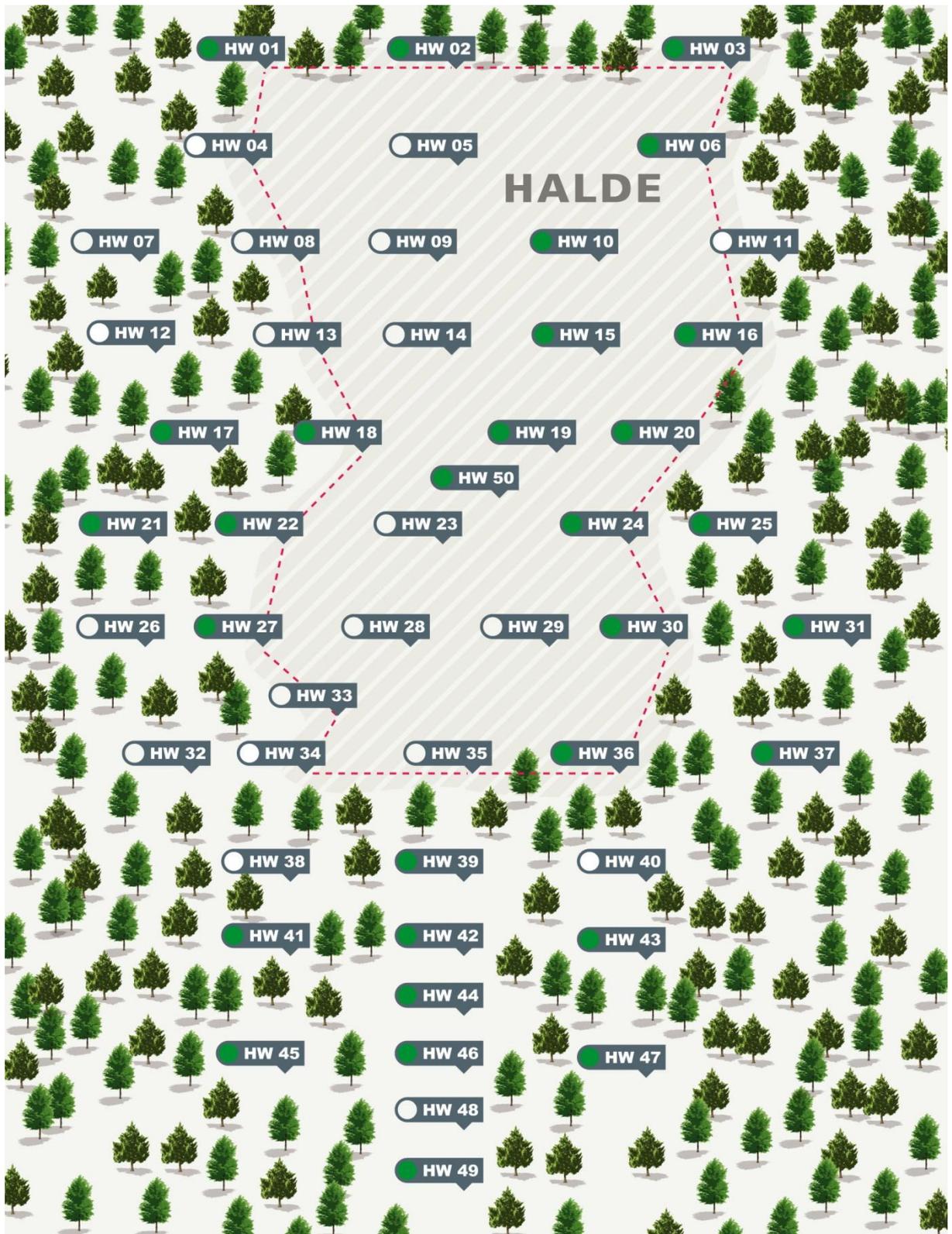


Abbildung 125: Vorkommen von *Avenella flexuosa* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)

In dem untersuchten Gebiet ist das Süßgras auf der *Halde* (Moose und Flechten) und am *Waldrand* nicht vertreten, einige Exemplare findet man auf der *Halde* (*Rumex acetosella*) und im *Wald* (*Vaccinium myrtillus*). Einen Deckungsgrad von eins (1-4%) nach Braun-Blanquet (1964) bekommt die Drahtschmiele im Cluster *Wald* (*Avenella flexuosa*). Den höchsten Deckungsgrad erreicht sie im Cluster *Wald* (*Avenella* und *Vaccinium*) mit einem Deckungsgrad von eins bis zwei (1-24%) (Abbildung 126).

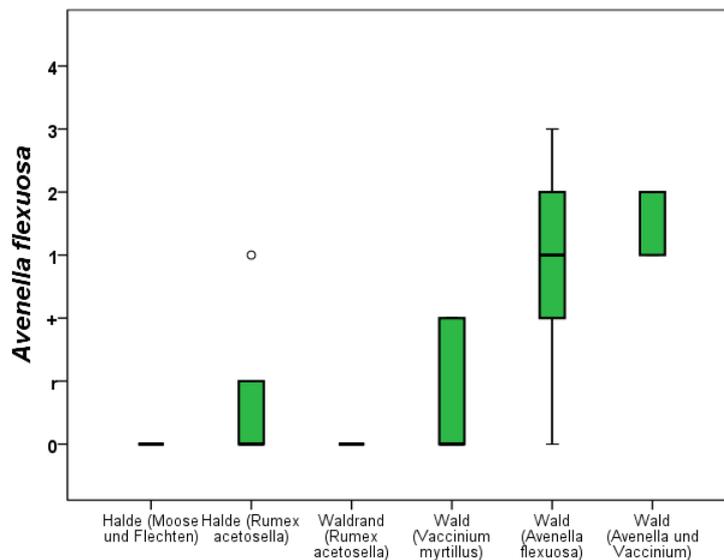


Abbildung 126: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* auf den verschiedenen Clustern

Am vollsonnigen Standort auf der Halde ist *Avenella flexuosa* mit null bis r nur sehr spärlich vorhanden, vom Halbschatten bis in den tiefen Schatten hingegen siedelt sie sich gerne an (Abbildung 127). In den schattigen Abschnitten sind keine großen Unterschiede beim Deckungsgrad der Pflanze zu entdecken. Der Median liegt hier bei + (< 1%).

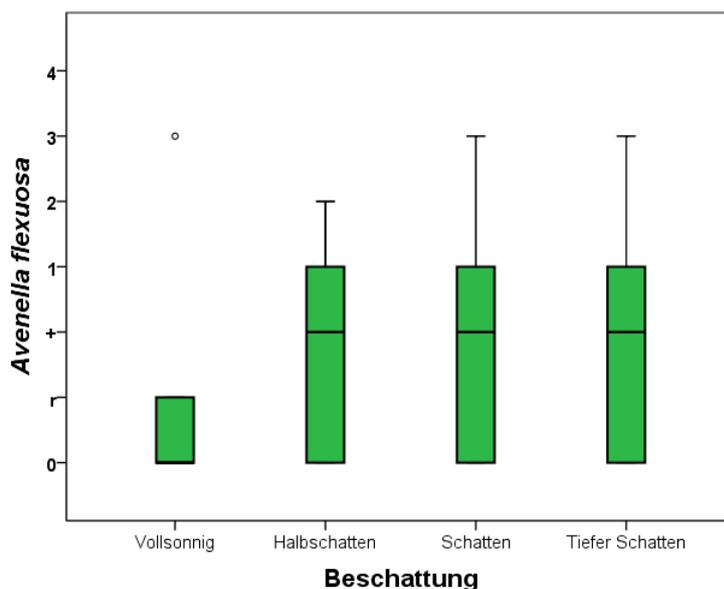


Abbildung 127: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei zunehmender Beschattung

Aus Abbildung 128 ist ersichtlich, dass der Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* nicht bzw. nur sehr gering durch den **pH-Wert** beeinflusst wird. Der Deckungsgrad beträgt durchwegs +, im schwach Sauren liegt der Median bei r (< 5 Exemplare), (Legende pH-Wert siehe Tabelle 3).

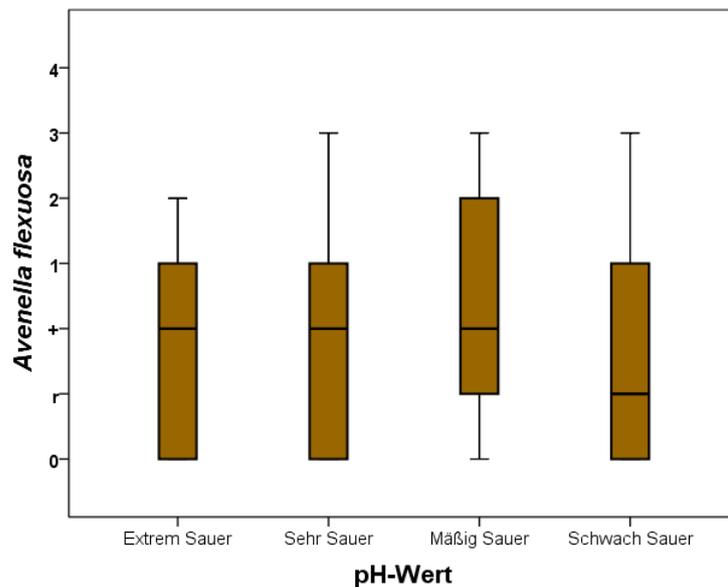


Abbildung 128: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem pH-Wert

Betrachtet man den Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* in Bezug auf den **Gesamtgehalt an Mangan** im Boden, so zeigt Abbildung 129 in manganfreien Bereich einen Deckungsgrad von + und auf manganarmen Standorten r (wenige Exemplare). Auf mäßig manganreichen Standorten erhöht sich der Deckungsgrad wieder auf +. Sehr manganreiche Bereiche weisen einen Deckungsgrad von null bis zwei auf (Legende Mangan-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

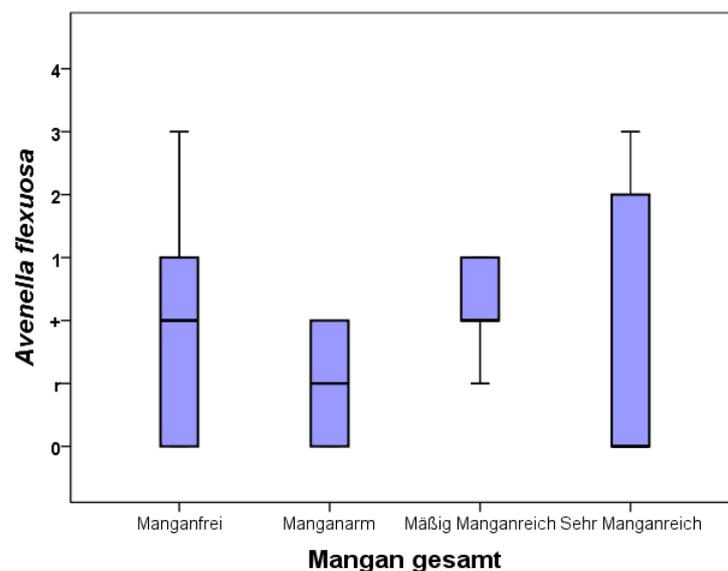


Abbildung 129: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt

Der Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei verschiedenen hoher **Verfügbarkeit des Mangans** ist in Abbildung 130 dargestellt. An manganfreien Standorten erreicht sie den höchsten Deckungsgrad zwischen null und zwei mit einem Median bei +. An manganarmen Messpunkten liegt der Deckungsgrad zwischen null und + (Median bei r). Auf den mäßig manganreichen und sehr manganreichen Standorten liegt der Deckungsgrad zwischen null und eins mit einem Median bei + (Legende verfügbares Mangan siehe Tabelle 3).

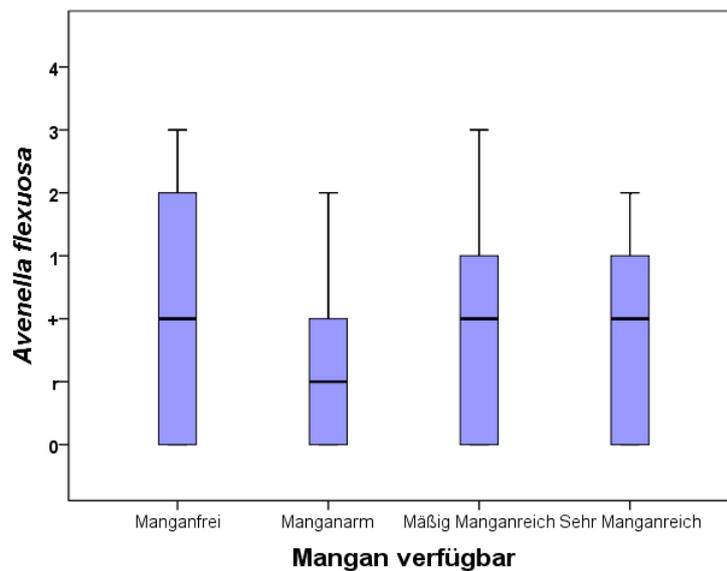


Abbildung 130: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

Im Eisenfreien und mäßig Eisenreichen liegt der Deckungsgrad bei + (Median). An eisenarmen Standorten sinkt der Median auf r. An sehr eisenreichen Messpunkten liegt der Median bei r (Abbildung 131) (Legende **Eisen-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

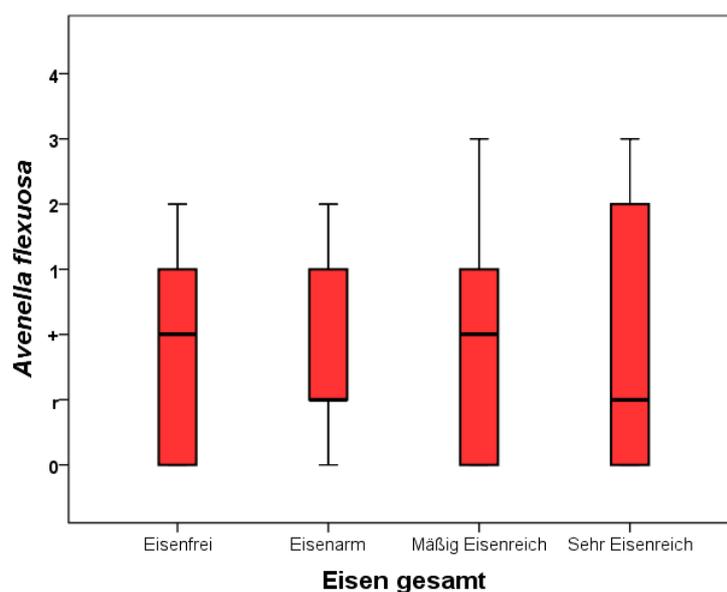


Abbildung 131: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Abbildung 132 zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede im Deckungsgrad bei verschiedenen hohen **Verfügbarkeit des Eisens** auftreten. Der Deckungsgrad des Süßgrases liegt bei +, nur in eisenfreien Bereichen liegt der Median bei r (Legende verfügbares Eisen siehe Tabelle 3).

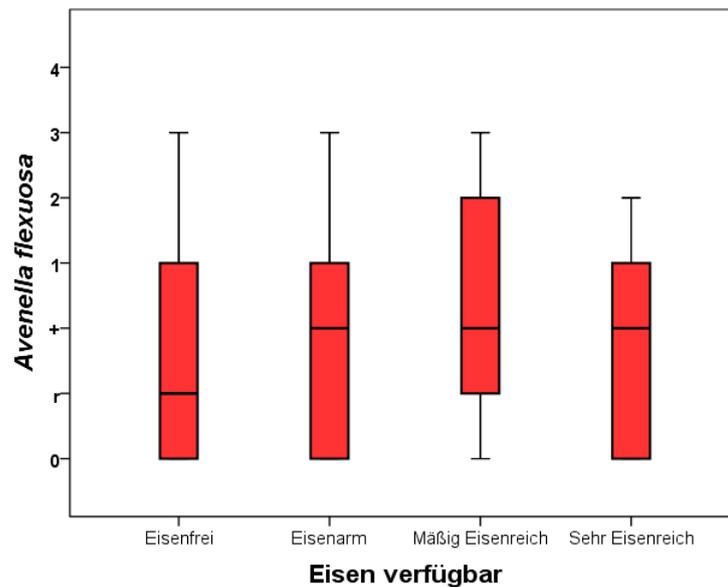


Abbildung 132: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

Der Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei verschiedenen hohen **Gesamtgehalten an Kupfer** schwankt zwischen + (kupferfrei und mäßig kupferreich) und r (kupferarm und sehr kupferreich), es ist kein klarer Trend zu erkennen

Abbildung 133), (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

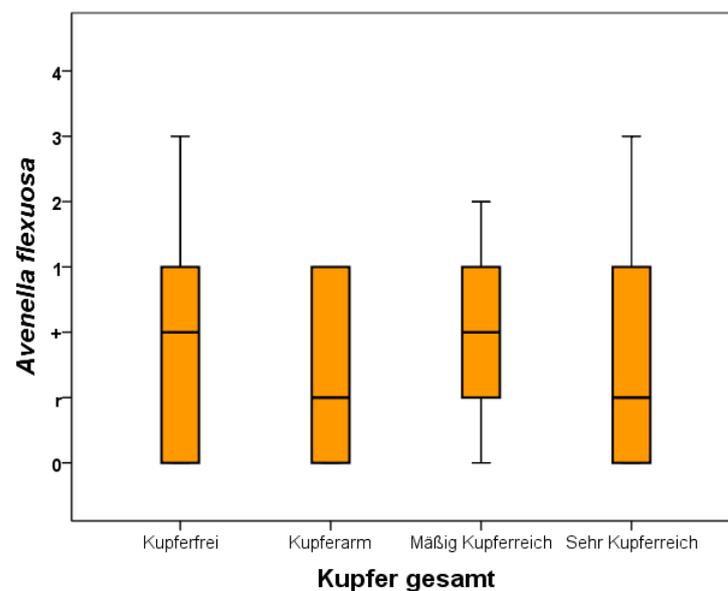
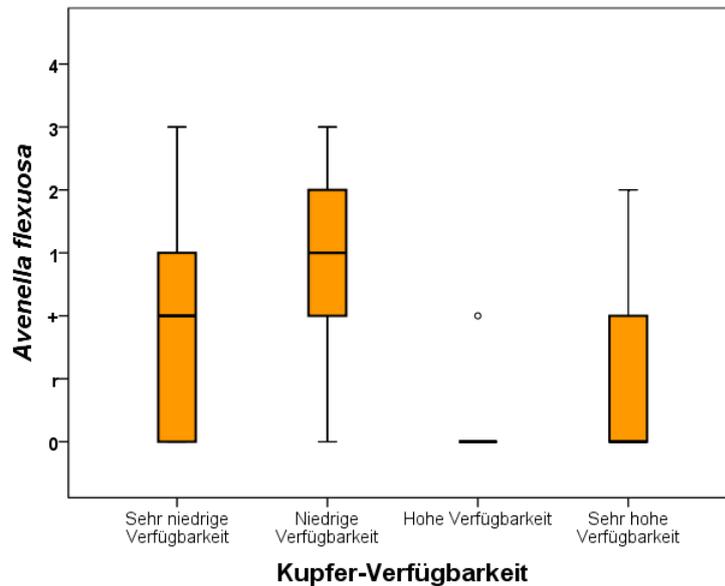


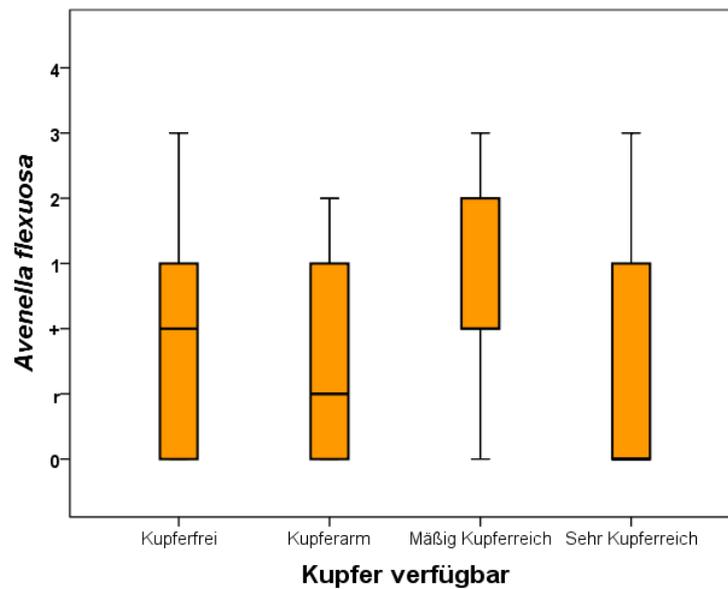
Abbildung 133: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt

Abbildung 134 zeigt hoch signifikante Unterschiede der Deckungsgrade bei steigender prozentueller Kupfer-Verfügbarkeit. Bei sehr niedriger Verfügbarkeit liegt der Deckungsgrad bei +, mit niedriger Verfügbarkeit steigt der Deckungsgrad auf eins. Eine hohe oder sehr hohe Verfügbarkeit hat ein Zurückgehen von *Avenella flexuosa* zur Folge (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).



**Abbildung 134: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigender prozentuellen Kupfer-Verfügbarkeit**

Aus Abbildung 135 ist ersichtlich, dass der Deckungsgrad auf kupferfreien und mäßig kupferreichen Standorten bei + (Median) liegt. Einen Deckungsgrad von r weisen die kupferarmen Messpunkte auf. Bei einer sehr hohen Kupfer-Verfügbarkeit (entspricht „sehr kupferreich“) liegt der Median bei null (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).



**Abbildung 135: Deckungsgrad von *Avenella flexuosa* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]**

Das Auftreten von *Avenella flexuosa* korreliert mit dem Vorhandensein von *Hypnum cupressiforme* ( $R^2=0,32^*$ ), *Dicranum scoparium* ( $R^2=0,30^*$ ), *Pleurozium schreberi* ( $R^2=0,32^*$ ), *Ceratodon purpureus* ( $R^2=0,30^*$ ), *Pohlia sp.* ( $R^2=-0,36^*$ ) und *Cladonia digitata* ( $R^2=-0,31^*$ ), siehe Tabelle 25.

*Avenella flexuosa* ist in den Clustern im Wald an eher schattigen Standorten zu finden. Weder Mangan-Gesamtgehalt noch pH-Wert, verfügbares Eisen oder Kupfer-Gesamtgehalt beeinflussen den Deckungsgrad der Drahtschmiele. Nur bei hoher prozentueller Kupfer-Verfügbarkeit bleibt sie aus.

### **Rumex acetosella (Zwergsauerampfer)**

Der Zwergsauerampfer, auch *Acetosella vulgaris* genannt, gehört zur Familie der Polygonaceae (Abbildung 136). *Rumex acetosella* ist eine hemikryptophyte, ausdauernde, niedrige bis kleine Staude mit aufrechten Stämmen, die Laubblätter sind pfeilförmig. Er ist eine Kalk meidende Art auf sandigen, durchlässigen Böden. Eine dreieckige Nuss als Frucht ist charakteristisch (Grey-Willson & Blamey, 2008). *Rumex acetosella* ist auf trockenen, bodensauren Magerwiesen, lückigen Trockenrasen, Äckern und trockenen Waldschlägen zu finden (Fischer *et al.*, 2008).



**Abbildung 136: *Rumex acetosella* auf der Kupfer Abraumhalde in Hirschwang; (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig)**

Die Karte in Abbildung 137 zeigt die Verteilung von *Rumex acetosella* auf den Messpunkten im Untersuchungsgebiet.

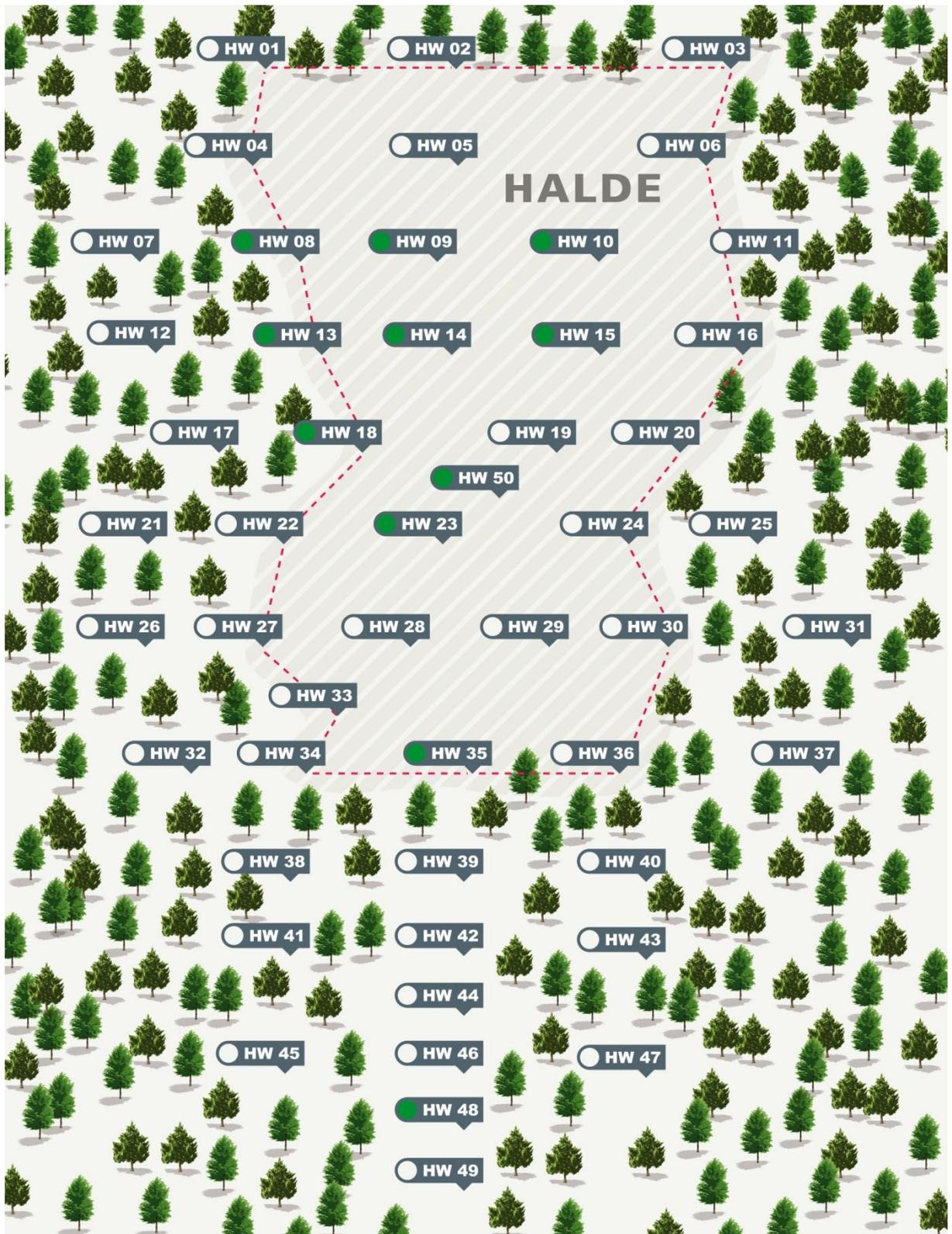


Abbildung 137: Vorkommen von *Rumex acetosella* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)

Im Untersuchungsgebiet ist der Zwergsauerampfer in den nach ihm benannten Clustern *Halde (Rumex acetosella)* und *Waldrand (Rumex acetosella)* mit einem Deckungsgrad von eins zu finden (Abbildung 138).

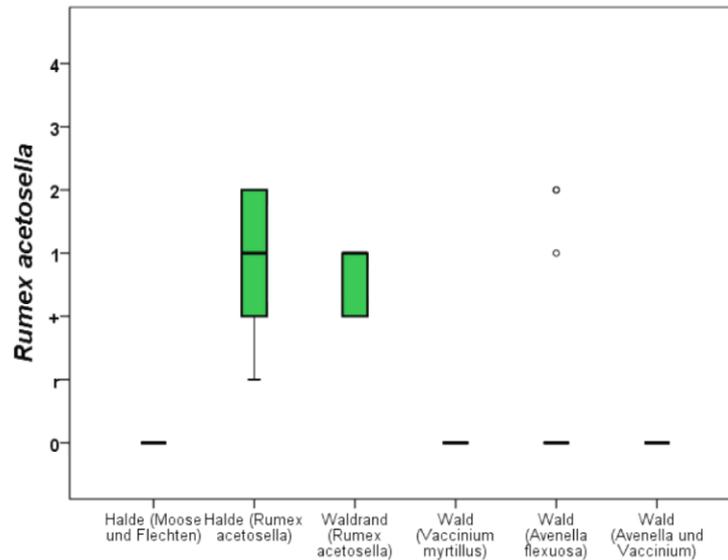


Abbildung 138: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* auf den verschiedenen Clustern, die Kreise kennzeichnen Ausreißer

Der Deckungsgrad von *Rumex acetosella* beträgt an vollsonnigen Standorten 1 (Median, wenige Exemplare) und nimmt mit höherer **Beschattung** ab (Abbildung 139).

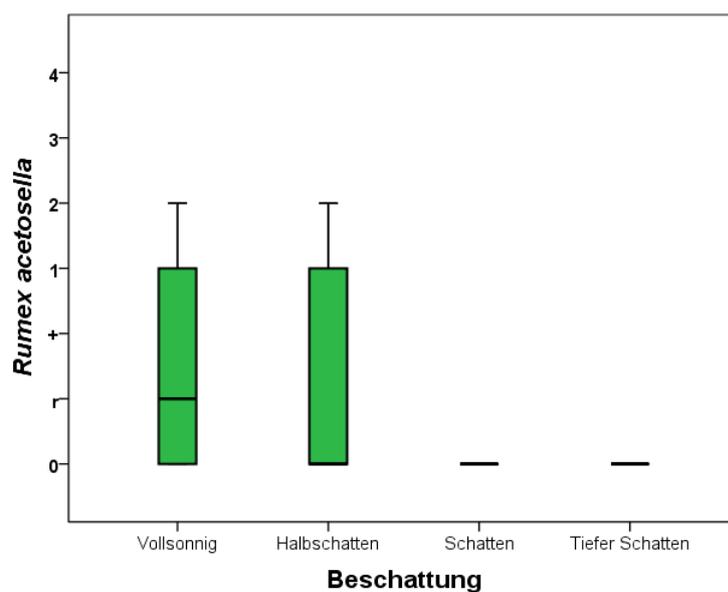


Abbildung 139: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei zunehmender Beschattung

Im schwach Sauren erreicht *Rumex acetosella* seinen höchsten Deckungsgrad (r), in den saureren Bereichen beträgt der Deckungsgrad null (Abbildung 140), (Legende **pH-Wert** siehe Tabelle 3).

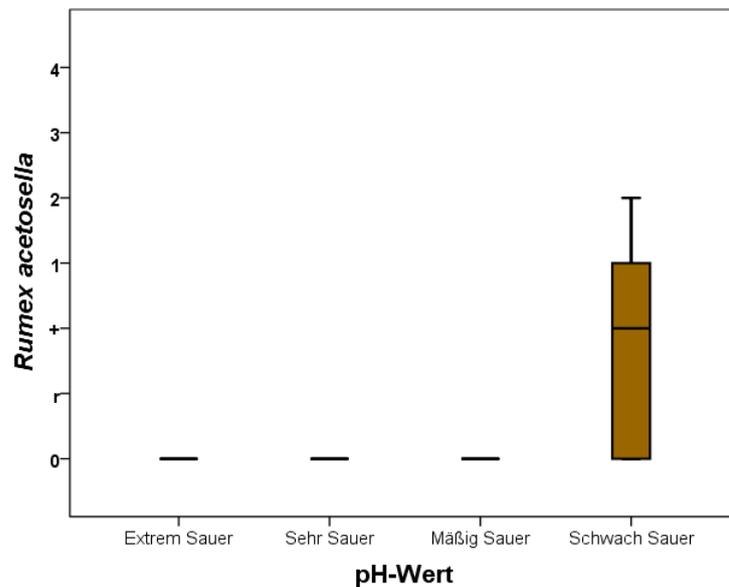


Abbildung 140: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem pH-Wert

Den höchsten Deckungsgrad (r) erlangt der Zwergsauerampfer auf sehr manganreichen Standorten (Abbildung 141). Bei geringeren Mangan-Gehalten geht der Deckungsgrad gegen null, in manganarmen Bereichen sind nur Ausreißer zu finden (Legende **Mangan-Gesamtgehalt** Tabelle 3).

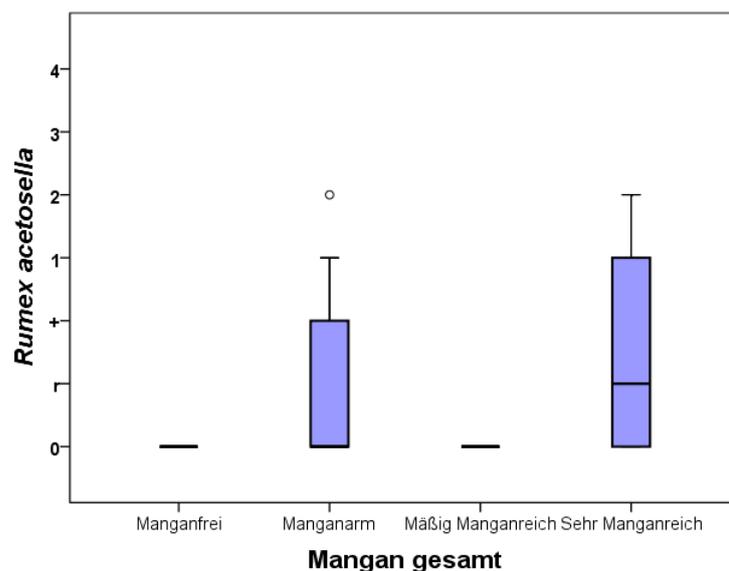


Abbildung 141: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt

Mit steigendem **verfügbarem Mangan** nimmt der Deckungsgrad von *Rumex acetosella* ab. Im Manganfreien liegt der Deckungsgrad zwischen null und zwei (Median bei 0). Manganarme Standorte weisen einen Deckungsgrad zwischen null und + (Median bei 0) auf. Mäßig manganreiche und sehr Manganreiche Messpunkte haben, bis auf Ausreißer, einen Deckungsgrad von null (Abbildung 142) (Legende verfügbares Mangan siehe Tabelle 3).

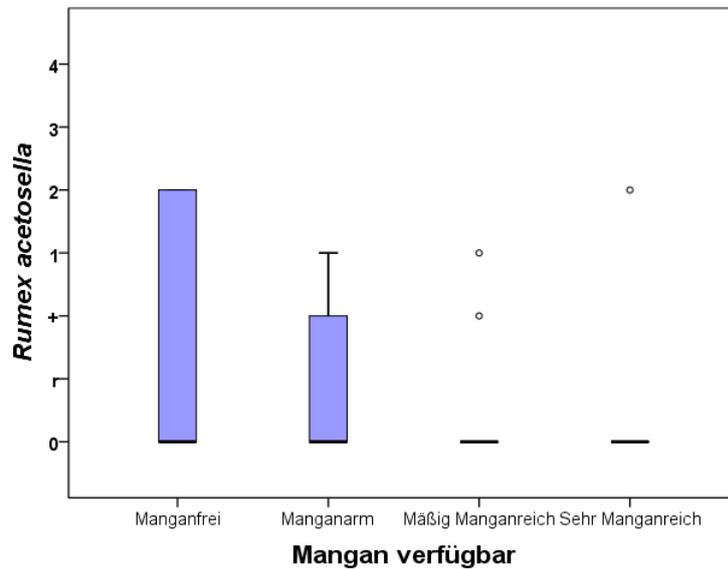


Abbildung 142: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

Den höchsten Deckungsgrad von *Rumex acetosella* findet man an sehr eisenreichen Standorten (Abbildung 143). In eisenfreien bis mäßig eisenreichen Bereichen liegt der Deckungsgrad, abgesehen von den Ausreißern, bei null (Legende **Eisen-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

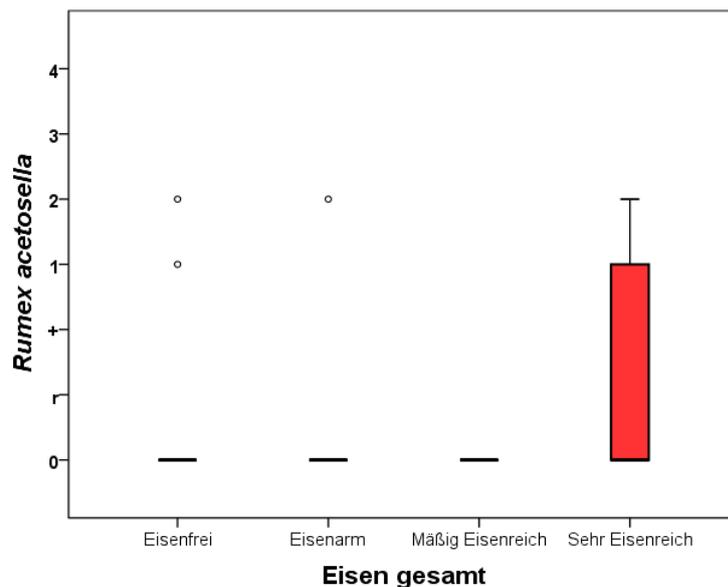


Abbildung 143: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Die Ergebnisse des **verfügbaren Eisens** [mg/kg] in Abbildung 144 zeigen mit + den höchsten Deckungsgrad bei eisenfreien Standorten. Bei höherer Eisen-Verfügbarkeit reduziert sich der Deckungsgrad auf null (Legende verfügbares Eisen siehe Tabelle 3).

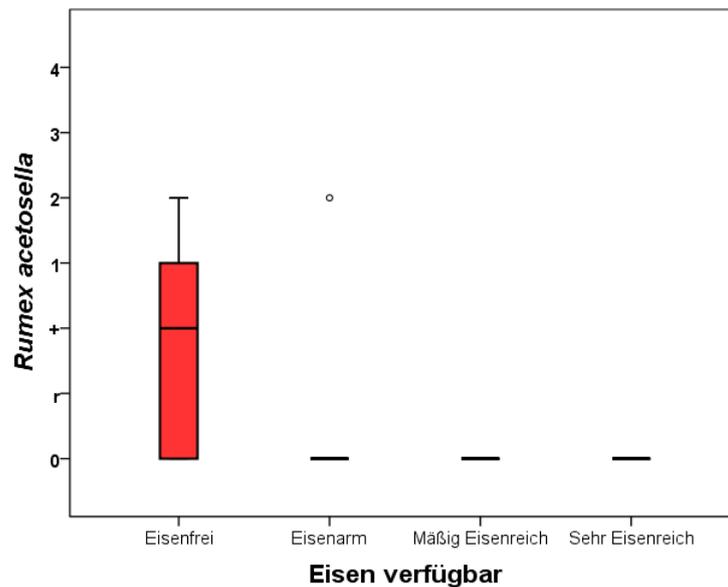


Abbildung 144: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

Aus Abbildung 145 geht hervor, dass bei kupferfreien und kupferarmen Messpunkten der Deckungsgrad bei null liegt und mit steigendem **Kupfer-Gesamtgehalt** zunimmt. An sehr kupferreichen Standorten erhöht sich der Deckungsgrad auf + (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

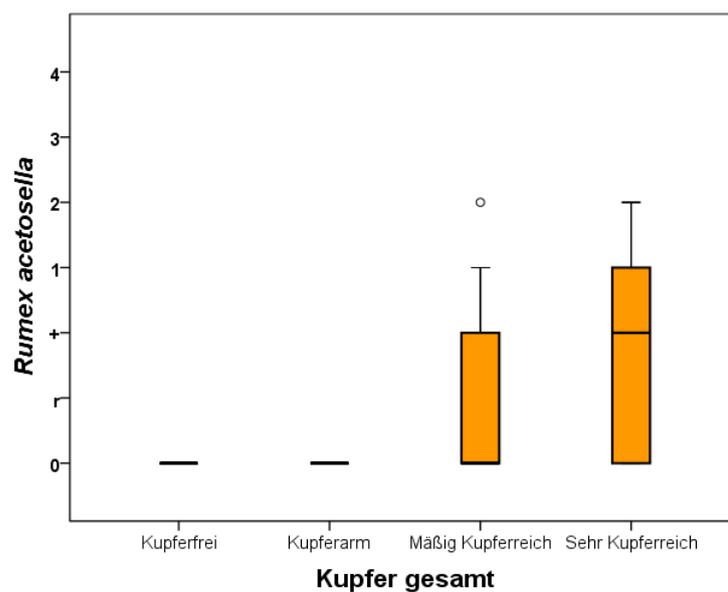


Abbildung 145: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

Auch beim **verfügbaren Kupfer** [mg/kg] in Abbildung 146 verlagern sich das Auftreten von *Rumex acetosella* auf die mäßig kupferreichen und sehr kupferreichen Bereiche des Untersuchungsgebiets (Legende verfügbares Kupfer siehe Tabelle 3).

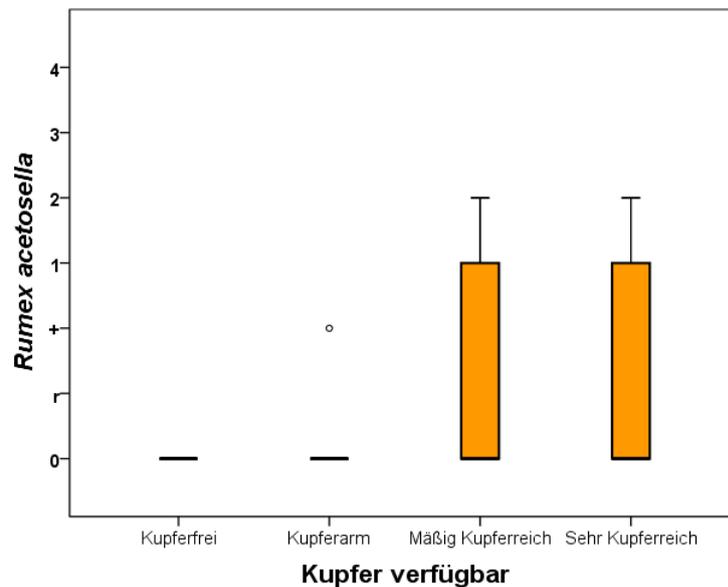


Abbildung 146: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]

Das Vorkommen von *Rumex acetosella* korreliert mit dem Auftreten von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=-0,52^{**}$ ), *Larix decidua* (Strauchschicht) ( $R^2=0,38^{**}$ ), *Vaccinium myrtillus* ( $R^2=-0,31^*$ ), *Silene nemoralis* ( $R^2=0,31^*$ ), *Hypnum cupressiforme* ( $R^2=-0,45^{**}$ ), *Dicranum scoparium* ( $R^2=-0,34^{**}$ ), *Pohlia nutans* ( $R^2=0,31^*$ ), *Pohlia lutescens* ( $R^2=0,37^{**}$ ), *Pohlia drummondii* ( $R^2=0,45^{**}$ ), *Cladonia cervicornis* ( $R^2=0,41^{**}$ ), *Cladonia arbuscula* ( $R^2=0,31^{**}$ ), *Cladonia pyxidata* ( $R^2=0,42^{**}$ ) und *Porpidia macrocarpa* ( $R^2=0,55^{**}$ ), siehe Tabelle 25.

*Rumex acetosella* ist nur in den zwei nach ihm benannten vollsonnigen bis halbschattigen Clustern vorhanden. Im Untersuchungsgebiet ist diese Art im schwach Sauren zu finden. Der Zwergsauerampfer ist im sehr eisenreichen und mäßig bis sehr kupferreichen Bereich angesiedelt. Dieser Bereich zeichnet sich durch eine sehr niedrige Eisen-Verfügbarkeit und eine mäßig bis sehr hohe Kupfer-Verfügbarkeit aus.

### **Vaccinium myrtillus (Heidelbeere)**

Die sommergrüne Heidelbeere (Abbildung 147) gehört zur Familie der Ericaceae (Heidegewächse). Die jungen Äste sind scharfkantig und bleiben mehrere Jahre lang grün. Zu finden ist *Vaccinium myrtillus* als Säurezeiger in bodensauren, frischen Wäldern, in Zwergstrauch-Heiden und Mooren. Sie ist kalkmeidend, schneeschutzbedürftig und kommt im Submontanen bis Unteralpinen vor (Fischer *et al.*, 2008). In der Karte (Abbildung 148) ist das Vorkommen von *Vaccinium myrtillus* auf den Messpunkten dargestellt.



**Abbildung 147: *Vaccinium myrtillus* am nördlichen (linken) Rand der Halde (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig)**

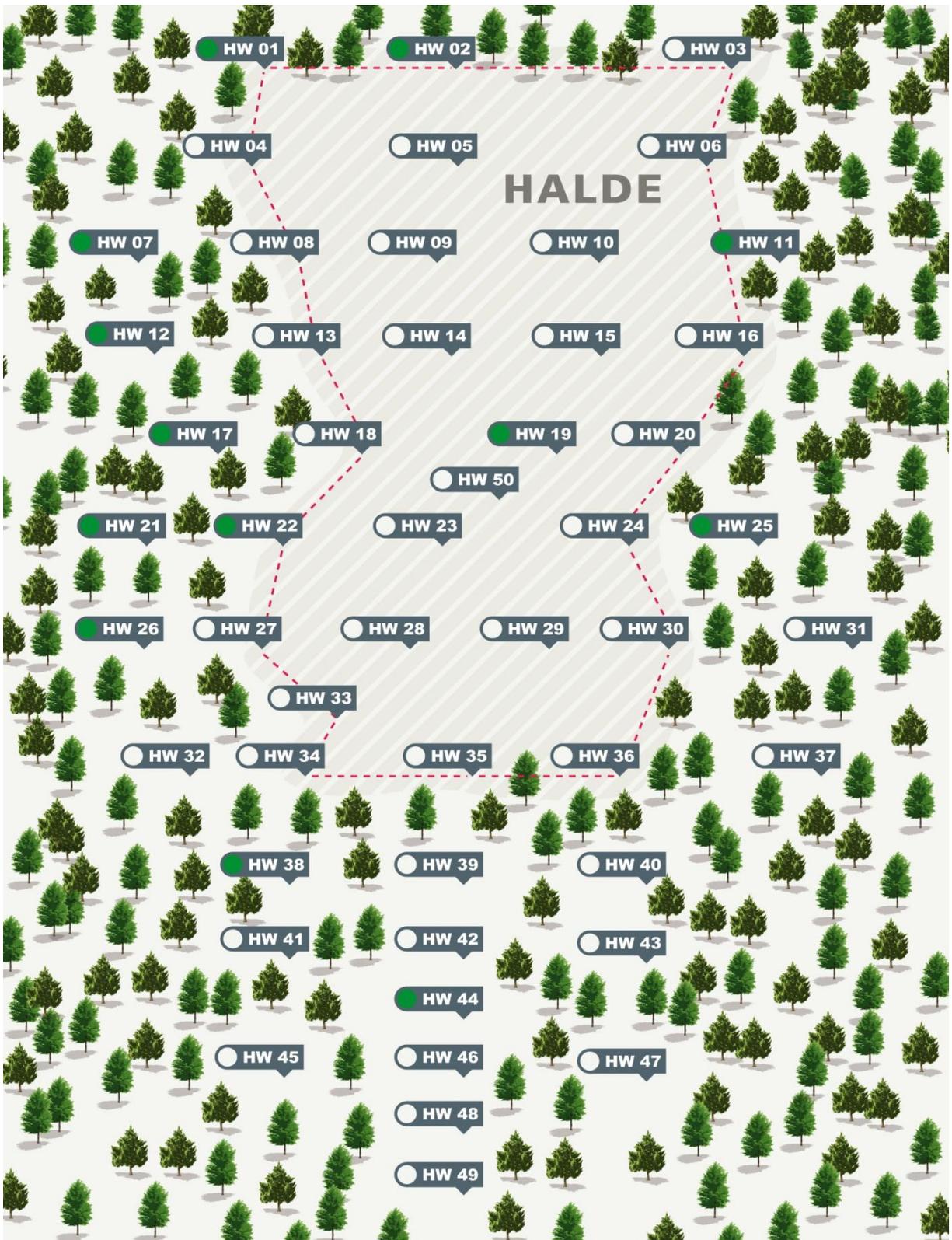
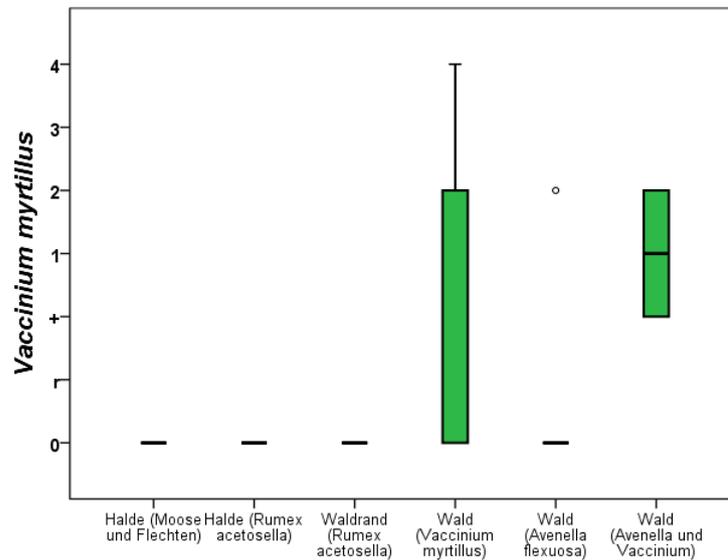


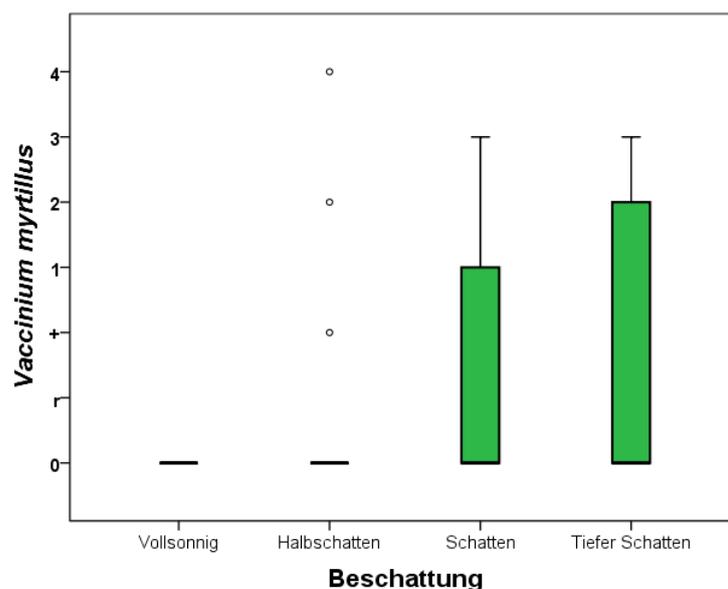
Abbildung 148: Vorkommen von *Vaccinium myrtillus* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)

Aus Abbildung 149 ist ersichtlich, dass *Vaccinium myrtillus* mit einem Median bei eins seinen höchsten Deckungsgrad im Cluster *Wald (Avenella und Vaccinium)* hat. Stark vertreten ist *Vaccinium myrtillus* mit einem Deckungsgrad von null bis zwei in dem nach ihm benannten Cluster *Wald (Vaccinium myrtillus)*. In den übrigen Clustern ist *Vaccinium myrtillus* nicht vorhanden.



**Abbildung 149: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* auf den verschiedenen Clustern**

Der Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* nimmt mit zunehmender Beschattung zu (Abbildung 150). Im tiefen Schatten liegt der Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* zwischen null und zwei, im Schatten zwischen null und eins. Der Halbschatten zeigt drei Ausreißer auf und im vollsonnigen Bereich ist *Vaccinium myrtillus* nicht vertreten.



**Abbildung 150: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei zunehmender Beschattung**

Bei steigendem **pH-Wert** sinkt der Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* (Abbildung 151). Im extrem Sauren und sehr Sauren ist ein Deckungsgrad von null bis zwei, im mäßig Sauren nur mehr ein Deckungsgrad von null bis + vorzufinden. Im schwach Sauren bleibt *Vaccinium myrtillus* bis auf zwei Ausreißer ganz aus (Legende pH-Wert siehe Tabelle 3).

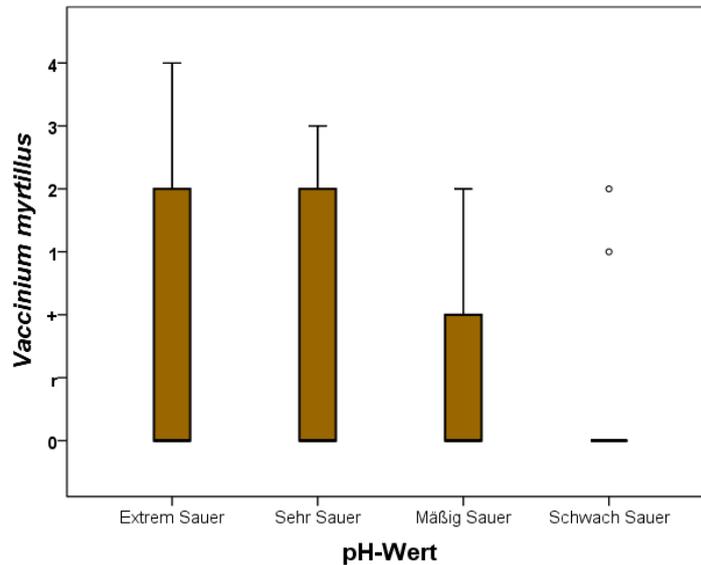


Abbildung 151: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem pH-Wert

Bei steigendem **Mangan-Gesamtgehalt** zeigen die Ergebnisse ähnliche Deckungsgrade wie bei steigendem pH-Wert. Mit Zunahme des Mangan-Gesamtgehalts nimmt der Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* ab (Abbildung 152). Im Manganfreien und Manganarmen liegt der Deckungsgrad zwischen null und zwei, im mäßig Manganreichen lediglich zwischen null und +. Sehr manganreiche Standorte zeichnen sich durch ein Fehlen von *Vaccinium myrtillus* aus (Legende Mangan-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

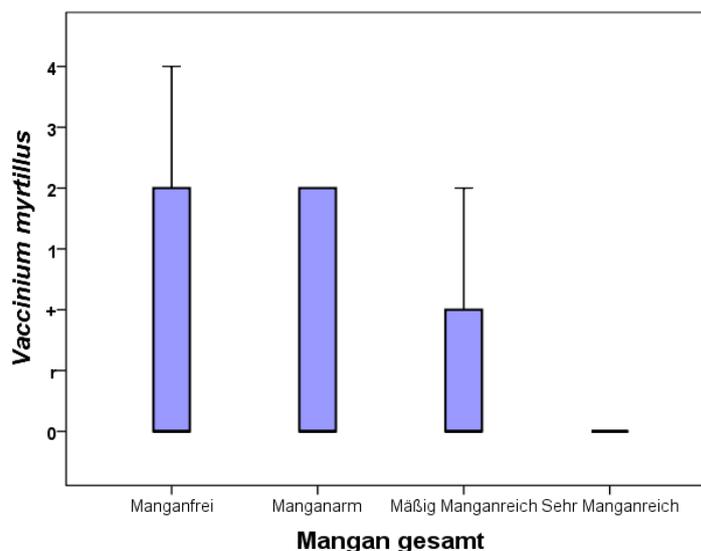


Abbildung 152: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]

*Vaccinium myrtillus* weist, bis auf Ausreißer, von manganfreien Bereichen bis in mäßig manganreiche Bereiche einen Deckungsgrad von null auf. Sehr manganreiche Standorte erreichen einen Deckungsgrad zwischen null und zwei mit einem Median bei r (Abbildung 153) (Legende **verfügbares Mangan** siehe Tabelle 3).

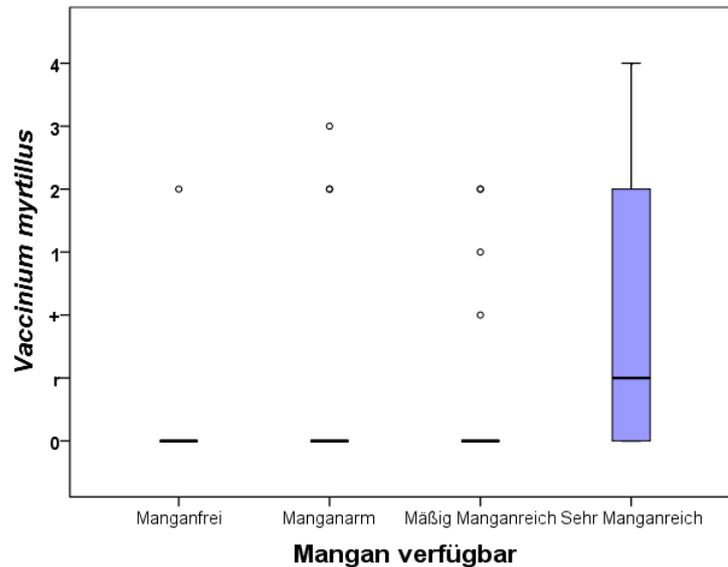


Abbildung 153: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

Den höchsten Deckungsgrad zwischen null und zwei (Median bei r) erreicht *Vaccinium myrtillus* im Eisenfreien. An eisenarmen und sehr eisenreichen Standorten liegt der Deckungsgrad bei null, *Vaccinium myrtillus* ist also nicht vorhanden. Die mäßig eisenreichen Bereiche weisen einen Deckungsgrad zwischen null und r auf (Median bei null), (Legende **Eisen-Gesamtgehalt** Tabelle 3).

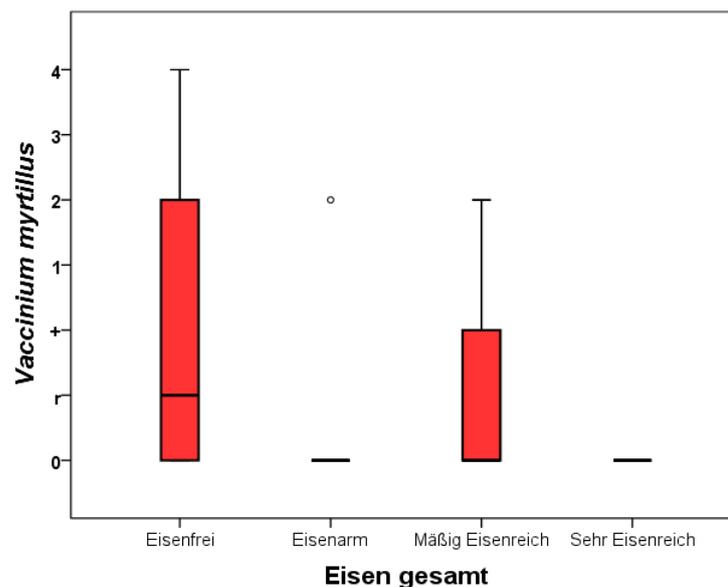


Abbildung 154: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Je höher das **verfügbare Eisen** [mg/kg] ist, desto höher wird der Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* (Abbildung 155). In eisenfreien und eisenarmen Bereichen liegt der Deckungsgrad bis auf Ausreißer bei null. Im mäßig Eisenreichen ergibt der Deckungsgrad null bis + mit einem Median bei null. Den höchsten Deckungsgrad zwischen null und zwei (Median bei null) findet man bei einer sehr hohen Eisen-Verfügbarkeit („sehr eisenreich“) (Legende verfügbares Eisen Tabelle 3).

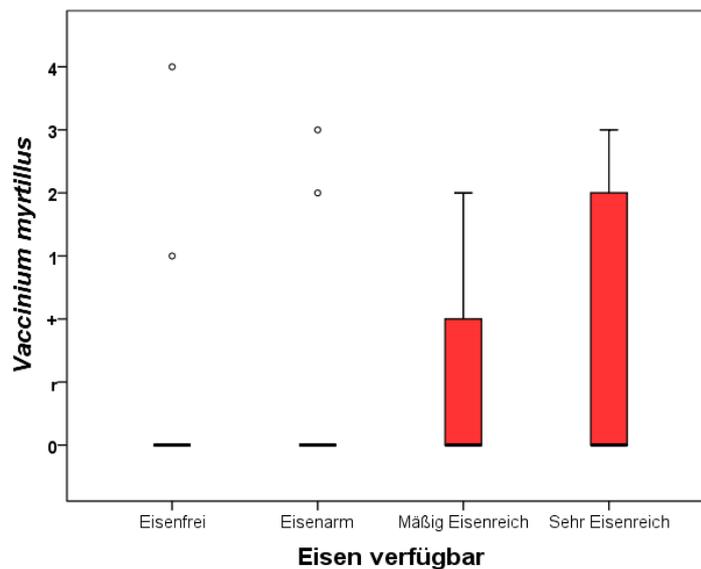


Abbildung 155: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

In Abbildung 156 weisen die kupferfreien Bereiche einen Deckungsgrad zwischen null und eins (Median bei null) auf. Die Deckungsgrade kupferarmer und mäßig kupferreicher Standorte liegen zwischen null und zwei (Median bei null). Auf sehr kupferreichen Messpunkten kommt *Vaccinium myrtillus* nicht vor (Deckungsgrad bei null) (Legende **Kupfer-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

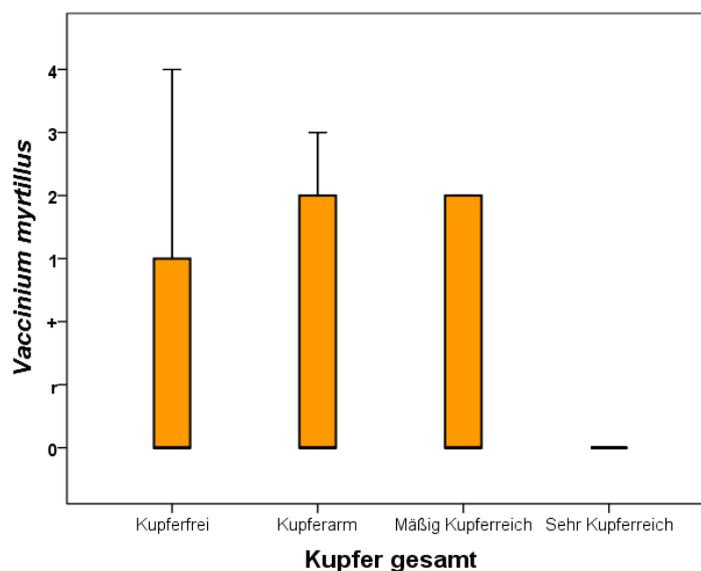


Abbildung 156: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

Die kupferfreien Bereiche zeigen den höchsten Deckungsgrad von null bis eins (Median bei null) auf, gefolgt von mäßig kupferreichen Standorten mit einem Deckungsgrad von null bis + (Median bei null). Bei kupferarmen und sehr kupferreichen Messpunkten sind zwar einige Ausreißer vorhanden, der Deckungsgrad liegt jedoch bei null (Abbildung 157) (Legende **verfügbares Kupfer** siehe Tabelle 3).

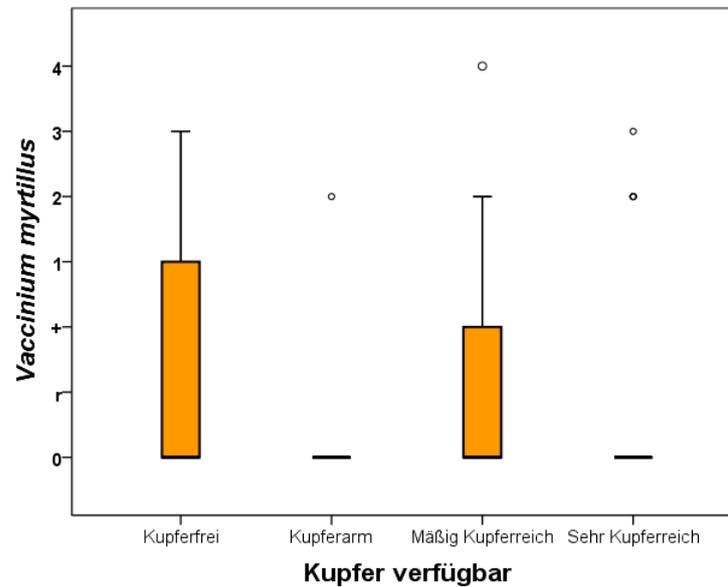


Abbildung 157: Deckungsgrad von *Vaccinium myrtillus* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]

Das Auftreten von *Vaccinium myrtillus* korreliert mit dem Vorkommen von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=0,29^*$ ), *Oxalis acetosella* ( $R^2=0,30^*$ ), *Rumex acetosella* ( $R^2=-0,31^*$ ), *Melampyrum pratense* ( $R^2=0,42^{**}$ ) und *Orthotrichum anomalum* ( $R^2=0,30^*$ ), siehe Tabelle 25.

*Vaccinium myrtillus* kommt in den beiden nach ihm benannten Clustern im Schatten bis tiefen Schatten im Wald vor. Typisch für einen Säurezeiger verschwindet diese Art mit steigendem pH-Wert, ein ähnliches Verhalten zeigt *Vaccinium myrtillus* auch bei zunehmendem Mangan-Gesamtgehalt. Diese Art meidet sowohl Bereiche mit hohen Eisen-Gesamtgehalten als auch Bereiche mit hohen Kupfer-Gesamtgehalten, bevorzugt aber eine hohe Eisen-Verfügbarkeit. *Vaccinium myrtillus* ist eher an Messpunkten mit geringer Kupfer-Verfügbarkeit aufzufinden.

### **Hypnum cupressiforme (Zypressen Schlafmoos)**

*Hypnum cupressiforme* (Abbildung 158) gehört zu den Bryopsida (Laubmoose). Es ist ein Rasen bildendes, kräftig gelb grünes Moos mit stark sichelförmig einseits-wendigen Blättern. Besonders auf Stein und morschem Holz vorkommend weist *Hypnum cupressiforme* eine kosmopolitische Verbreitung auf (Frahm & Frey, 2004). Ricek (1994) beschreibt das Zypressen Schlafmoos als eine euröke gesellschaftsvage, etwas acidophile Art.



**Abbildung 158: *Hypnum cupressiforme* (Quelle: <http://www.bildatlas-moose.de>, 15.10.2012) Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.**

Die Karte in Abbildung 159 zeigt die Verteilung von *Hypnum cupressiforme* über das Untersuchungsgebiet, die Messpunkte, auf denen dieses Moos auftritt sind grün eingefärbt.

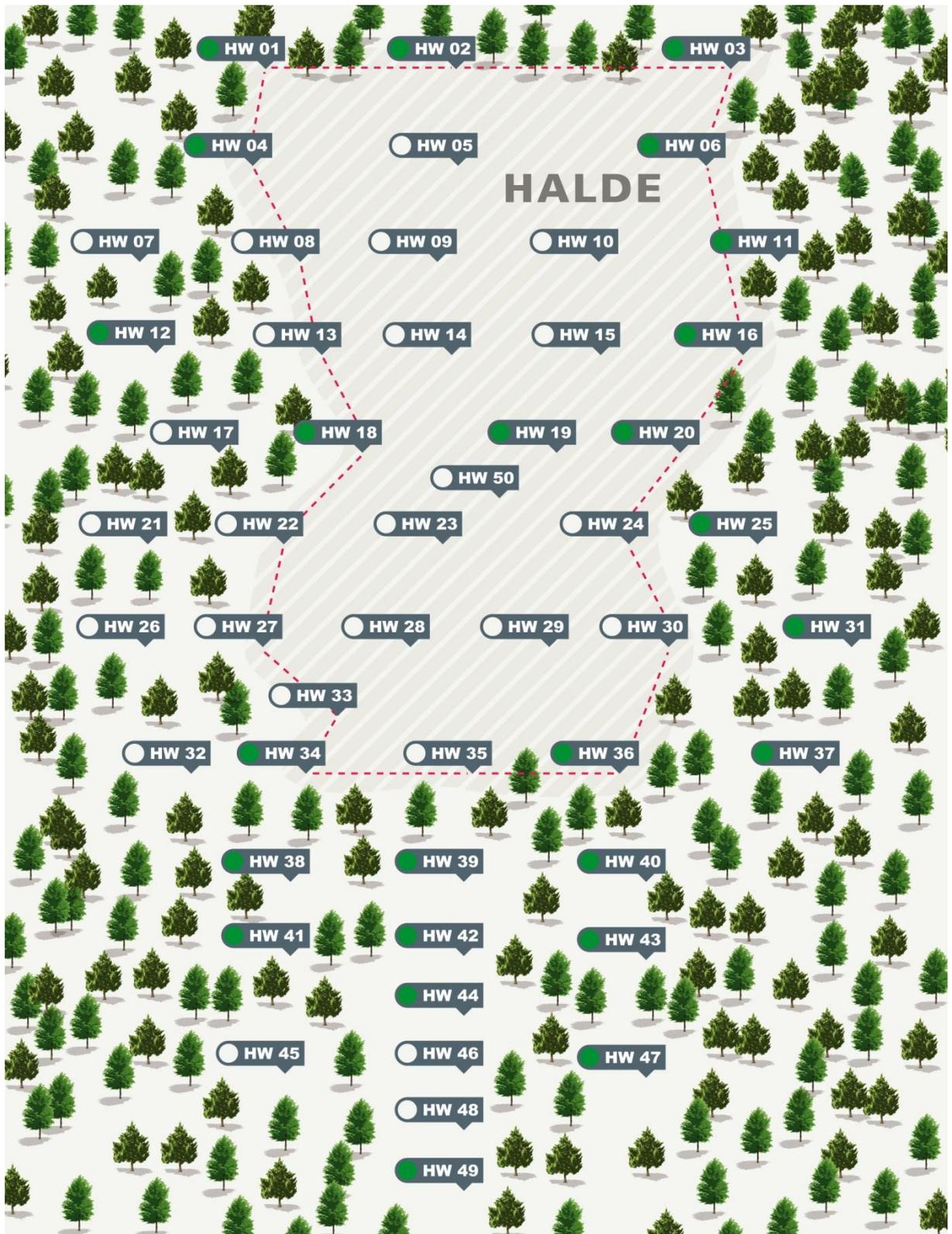


Abbildung 159: Vorkommen von *Hypnum cupressiforme* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)

*Hypnum cupressiforme* kommt im Cluster *Wald (Vaccinium myrtillus)* mit einem Deckungsgrad von null bis eins (Median bei null) vor. Im Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* liegt der Deckungsgrad zwischen null und zwei mit einem Median bei +. Im *Wald (Avenella und Vaccinium)* liegt der Deckungsgrad bei eins (Abbildung 160).

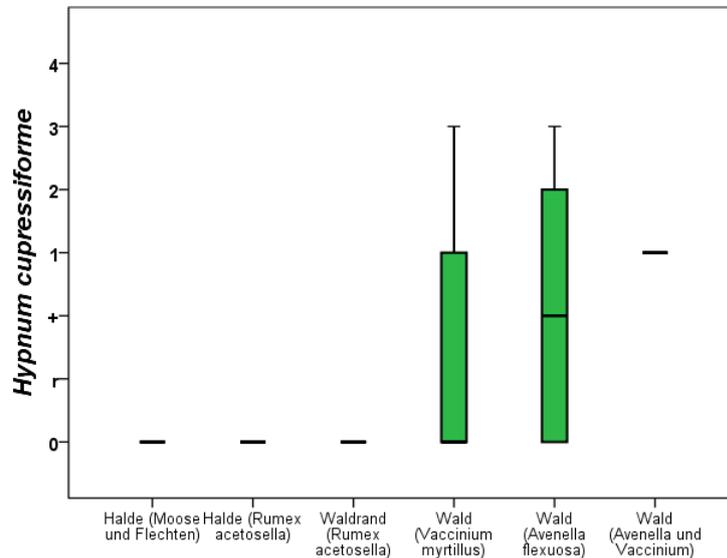


Abbildung 160: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* auf den verschiedenen Clustern

*Hypnum cupressiforme* hat seinen höchsten Deckungsgrad von eins (Median) im Schatten. Im tiefen Schatten liegt der Deckungsgrad bei + (Median). Der Deckungsgrad (null bis eins) im Halbschatten hat einen Median von null und im vollsonnigen Bereich kommt *Hypnum cupressiforme* nicht vor (Abbildung 161).

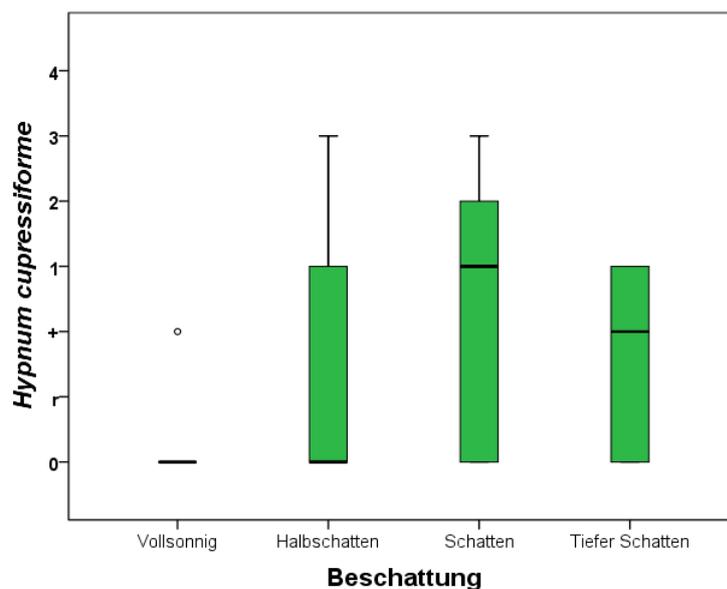


Abbildung 161: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei zunehmender Beschattung

Mit steigendem **pH-Wert** sinkt der Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* (Abbildung 162). Im extrem Sauren liegt der Deckungsgrad bei eins, sinkt im sehr Sauren auf +, im mäßig Sauren auf r und schließlich im schwach Sauren mit einigen Ausreißern auf null (Legende pH-Wert siehe Tabelle 3).

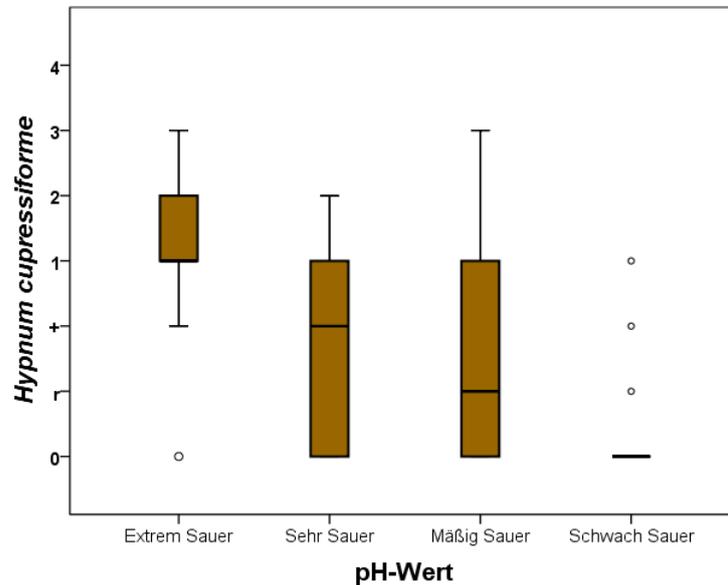


Abbildung 162: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem pH-Wert

Im Manganfreien und mäßig Manganreichen erreicht *Hypnum cupressiforme* seinen höchsten Deckungsgrad von eins (Median). Der Deckungsgrad im manganarmen Bereich liegt zwischen null und + mit einem Median bei null. Auf den sehr manganreichen Standorten ist *Hypnum cupressiforme* mit Ausnahme zweier Ausreißer nicht vertreten (Abbildung 163) (Legende **Mangan-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

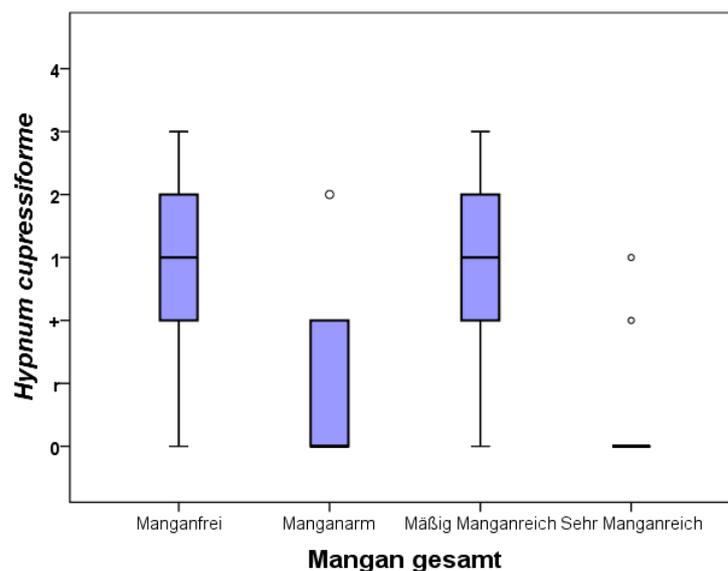


Abbildung 163: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]

Der Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* nimmt mit steigendem **verfügbarem Mangan** zu. Im Manganfreien liegt der Deckungsgrad bei null. Der Deckungsgrad in manganarmen Bereichen liegt zwischen null und eins mit einem Median bei null. Mäßig manganreiche Standorte erreichen einen Deckungsgrad zwischen r und eins (Median bei eins). Sehr manganreiche Messpunkte weisen einen Deckungsgrad zwischen null und eins mit einem Median bei + auf (Abbildung 164) (Legende verfügbares Mangan siehe Tabelle 3).

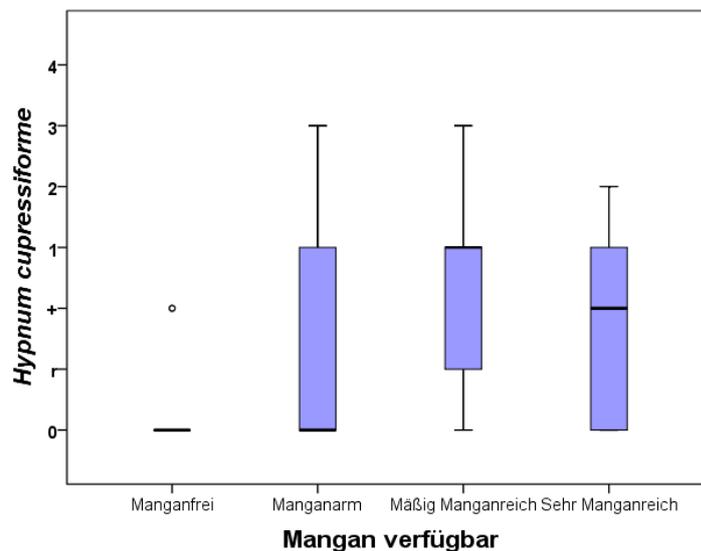


Abbildung 164: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

Mit eins weist *Hypnum cupressiforme* seinen höchsten Deckungsgrad auf mäßig eisenreichen Standorten auf. Die eisenfreien und eisenarmen Bereiche kommen auf einen Deckungsgrad von + (Median). Auf sehr eisenreichen Standorten liegt der Deckungsgrad bei null (Abbildung 165) (Legende **Eisen-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

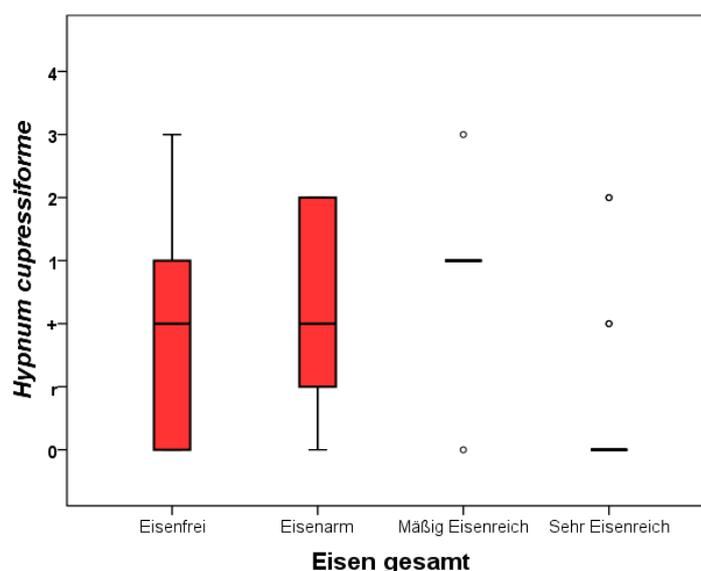


Abbildung 165: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Beim **verfügbaren Eisen** [mg/kg] ist ein Anstieg des Deckungsgrades mit einem Anstieg des verfügbaren Eisens zu verzeichnen (Abbildung 166). Im Eisenfreien liegt der Deckungsgrad bei null, steigt im Eisenarmen auf r, im mäßig Eisenreichen auf + und bei einer sehr hohen Eisen-Verfügbarkeit [mg/kg] erreicht der Deckungsgrad eins (alle Werte sind die Mediane).

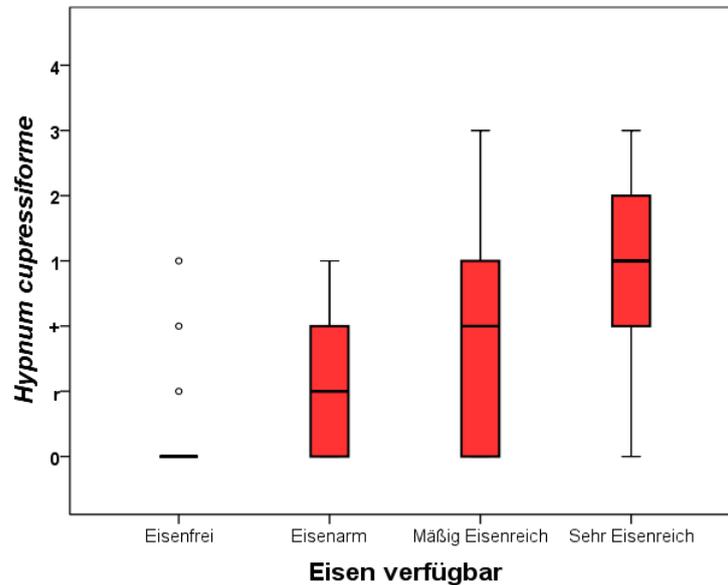


Abbildung 166: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

Mit steigendem **Kupfer-Gesamtgehalt** sinkt der Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* (Abbildung 167). Im Kupferfreien liegt der Deckungsgrad bei eins, im Kupferarmen ist er mit + bis zwei etwas höher. An mäßig kupferreichen Standorten sinkt der Deckungsgrad auf null bis r und in sehr kupferreichen Bereichen ist der Deckungsgrad gleich null (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

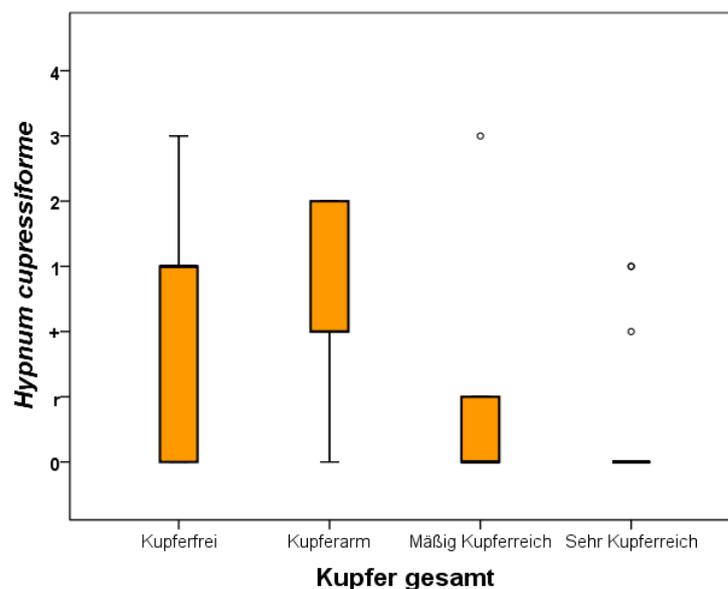
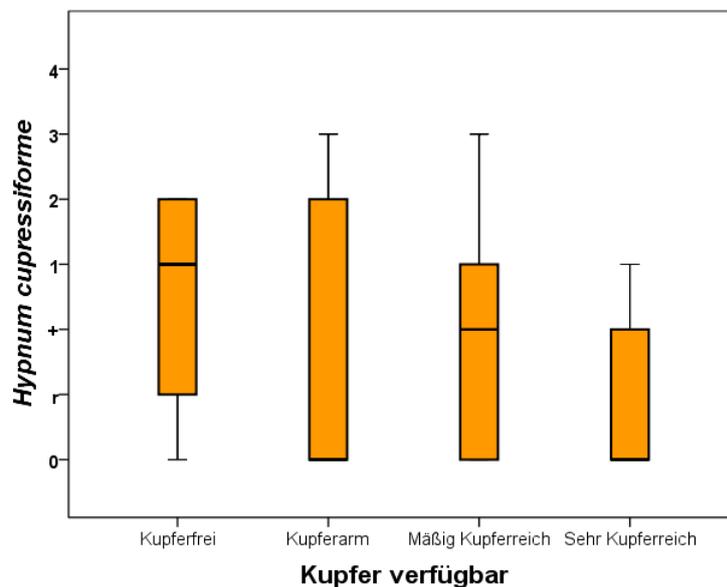


Abbildung 167: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

Abbildung 168 zeigt, dass mit eins (Median) der höchste Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei geringster **Verfügbarkeit des Kupfers** in [mg/kg] auftritt. Im kupferarmen Bereich liegt der Deckungsgrad zwischen null und zwei mit einem Median bei null. Der Deckungsgrad im mäßig Kupferreichen erreicht + (Median) und sinkt im sehr Kupferreichen auf null bis + mit einem Median bei null (Legende verfügbares Kupfer siehe Tabelle 3).



**Abbildung 168: Deckungsgrad von *Hypnum cupressiforme* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]**

Das Vorkommen von *Hypnum cupressiforme* korreliert mit dem Auftreten von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=0,38^{**}$ ), *Rumex acetosella* ( $R^2=-0,45^{**}$ ), *Avenella flexuosa* ( $R^2=0,32^*$ ), *Dicranum scoparium* ( $R^2=0,52^{**}$ ), *Pohlia sp.* ( $R^2=-0,31^*$ ), *Cladonia digitata* ( $R^2=0,32^*$ ), siehe Tabelle 26.

*Hypnum cupressiforme* ist im Wald im Schatten bis tiefen Schatten anzutreffen und verschwindet als acidophile Art mit steigendem pH-Wert. Mit steigender Eisen-Verfügbarkeit tritt *Hypnum cupressiforme* häufiger auf. Bezüglich Eisen-Gesamtgehalts tritt dieses Moos sowohl mit Ausreißern an eisenfreien als auch an sehr eisenreichen Standorten auf. Ähnlich verhält sich *Hypnum cupressiforme* beim Kupfer-Gesamtgehalt und der Kupfer-Verfügbarkeit, es ist von kupferfreien bis zu sehr kupferreichen Standorten und von einer sehr geringen Verfügbarkeit bis zu einer sehr hohen Verfügbarkeit vertreten.

**Pohlia sp.**

*Pohlia sp.* gehört zu den Bryopsida. Die Blätter sind eiförmig bis lanzettlich und besitzen keinen Blattsaum (Frahm & Frey, 2004). Die aufgrund der fehlenden Sporophyten nicht weiter bestimmbare *Pohlia sp.* wurde zur näheren Beschreibung gewählt, da sie auf den extremen Standorten direkt auf der Halde vorkommt.



**Abbildung 169: *Pohlia sp.* auf der Halde (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig)**

Abbildung 170 zeigt das Vorkommen der *Pohlia*-Arten auf den Messpunkten des Untersuchungsgebietes.

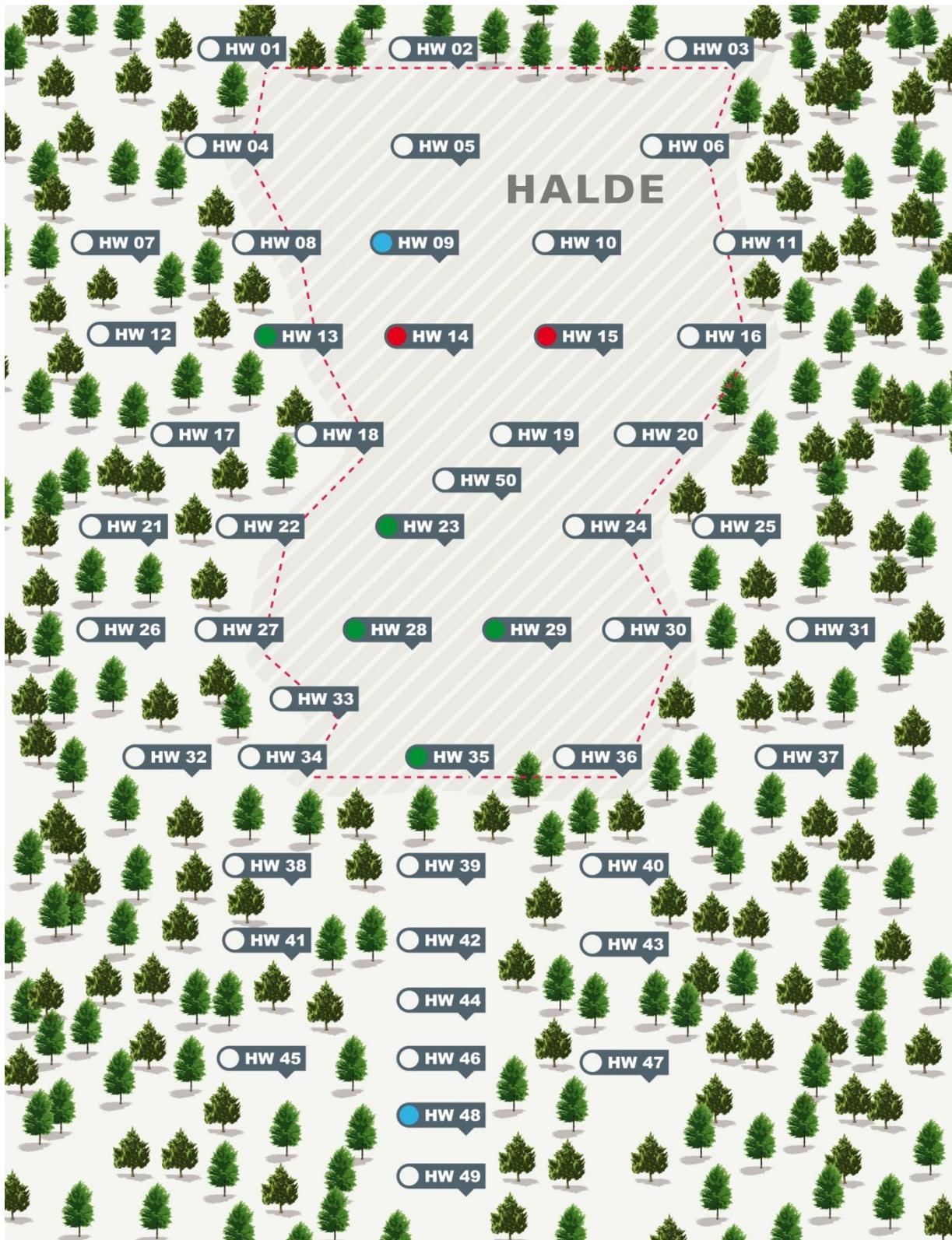


Abbildung 170: Vorkommen von *Pohlia sp.* (grün), *Pohlia drummondii* (blau) und *Pohlia lutescens* (rot) auf den Messpunkten, *Pohlia nutans* wurde nur auf HW 9 gefunden

*Pohlia sp.* erreicht ihre höchsten Deckungsgrade (null bis +) in den beiden Clustern auf der *Halde*. Am *Waldrand* liegt der Deckungsgrad zwischen null und r. In den Clustern im *Wald* ist *Pohlia sp.* nicht vertreten (Abbildung 171).

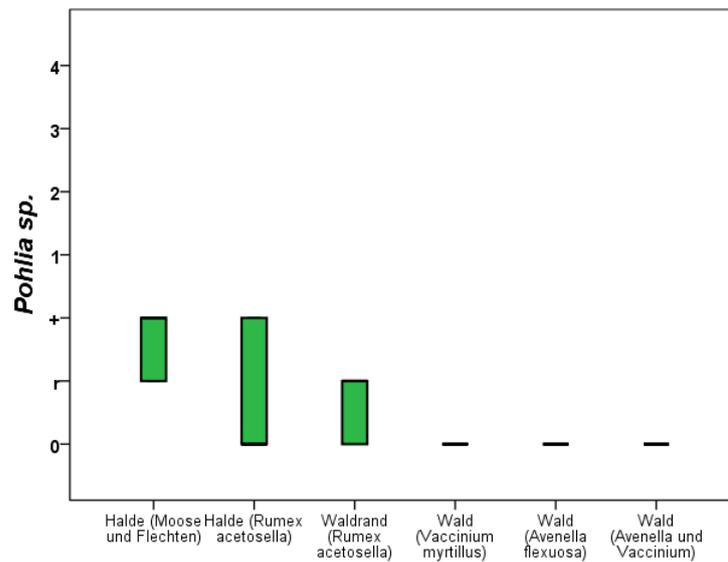


Abbildung 171: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* auf den verschiedenen Clustern

Ein eindeutiges Ergebnis liefert der Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei zunehmender Beschattung (Abbildung 172). Nur im vollsonnigen Bereich erreicht *Pohlia sp.* einen Deckungsgrad zwischen null und +. Mit zunehmender Beschattung verschwindet *Pohlia sp.* aus der Vegetation.

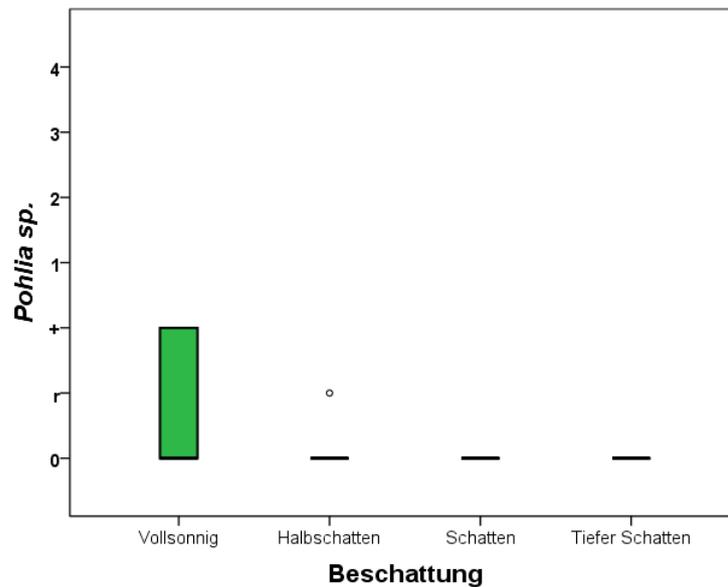


Abbildung 172: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei zunehmender Beschattung

Wie in Abbildung 173 dargestellt tritt *Pohlia sp.* nur in schwach sauren Bereichen mit einem Deckungsgrad zwischen null und r auf (Legende **pH-Wert** siehe Tabelle 3).

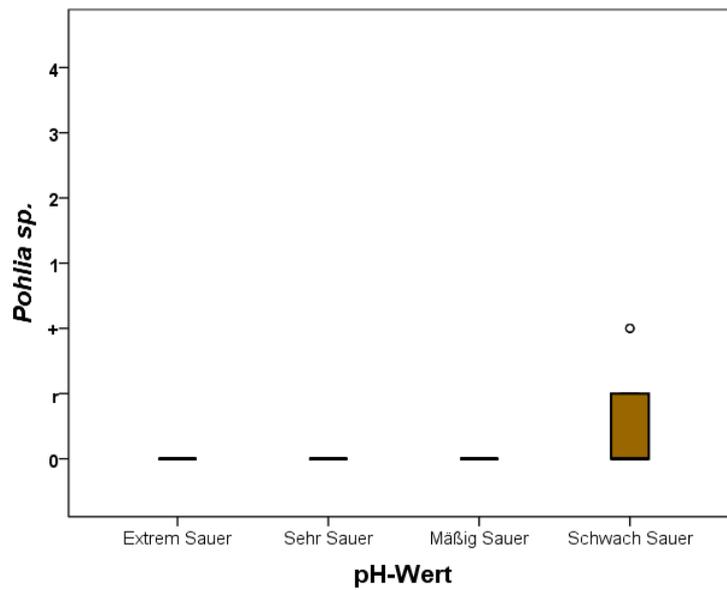


Abbildung 173: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem pH-Wert

*Pohlia sp.* ist nur auf sehr manganreichen Standorten mit einem Deckungsgrad zwischen null und r zu finden (Abbildung 174) (Legende **Mangan-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

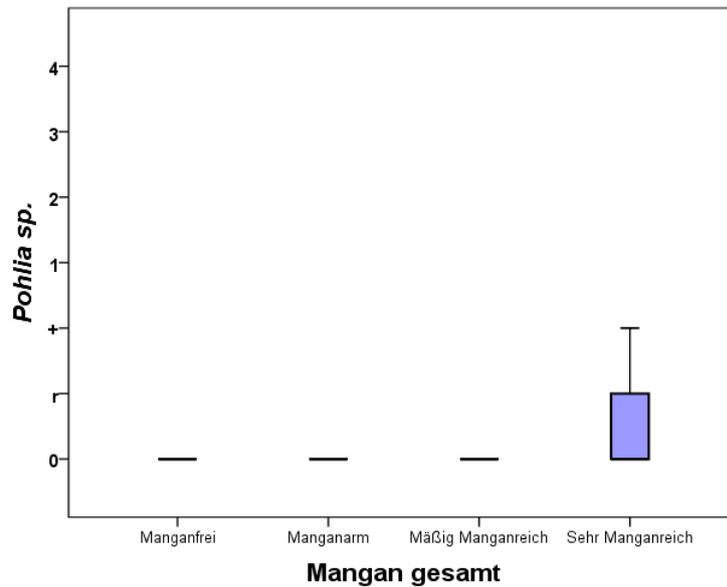


Abbildung 174: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]

Bei steigendem **verfügbarem Mangan** [mg/kg] kommt *Pohlia sp.* nur an manganarmen Standorten mit einem Deckungsgrad von null bis r (Median bei null) vor. Ein Ausreißer liegt im manganfreien Bereich. Auf mäßig manganreichen und sehr manganreichen Messpunkten ist *Pohlia sp.* nicht vertreten (Abbildung 175) (Legende verfügbares Mangan siehe Tabelle 3).

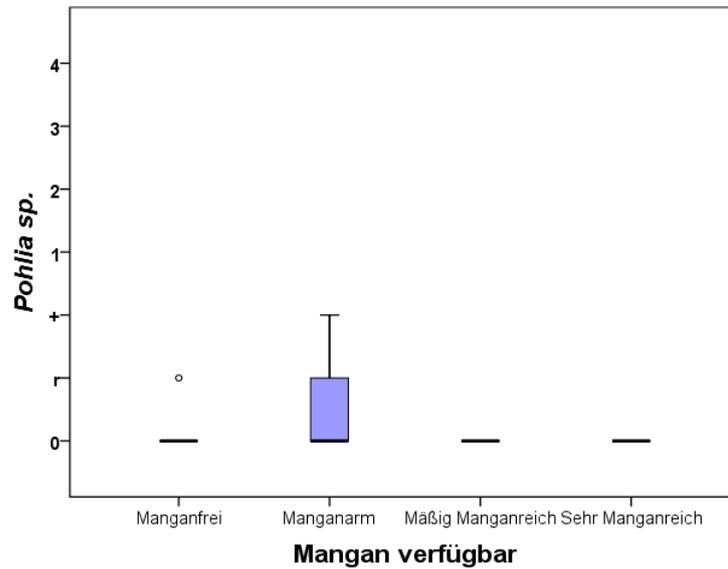


Abbildung 175: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

Bei steigendem **Gesamtgehalt an Eisen** [mg/kg] tritt *Pohlia sp.* nur auf sehr eisenreichen Standorten mit einem Deckungsgrad von null bis r auf (Abbildung 176) (Legende Eisen-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

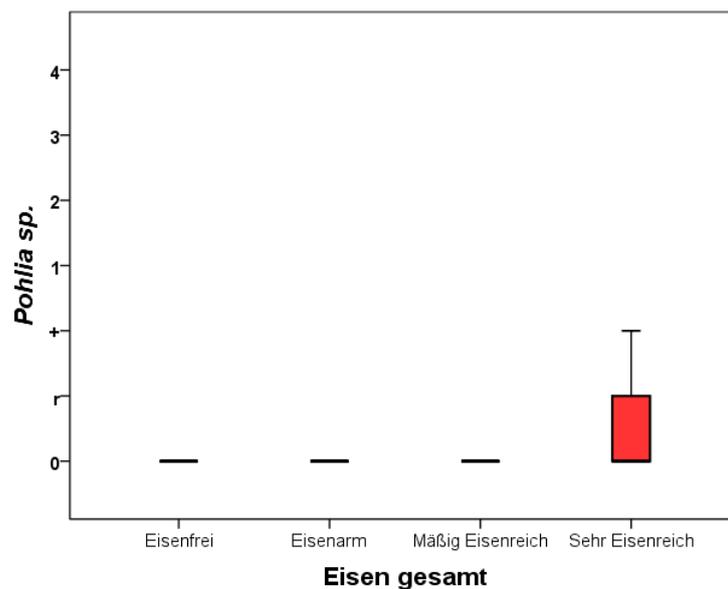


Abbildung 176: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

*Pohlia sp.* ist nur auf Standorten mit geringer **Verfügbarkeit an Eisen** [mg/kg] vorhanden. Auf eisenfreien Standorten liegt der Deckungsgrad bei r und +. Auf eisenarmen Messpunkten erreicht der Deckungsgrad + (Abbildung 177) (Legende verfügbares Eisen siehe Tabelle 3).

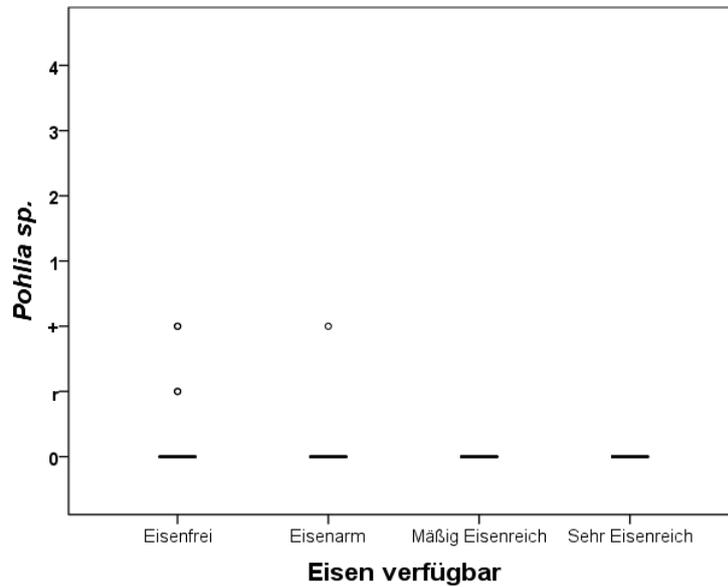


Abbildung 177: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

*Pohlia sp.* ist nur auf sehr kupferreichen Standorten mit einem Deckungsgrad von null bis r vorhanden (Abbildung 178) (Legende **Kupfer-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

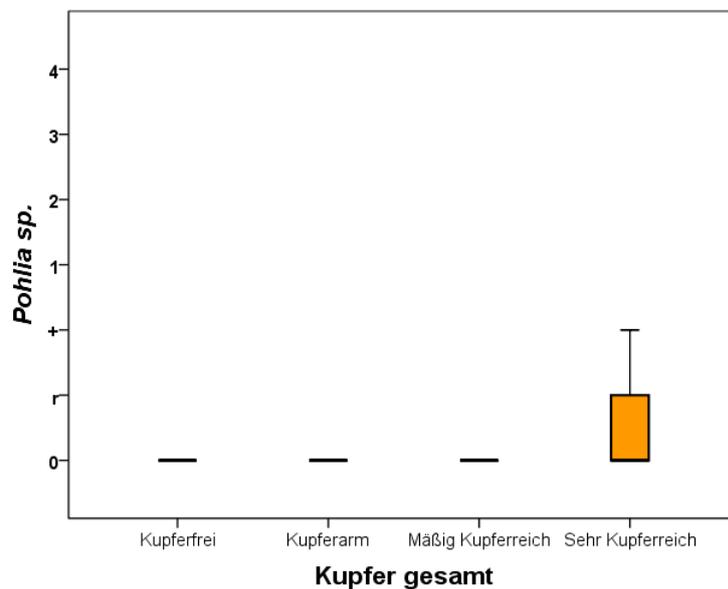


Abbildung 178: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

*Pohlia sp.* hat bei sehr hoher **Kupfer-Verfügbarkeit** [mg/kg] ihren höchsten Deckungsgrad zwischen null und r (Median bei null). An kupferfreien, kupferarmen und mäßig kupferreichen Standorten kommt dieses Moos nicht vor (Abbildung 179) (Legende verfügbares Kupfer siehe Tabelle 3).

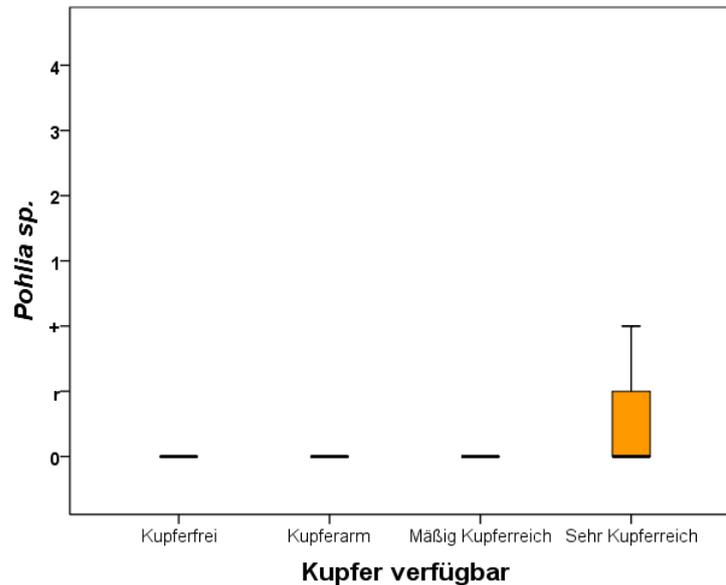


Abbildung 179: Deckungsgrad von *Pohlia sp.* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]

Das Auftreten von *Pohlia sp.* korreliert mit dem Vorkommen von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=-0,43^{**}$ ), *Avenella flexuosa* ( $R^2=-0,36^*$ ), *Hypnum cupressiforme* ( $R^2=-0,31^*$ ), *Dicranum scoparium* ( $R^2=-0,30^*$ ), *Porpidia macrocarpa* ( $R^2=0,32^*$ ) und *Trapelia coarctata* ( $R^2=0,45^{**}$ ), siehe Tabelle 26.

*Pohlia sp.* ist nur an vollsonnigen, schwach sauren Messpunkten mit einem sehr hohen Gesamtgehalt an Mangan, Eisen, und Kupfer, also nur direkt auf der Halde zu finden.

### **Cladonia cervicornis (Etagen-Becherflechte)**

Wirth & Düll (2000) beschreiben diese Flechte als graubraune bis olivgraue glatt berindete Becherflechte, aus deren Bechermitte stockwerkartig neue Becher sprossen.

Ihre Verbreitung liegt in Silikat-Magerrasen und Zwergstrauch-Heiden, im Bereich von felsigen Blößen und in Sandfluren in nahezu ganz Europa (Wirth & Düll, 2000). Optimal sind sonnige, niederschlagsreiche Stellen mit oft wechselnden Feuchtebedingungen (Wirth, 1995).

Die Karte in Abbildung 180 zeigt das Vorkommen von *Cladonia cervicornis* auf den Messpunkten des Untersuchungsgebiets.

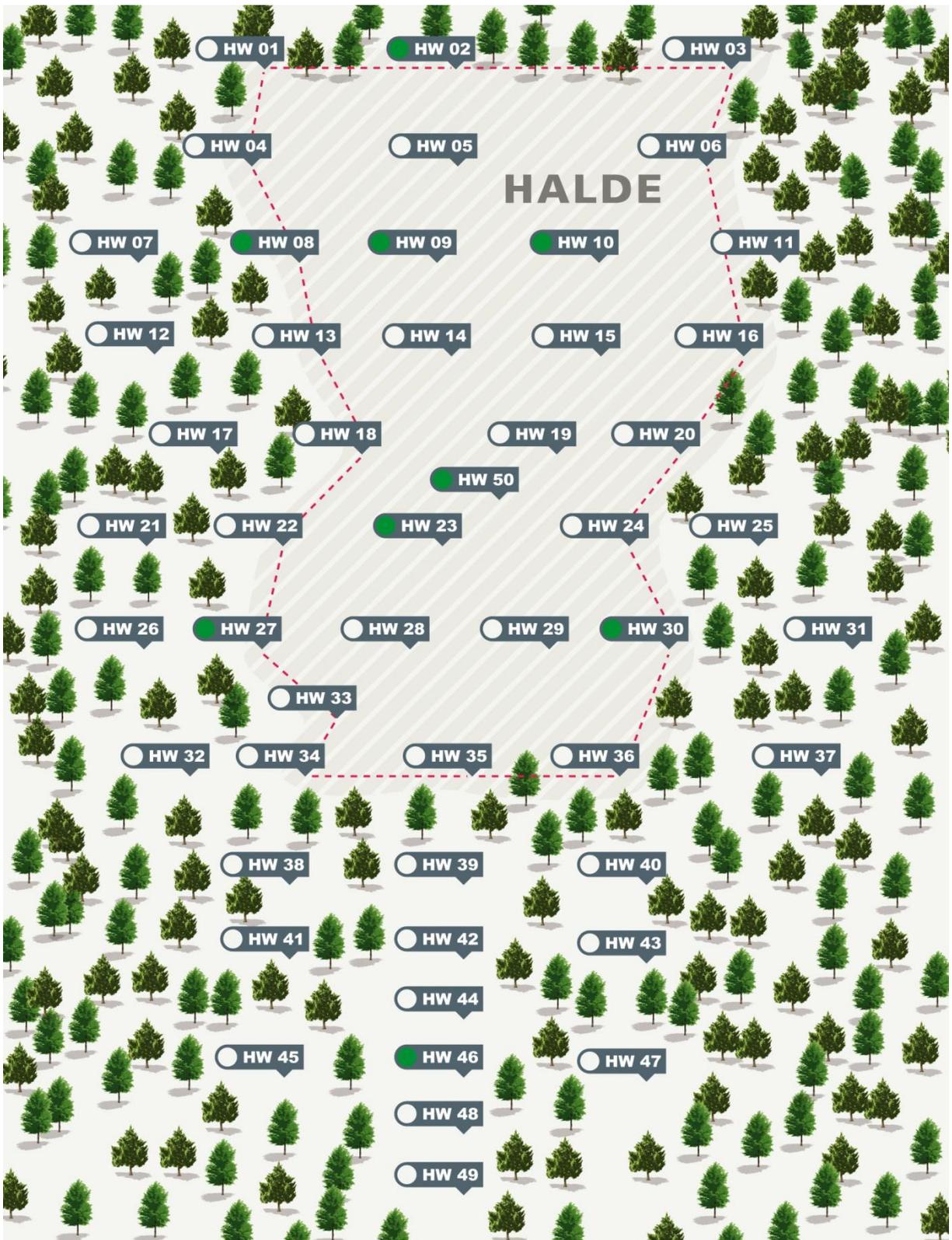


Abbildung 180: Vorkommen von *Cladonia cervicornis* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)

Den Ergebnissen in Abbildung 181 ist zu entnehmen, dass *Cladonia cervicornis* den höchsten Deckungsgrad von + (Median) im Cluster *Halde (Rumex acetosella)* hat. Am *Waldrand (Rumex acetosella)* erreicht der Deckungsgrad r (Median). In den übrigen Clustern liegt der Deckungsgrad bei null.

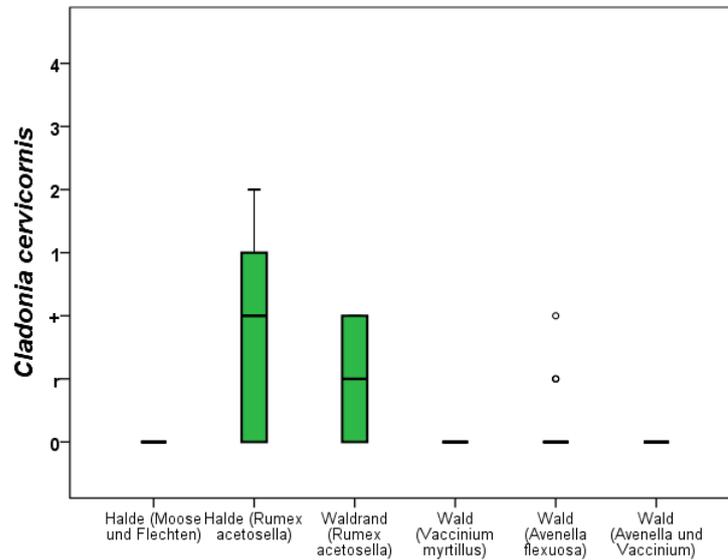


Abbildung 181: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* auf den verschiedenen Clustern

Bei *Cladonia cervicornis* ist ein Abnehmen des Deckungsgrades bei zunehmender Beschattung zu beobachten. Den höchsten Deckungsgrad von null bis + (Median bei null) erreicht *Cladonia cervicornis* auf den vollsonnigen Standorten. Im Halbschatten und Schatten sind vereinzelt Ausreißer zu finden und im tiefen Schatten fehlt diese Flechte (Abbildung 182).

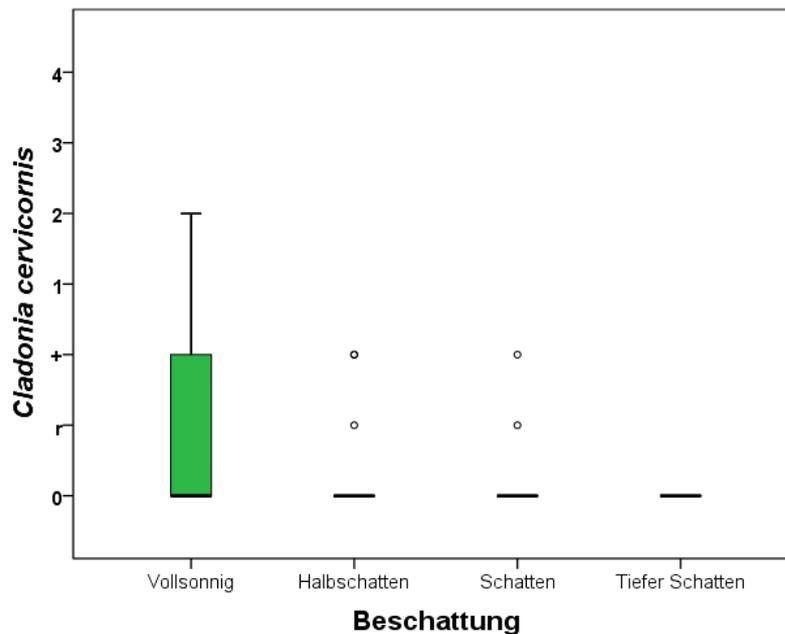


Abbildung 182: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei zunehmender Beschattung

Erst in mäßig sauren Bereichen tritt *Cladonia cervicornis* mit einem Deckungsgrad von null bis r auf. Auf schwach sauren Messpunkten erreicht *Cladonia cervicornis* einen Deckungsgrad von null bis + mit einem Ausreißer bei zwei (Abbildung 183) (Legende **pH-Wert** siehe Tabelle 3).

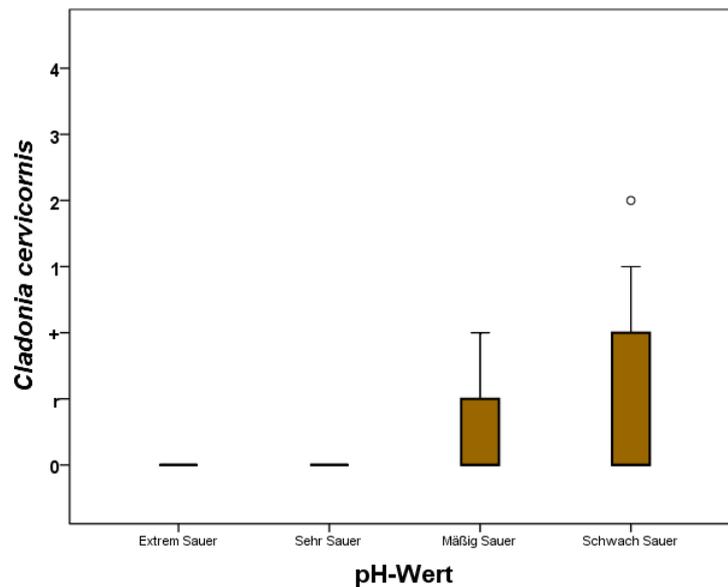


Abbildung 183: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem pH-Wert

Ein Auftreten von *Cladonia cervicornis* ist erst in mäßig manganreichen Bereichen mit einem Deckungsgrad zwischen r und + zu beobachten. Auf sehr manganreichen Messpunkten liegt der Deckungsgrad bei null bis +. Auf manganfreien und manganarmen Standorten kommt *Cladonia cervicornis* nicht vor (Abbildung 184) (Legende **Mangan-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

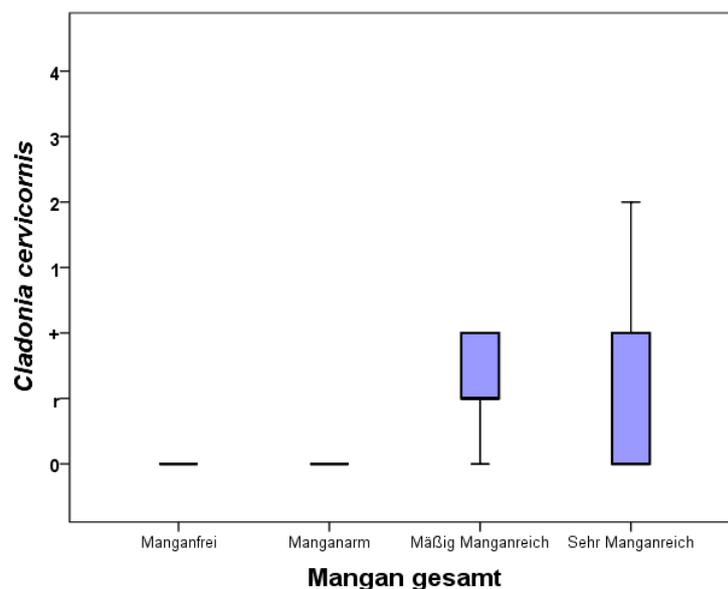


Abbildung 184: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]

Den höchsten Deckungsgrad von null bis r (Median bei null) erreicht *Cladonia cervicornis* an manganarmen Standorten. Auf manganfreien und mäßig manganreichen Messpunkten liegen Ausreißer bei + und r. Auf sehr manganreichen Messpunkten erreicht ein Ausreißer einen Deckungsgrad von eins (Abbildung 185) (Legende **verfügbares Mangan** siehe Tabelle 3).

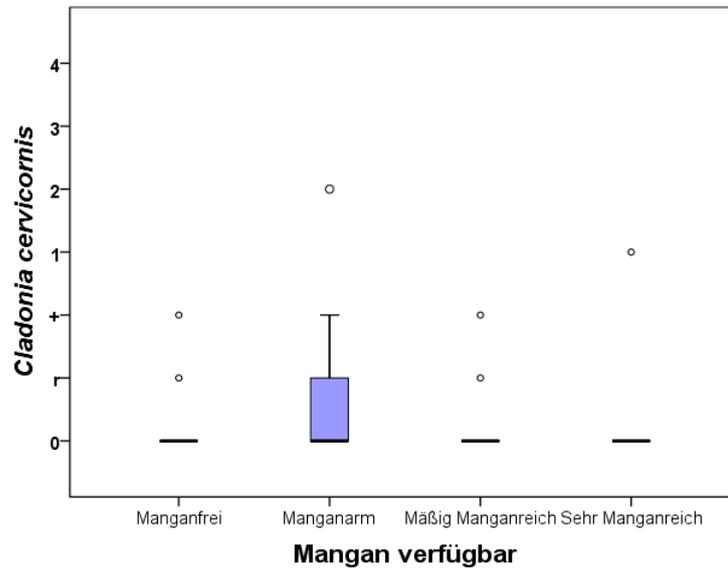


Abbildung 185: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

*Cladonia cervicornis* erreicht an sehr eisenreichen Standorten mit einem Ausreißer bei zwei einen Deckungsgrad zwischen null und r (Median bei null). Bei geringerem Gesamtgehalt an Eisen liegt der Deckungsgrad bis auf Ausreißer bei null (Abbildung 176) (Legende **Eisen Gesamtgehalt** Tabelle 3).

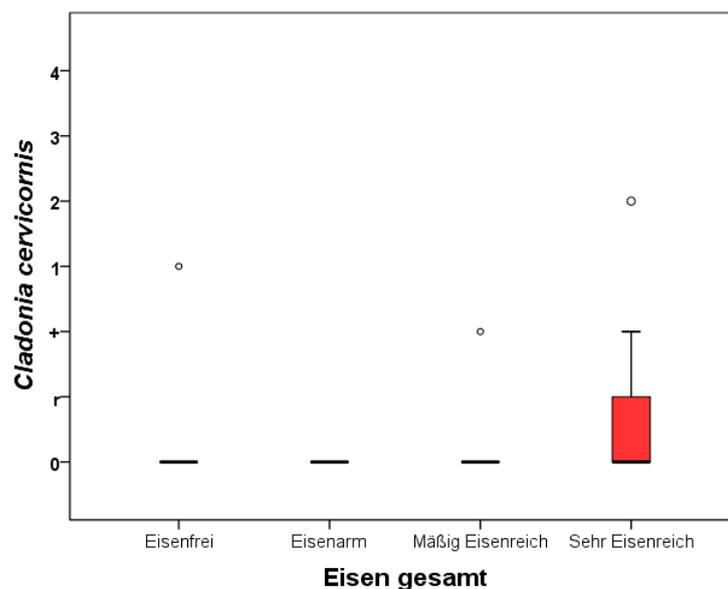


Abbildung 186: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Mit zunehmendem **verfügbarem Eisen** [mg/kg] nimmt der Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* ab. Den höchsten Deckungsgrad zwischen null und r mit einem Ausreißer bei zwei erreicht *Cladonia cervicornis* bei der geringsten Verfügbarkeit an Eisen. An eisenarmen Standorten kommen die Ausreißer auf einen Deckungsgrad von r und eins. Im mäßig eisenreichen Bereich sinkt der Deckungsgrad auf null bis r (Median bei null). Auf sehr eisenreichen Messpunkten liegt der Deckungsgrad bei null (Abbildung 187) (Legende verfügbares Eisen siehe Tabelle 3).

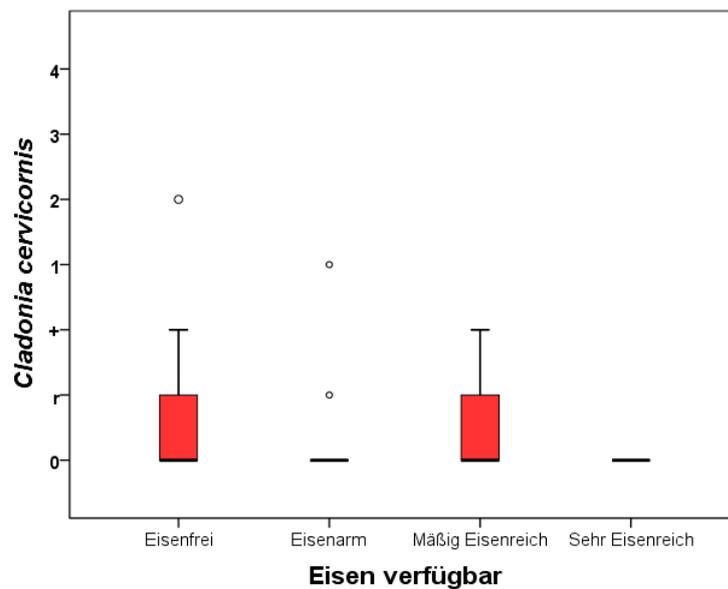


Abbildung 187: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

Auf kupferfreien und kupferarmen Standorten ist *Cladonia cervicornis* nicht vorhanden. Auf mäßig kupferreichen und sehr kupferreichen Messpunkten hingegen kommt sie mit einem Deckungsgrad von null bis + vor (Abbildung 188) (Legende **Kupfer-Gesamtgehalt** Tabelle 3).

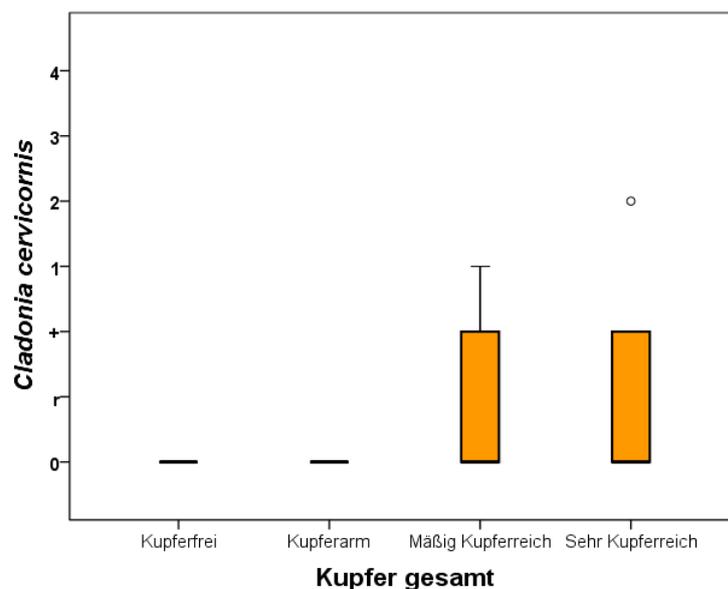
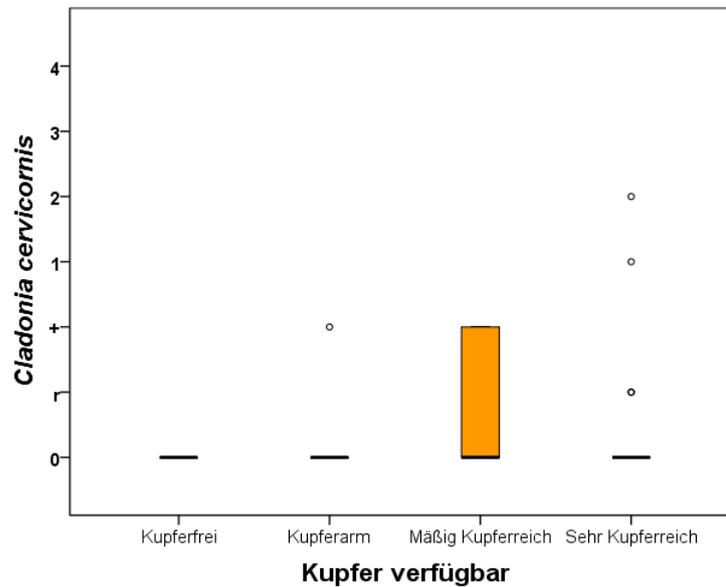


Abbildung 188: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

Ähnlich dem Kupfer-Gesamtgehalt weist *Cladonia cervicornis* bei geringer **Verfügbarkeit an Kupfer** [mg/kg], im kupferfreien und kupferarmen Bereich, einen Deckungsgrad von null auf. An mäßig kupferreichen Standorten liegt der Deckungsgrad zwischen null und + (Median bei null). Auf sehr kupferreichen Messpunkten kommen die Ausreißer auf einen Deckungsgrad von null bis zwei (Abbildung 189) (Legende verfügbares Kupfer Tabelle 3).



**Abbildung 189: Deckungsgrad von *Cladonia cervicornis* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]**

Das Auftreten von *Cladonia cervicornis* korreliert mit dem Vorhandensein von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=-0,60^{**}$ ), *Pinus sylvestris* (Strauchschicht) ( $R^2=0,31^*$ ), *Larix decidua* (Strauchschicht) ( $R^2=0,47^{**}$ ), *Rumex acetosella* ( $R^2=0,41^{**}$ ), *Hypnum cupressiforme* ( $R^2=-0,29^*$ ), *Pohlia nutans* ( $R^2=0,35^*$ ), *Cynodontium polycarpum* ( $R^2=0,31^*$ ), *Cladonia arbuscula* ( $R^2=0,31^*$ ) und *Cladonia pyxidata* ( $R^2=0,54^{**}$ ), siehe Tabelle 26.

*Cladonia cervicornis* tritt in den vollsonnigen bis halbschattigen Clustern mit *Rumex acetosella* im mäßig bis schwach sauren Bereich auf. Die Anwesenheit von *Cladonia cervicornis* beschränkt sich auf die mäßig bis sehr manganreichen und mäßig bis sehr kupferreichen Standorte.

### ***Cladonia pyxidata* (Echte Becherflechte)**

Wirth & Düll (2000) beschreiben sie als graugrünliche bis graubraune Flechte mit regelmäßigen, breiten Bechern auf meist kurzem Stiel, der zumindest im unteren Bereich mit kleinen rundlichen Schollen bedeckt ist. Diese Flechte ist auf Erdboden, Humus, Holz bemoosten Felsen und an der bemoosten Basis von Bäumen in ganz Europa zu finden (Wirth & Düll, 2000).

Die Karte in Abbildung 190 zeigt das Vorkommen von *Cladonia pyxidata* auf den Messpunkten des Untersuchungsgebiets.

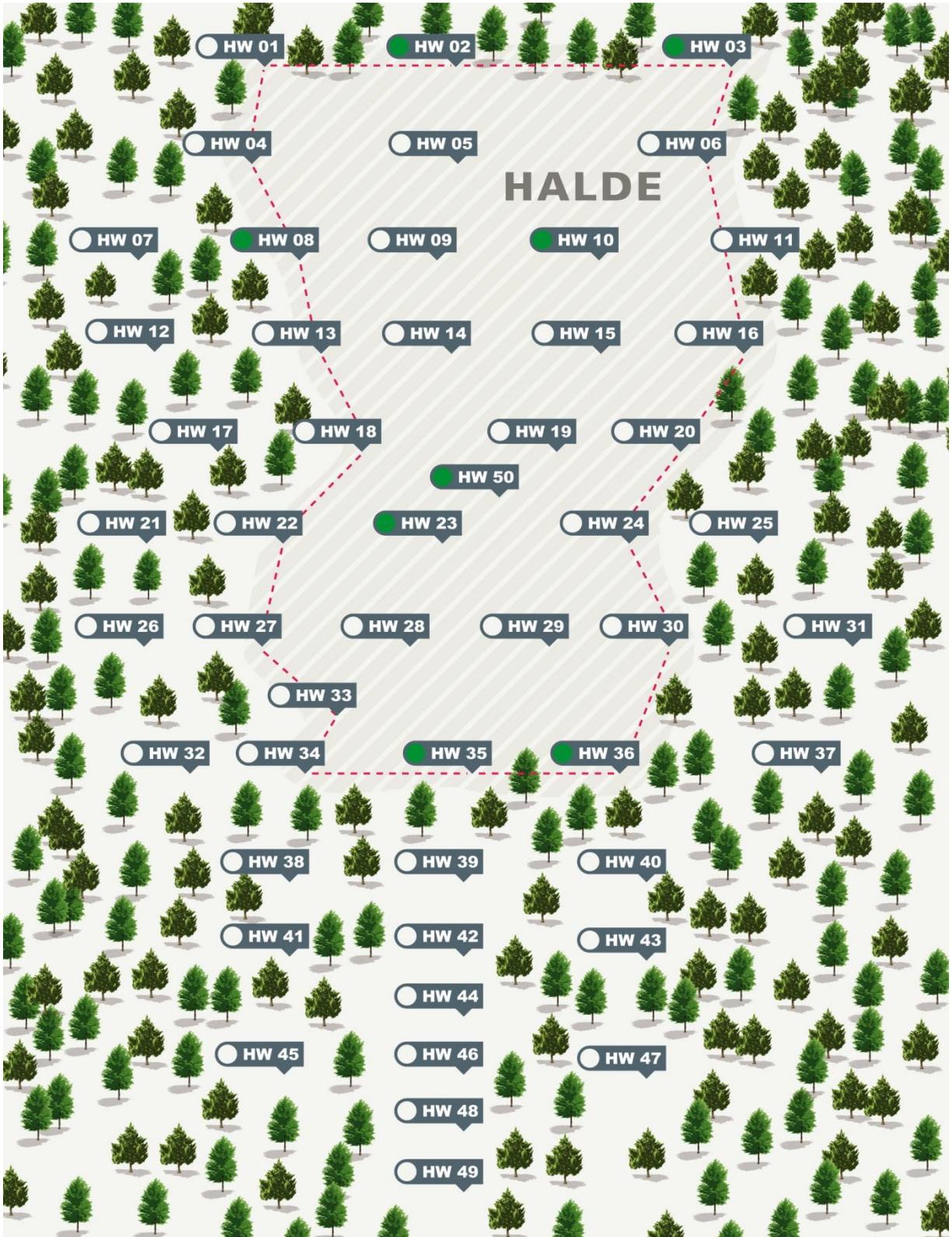
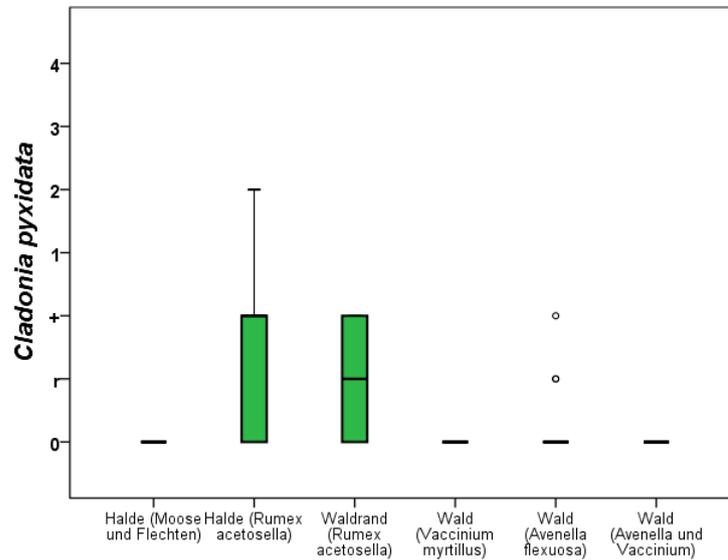


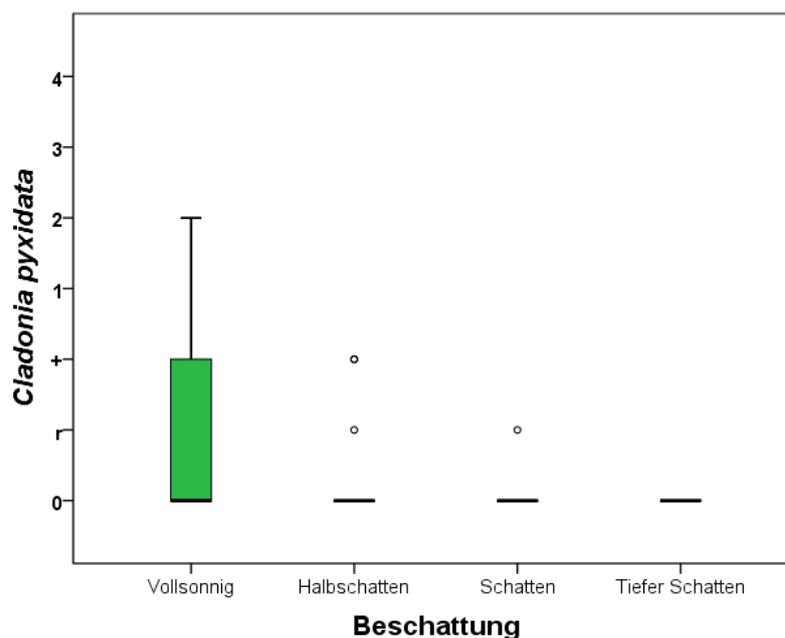
Abbildung 190: Vorkommen von *Cladonia pyxidata* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)

Den höchsten Deckungsgrad von + (Median) hat *Cladonia pyxidata* im Cluster *Halde (Rumex acetosella)*. Am *Waldrand (Rumex acetosella)* erreicht *Cladonia pyxidata* einen Deckungsgrad von null bis + mit einem Median bei r. In den übrigen Clustern liegt der Deckungsgrad bei null (Abbildung 191).



**Abbildung 191: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* auf den verschiedenen Clustern**

In Abbildung 192 ist erkennbar, dass der Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* mit zunehmender Beschattung abnimmt. Den höchsten Deckungsgrad von null bis + (Median bei null) weist *Cladonia pyxidata* im vollsonnigen Bereich auf. Im Halbschatten und Schatten treten vereinzelt Ausreißer auf und im tiefen Schatten fehlt diese Art zur Gänze.



**Abbildung 192: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei zunehmender Beschattung**

*Cladonia pyxidata* tritt, mit Ausnahme der Ausreißer, nur auf schwach sauren Messpunkten mit einem Deckungsgrad zwischen null und r auf (Abbildung 193) (Legende **pH-Wert** siehe Tabelle 3).

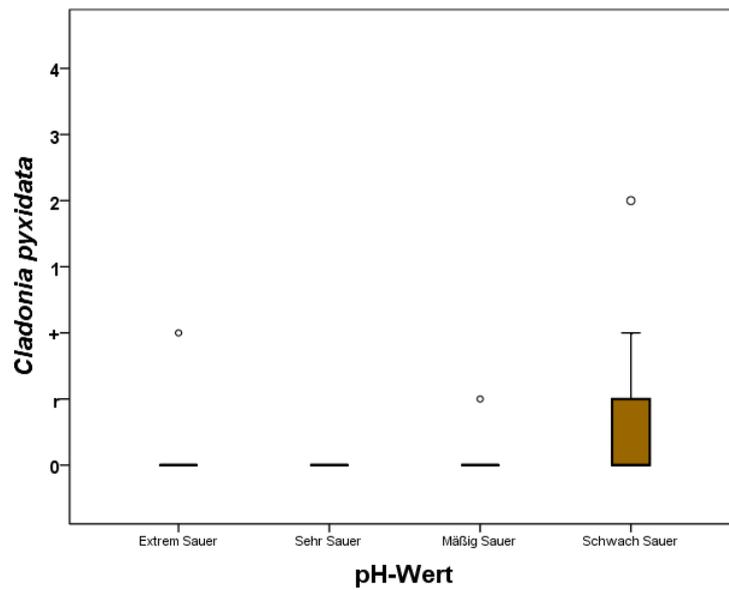


Abbildung 193: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem pH-Wert

*Cladonia pyxidata* kommt mit einem Deckungsgrad von null bis r auf manganreichen Standorten sowie auf sehr manganreichen Standorten vor. Im Manganfreien und Manganarmen liegt der Deckungsgrad bei null (Abbildung 194) (Legende **Mangan-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

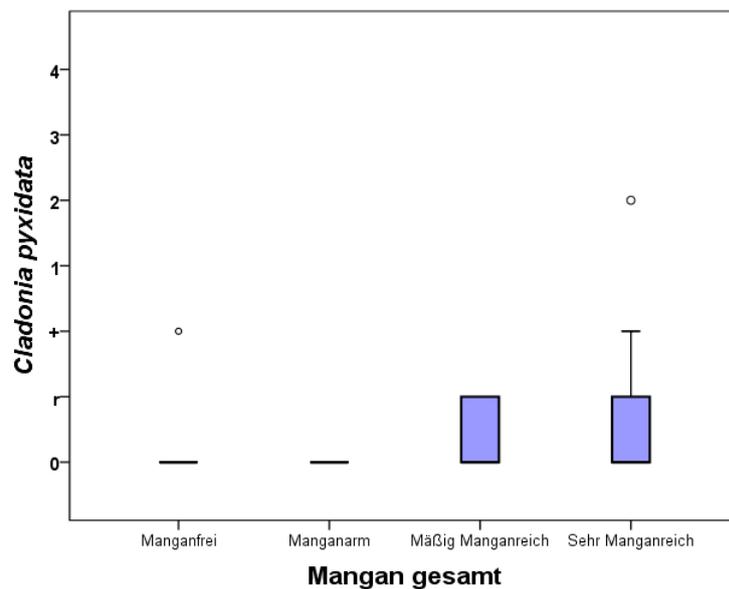


Abbildung 194: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]

Den höchsten Deckungsgrad zwischen null und r (Median bei null) mit einem Ausreißer bei zwei erreicht *Cladonia pyxidata* im manganarmen Bereich. An manganfreien Standorten liegen die Ausreißer bei r und +. Die Ausreißer der mäßig manganreichen und sehr manganreichen Messpunkte haben ihren Deckungsgrad bei + (Abbildung 195) (Legende **verfügbares Mangan** Tabelle 3).

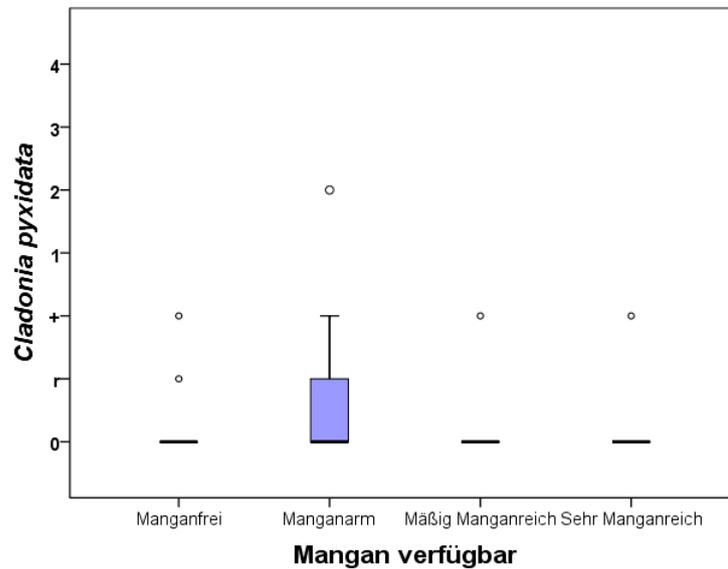


Abbildung 195: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg]

*Cladonia pyxidata* hat ihren höchsten Deckungsgrad von null bis r (Median null) mit einem Ausreißer bei zwei an sehr eisenreichen Messpunkten. An eisenfreien, eisenarmen und mäßig eisenreichen Standorten liegt der Deckungsgrad, bis auf Ausreißer, bei null (Abbildung 196) (Legende **Eisen-Gesamtgehalt** Tabelle 3).

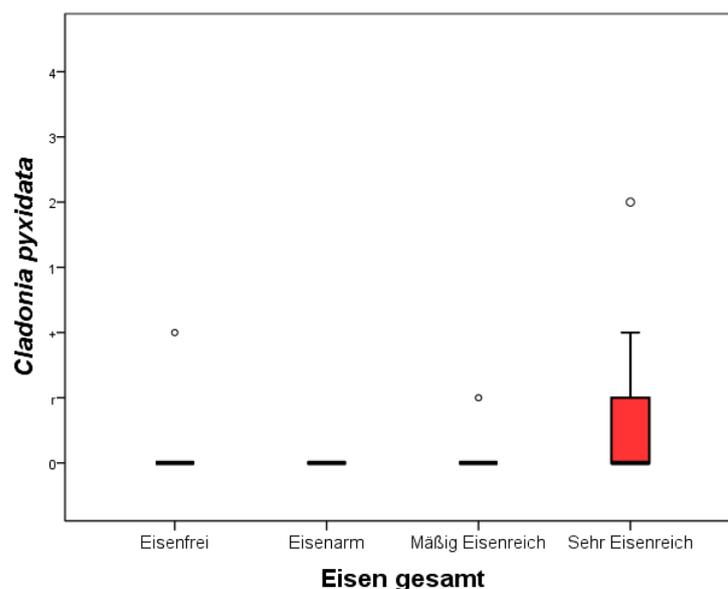


Abbildung 196: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]

Genau umgekehrt zeigt sich der Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem **verfügbarem Eisen** [mg/kg]. Den höchsten Deckungsgrad zwischen null und r (Median null) mit einem Ausreißer bei zwei erreicht diese Flechte im eisenfreien Bereich. An eisenarmen, mäßig eisenreichen und sehr eisenreichen Standorten liegt der Deckungsgrad, bis auf Ausreißer, bei null (Abbildung 197) (Legende verfügbares Eisen Tabelle 3).

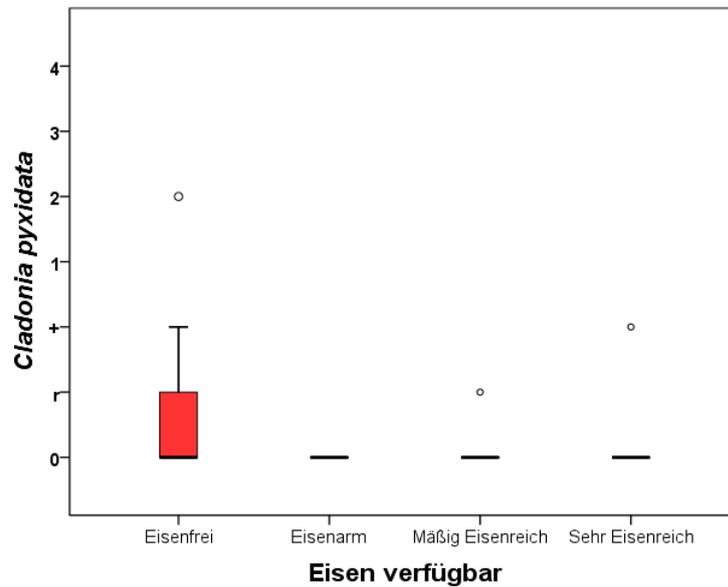


Abbildung 197: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg]

Abbildung 198 zeigt, dass *Cladonia pyxidata*, abgesehen von den Ausreißern, nur auf sehr kupferreichen Standorten mit einem Deckungsgrad von null bis + auftritt (Legende **Kupfer-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

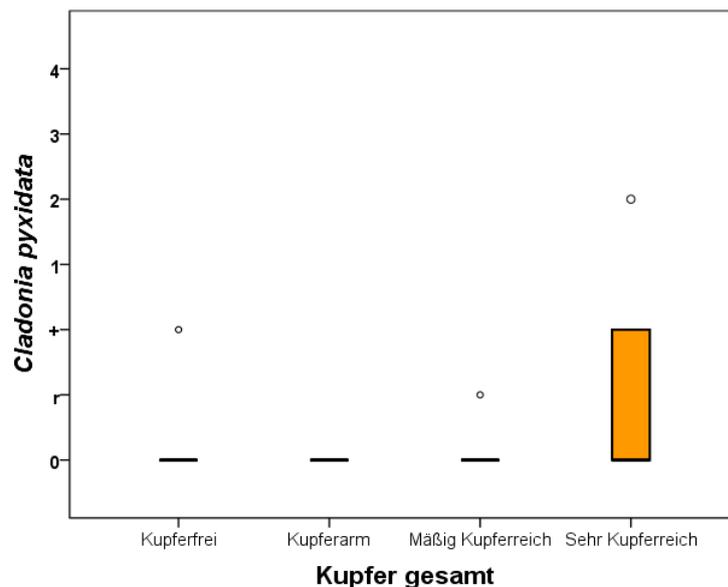


Abbildung 198: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]

*Cladonia pyxidata* erreicht im kupferfreien und kupferarmen Bereich vereinzelt einen Deckungsgrad von + (Median bei null). An mäßig kupferreichen Standorten liegt der Deckungsgrad zwischen null und r (Median null). Bei sehr hoher **Kupfer-Verfügbarkeit** [mg/kg] erreicht der Deckungsgrad vereinzelt bis zu zwei mit einem Median bei null (Abbildung 199) (Legende verfügbares Kupfer Tabelle 3).

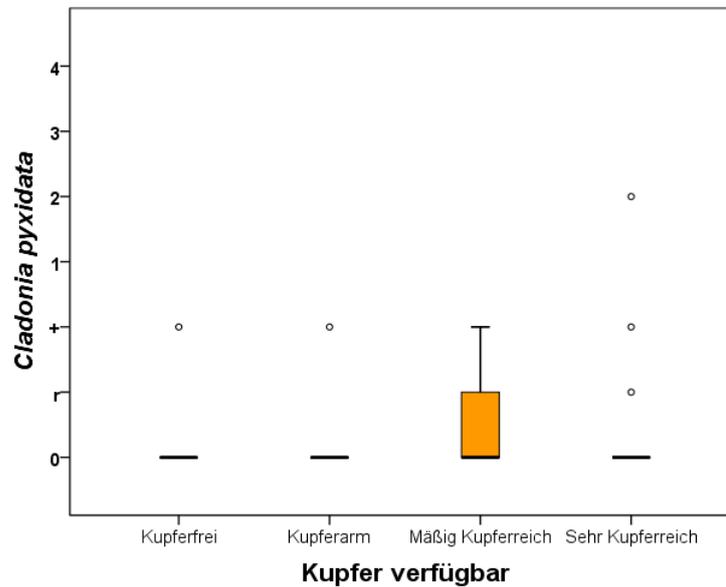


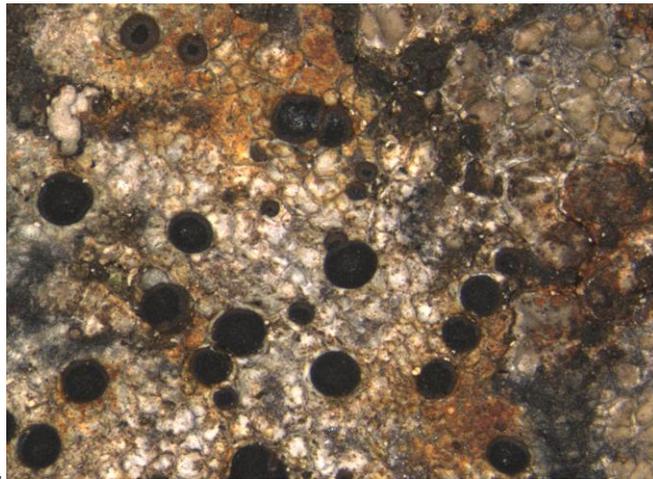
Abbildung 199: Deckungsgrad von *Cladonia pyxidata* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]

Das Vorhandensein von *Cladonia pyxidata* korreliert mit dem Auftreten von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=-0,55^{**}$ ), *Pinus sylvestris* (Strauchschicht) ( $R^2=0,34^*$ ), *Rumex acetosella* ( $R^2=0,42^{**}$ ), *Cynodontium polycarpum* ( $R^2=0,29^*$ ), *Cladonia cervicornis* ( $R^2=0,54^{**}$ ), *Cladonia arbuscula* ( $R^2=0,34^*$ ), *Porpidia macrocarpa* ( $R^2=0,44^{**}$ ) und *Trapelia coarctata* ( $R^2=0,34^*$ ), siehe Tabelle 26.

*Cladonia pyxidata* ist in der Vegetation der Cluster *Halde (Rumex acetosella)* und *Waldrand (Rumex acetosella)* vorhanden. Diese Flechte ist sowohl im extrem sauren als auch im mäßig und schwach sauren Bereich zu finden. *Cladonia pyxidata* ist sowohl im Manganfreien als auch im mäßig Manganreichen und sehr Manganreichen zu finden und verhält sich ähnlich bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt.

### **Porpidia macrocarpa**

*Porpidia macrocarpa* (Abbildung 200) ist eine Krustenflechte mit einem weißlichen bis rostig überlaufenen Lager. Sie besitzt Sporen von 15-28 x 6-13 µm und ein schwärzliches Hypothecium. Die Apothecien sind deutlich über 1 mm groß und manchmal bereift (Wirth & Düll, 2000). *Porpidia macrocarpa* kommt bis über die Waldgrenze auf kalkfreiem Silikatgestein, v.a. auf niedrigen Felsen an schattigen, beregneten Flächen, aber auch an besonnten Orten und auf eisenreichem Substrat vor (Wirth, 1995)



**Abbildung 200: *Porpidia macrocarpa*, rostig überlaufene Lager und große (>1 mm) Apothecien, Foto: Yasmin Weiss**

Die Karte in Abbildung 201 zeigt das Vorkommen von *Porpidia macrocarpa* auf den Messpunkten des Untersuchungsgebiets.

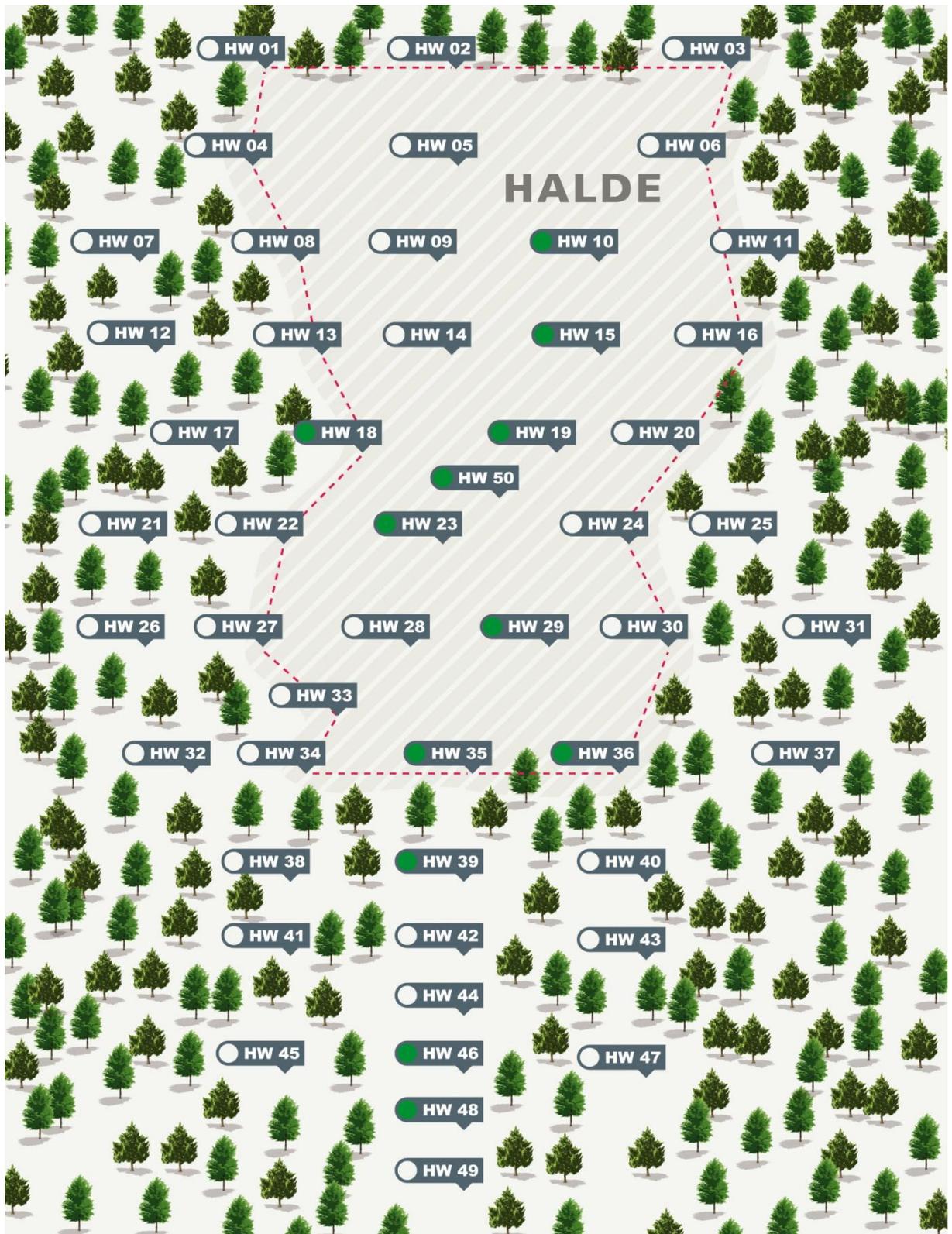


Abbildung 201: Vorkommen von *Porpidia macrocarpa* auf den Messpunkten (grün eingefärbte Messpunkte)

Im Cluster *Halde* (Moose, Flechten) liegt der Deckungsgrad zwischen null und r. Auf der *Halde* (*Rumex acetosella*) erreicht *Porpidia macrocarpa* ihren höchsten Deckungsgrad (null bis +). Im Cluster *Wald* (*Avenella flexuosa*) erzielt diese Flechte einen Deckungsgrad zwischen null und r. Die restlichen Cluster sind nicht von *Porpidia macrocarpa* besiedelt (Abbildung 202).

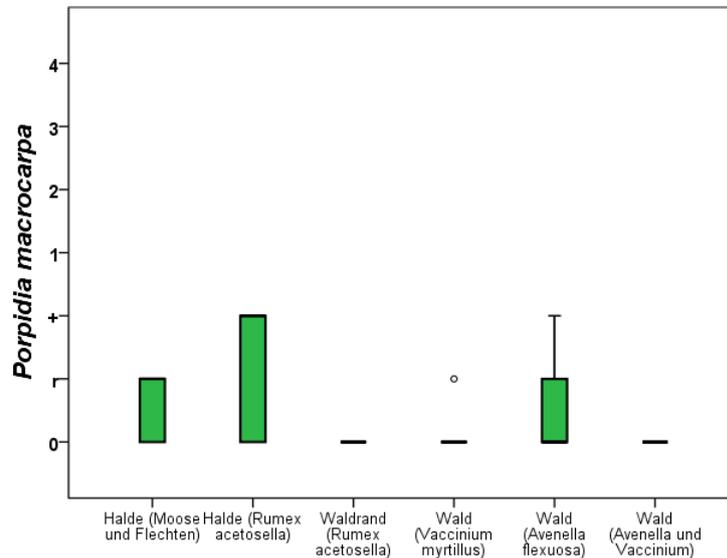


Abbildung 202: Deckungsgrad von *Porpidia macrocarpa* auf den verschiedenen Clustern

Mit zunehmender Beschattung nimmt der Deckungsgrad von *Porpidia macrocarpa* ab. Liegt der Deckungsgrad dieser Flechte an vollsonnigen Standorten bei r (Median), so sinkt er im Halbschatten auf einen Median von null (r bis null). Im Schatten ist ein Ausreißer vorzufinden und im tiefen Schatten ist *Porpidia macrocarpa* nicht mehr vorhanden (Abbildung 203).

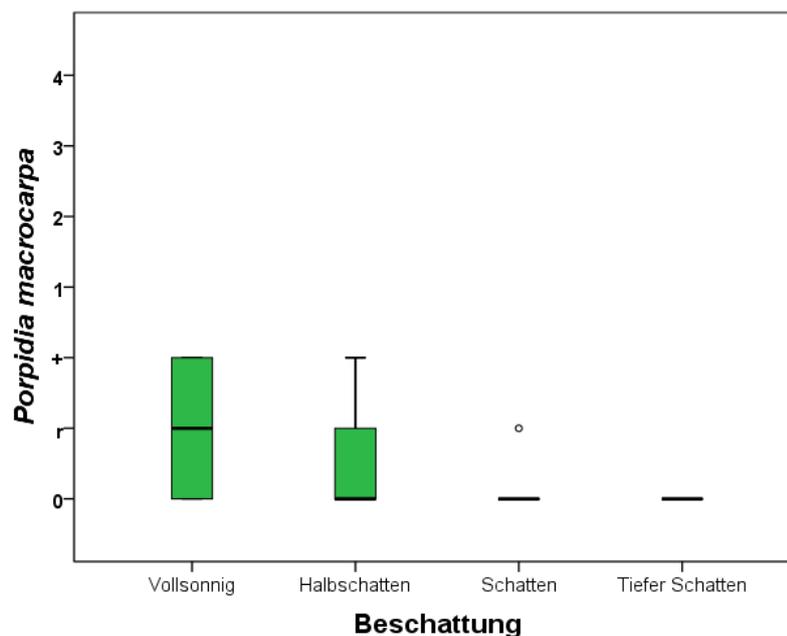


Abbildung 203: Deckungsgrad von *Porpidia macrocarpa* bei zunehmender Beschattung

Das Auftreten von *Porpidia macrocarpa* korreliert mit dem Vorhandensein von *Pinus sylvestris* (Baumschicht) ( $R^2=-0,56^{**}$ ), *Larix decidua* (Krautschicht) ( $R^2=0,38^{**}$ ), *Rumex acetosella* ( $R^2=0,55^{**}$ ), *Pohlia* sp. ( $R^2=0,32^*$ ), *Cladonia arbuscula* ( $R^2=0,31^*$ ), *Cladonia pyxidata* ( $R^2=0,44^{**}$ ) und *Trapelia coarctata* ( $R^2=0,31^*$ ), siehe Tabelle 26.

## 5.5 Vegetation

### 5.5.1 Pflanzengesellschaft

Nach Willner et al. (Willner & Grabherr, 2007) handelt es sich bei allen Waldstandort-Pflanzengesellschaften um einen mitteleuropäischen Heidelbeer – Rotföhrenwald, *Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvestris*.

Dies entspricht einem Rotföhrenwald mit vereinzeltem Auftreten von Fichte und Lärche. Die Strauchschicht ist gering bis mäßig entwickelt. In einer durchwegs gut entwickelten Krautschicht sind Zwergsträucher wie Heidel- und Preiselbeere sowie weitere Säurezeiger vertreten. Hinzu kommt eine dichte Moosschicht, die teilweise auch sehr flechtenreich ausfallen kann. Angesiedelt ist diese Pflanzengesellschaft auf (mäßig) steilen Hängen aller Expositionen auf silikatischem, selten auch karbonatischem Gestein (Willner & Grabherr, 2007).

Bei Vegetationsaufnahmen auf der Halde und im umgebenden Wald wurden gesamt 38 Gefäßpflanzenarten, 14 Moosarten und 18 Flechtenarten bestimmt. Direkt auf der Abraumhalde wachsen mit *Rumex acetosella* und *Pohlia drummondii* auch zwei für Schwermetallstandorte charakteristische Arten. Den Randbereich der Halde dominieren acidophile Arten wie *Pleurozium schreberi* und *Vaccinium vitis-idea*. Die Vegetationskarte zeigt auf, dass sich die Vegetation im umliegenden Wald deutlich unterscheidet. So ist der Wald über Prebichlschichten auf der südlichen Seite der Halde geprägt von säureliebenden Moosen und Gräsern (*Avenella flexuosa*), während die nördliche Seite über Werfener Schiefer einen deutlich höheren Artenreichtum aufweist.

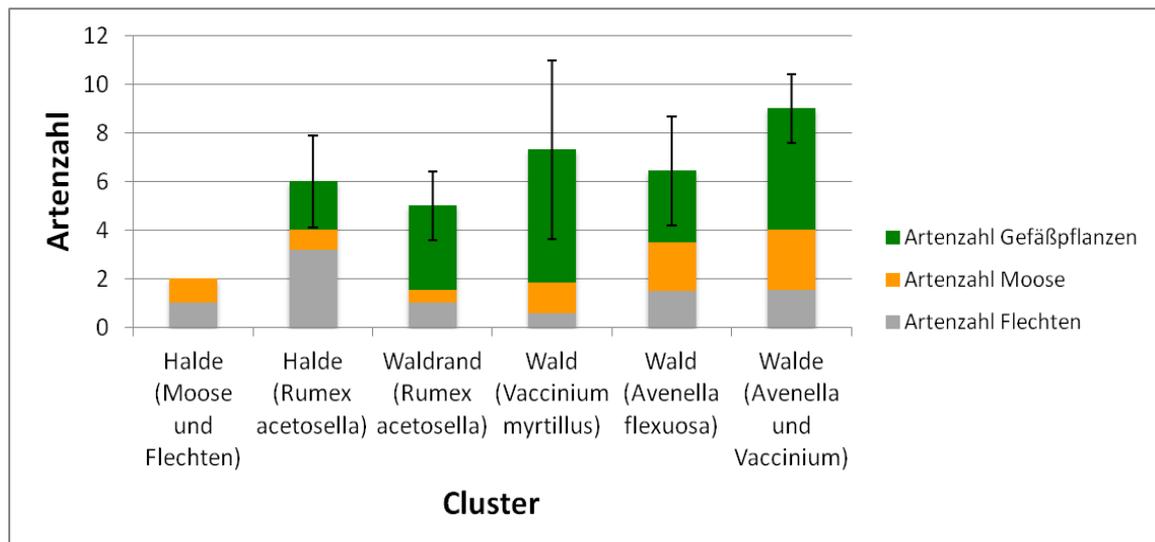
### 5.5.2 Artenzahlen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Arten pro Messpunkt besprochen. Bei diesen Ergebnissen handelt es sich um Durchschnittswerte.

Die signifikanten Unterschiede (Kruskall-Wallis Test) der Artenzahl zwischen den Clustern ergeben \*\* (hoch signifikant) für Gefäßpflanzen und \* (signifikant) für Flechten. Bei der Zahl der Moosarten treten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Clustern auf.

Im Cluster *Halde (Moose und Flechten)* der Abbildung 204 befinden sich die wenigsten Pflanzenarten, Gefäßpflanzen fehlen gänzlich. Die höchste Artenzahl der Flechten ist neben zwei Gefäßpflanzenarten und eine Moosart im Cluster *Halde (Rumex acetosella)* angesiedelt. Im Cluster *Waldrand* dominieren die Gefäßpflanzen (durchschnittlich 3,5 Arten) über Flechten (durchschnittlich eine Art) und Moose (durchschnittlich 0,5 Arten). Im *Wald (Vaccinium myrtillus)*

tritt die höchste Artenzahl der Gefäßpflanzen auf (durchschnittlich 5,5), die Moose erreichen hier eine höhere Artenzahl (1,3) als die Flechten (0,6). Der Cluster *Wald (Avenella flexuosa)* hat mit drei Gefäßpflanzen Arten, zwei Moosarten und durchschnittlich 1,5 Flechtenarten im Wald die geringste Gesamtartenzahl. Die höchste Gesamtartenzahl ist im Cluster *Wald (Avenella, Vaccinium)* zu finden. Fünf Arten von Gefäßpflanzen durchschnittlich 2,5 Moosarten und 1,5 Flechtenarten zeichnen diesen Cluster aus.



**Abbildung 204:** Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten in den verschiedenen Clustern, die schwarzen Striche stellen die Standardabweichung der Gesamtartenzahl dar.

Je weniger **Skelettanteil im Boden** vorhanden ist, desto höher ist die Gesamtartenzahl (Abbildung 205). Gleiches gilt für die Artenzahl der Gefäßpflanzen. Konträr dazu verhält sich die Artenzahl der Flechten, je höher der Skelettanteil im Boden, desto mehr Flechtenarten sind aufzufinden. Die Artenzahl der Moose liegt in allen Clustern bei durchschnittlich ein bis zwei Arten pro Standort (Legende Skelettgehalt siehe Tabelle 3).

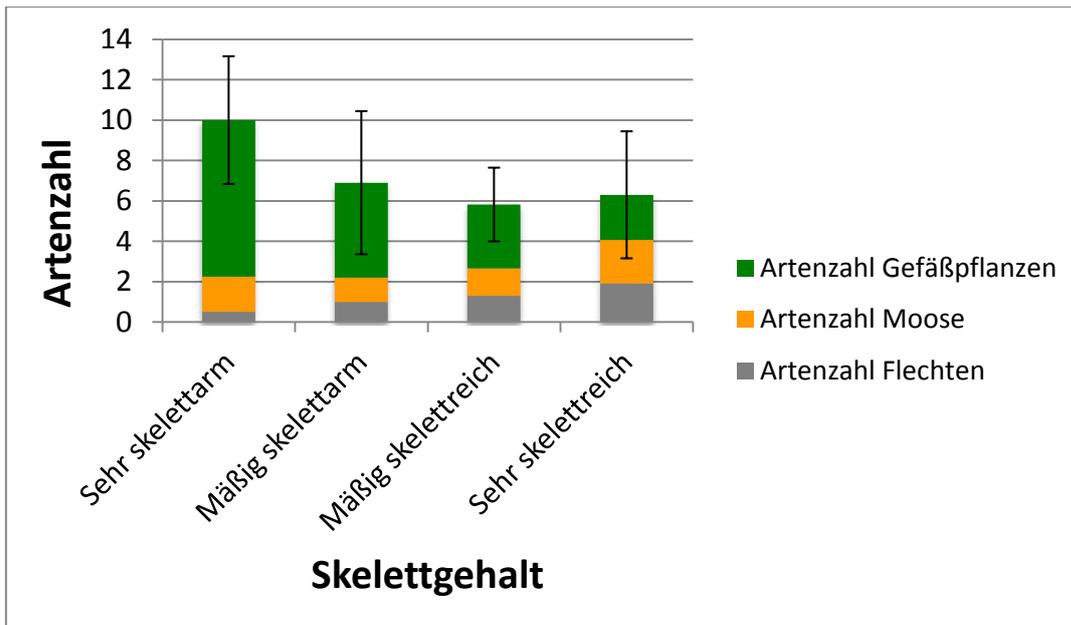


Abbildung 205: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei verschiedenen Skelettgehalten

Aus Abbildung 206 wird ersichtlich, dass sich bei unterschiedlichen **pH-Werten** die Gesamtartenzahl nur geringfügig ändert. Im extrem sauren Bereich kommen gesamt gesehen die wenigsten Gefäßpflanzenarten (durchschnittlich drei Arten), dafür die meisten Moosarten (zwei Arten) vor. Im sehr sauren Bereich wird die niedrigste Artenzahl an Flechten (eine Art), dafür die höchste Artenzahl der Gefäßpflanzen (ca. 4,4) registriert. Mit einer leichten Dominanz der Gefäßpflanzenarten und einer ausgeglichenen Artenzahl bei Moosen und Flechten (durchschnittlich etwa 1,5) zeigt sich der mäßig saure Bereich. Im schwach Sauren erhöhen die Flechten (ca. 1,7) ihre Artenzahl leicht gegenüber den Moosen (ca. 1,2) (Legende pH-Wert siehe Tabelle 3).

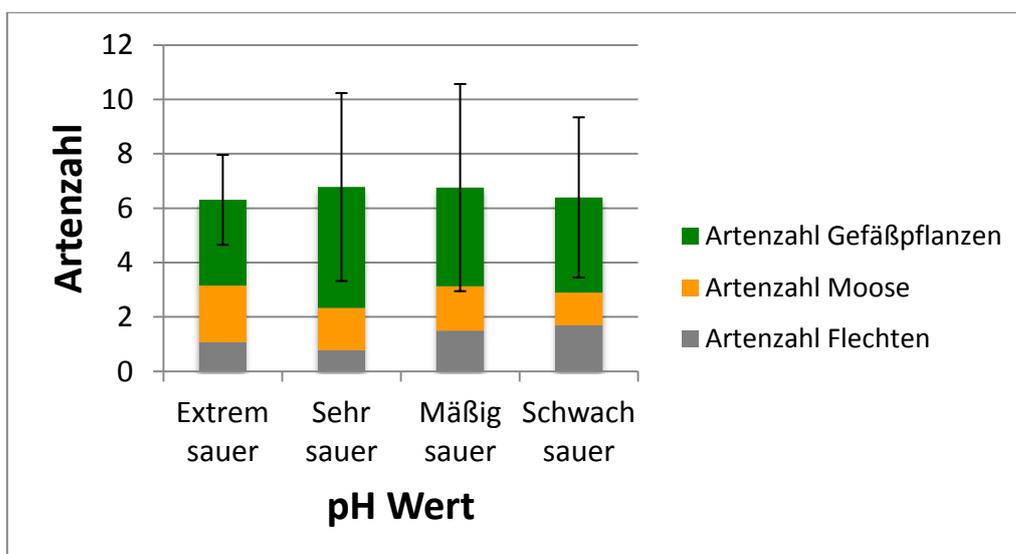


Abbildung 206: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem pH-Wert

Mit steigendem **Humusanteil im Feinboden** sinkt die durchschnittliche Artenzahl der Flechten. Die Artenzahl der Gefäßpflanzen (etwa 3,7) hingegen schwankt nur gering, einzig auf mäßig humosem Boden sinkt die Artenzahl der Gefäßpflanzen auf ca. 2,4. Die Artenzahl der Moose ändert sich nur geringfügig (Abbildung 207) (Legende Humusanteil im Feinboden Tabelle 3).

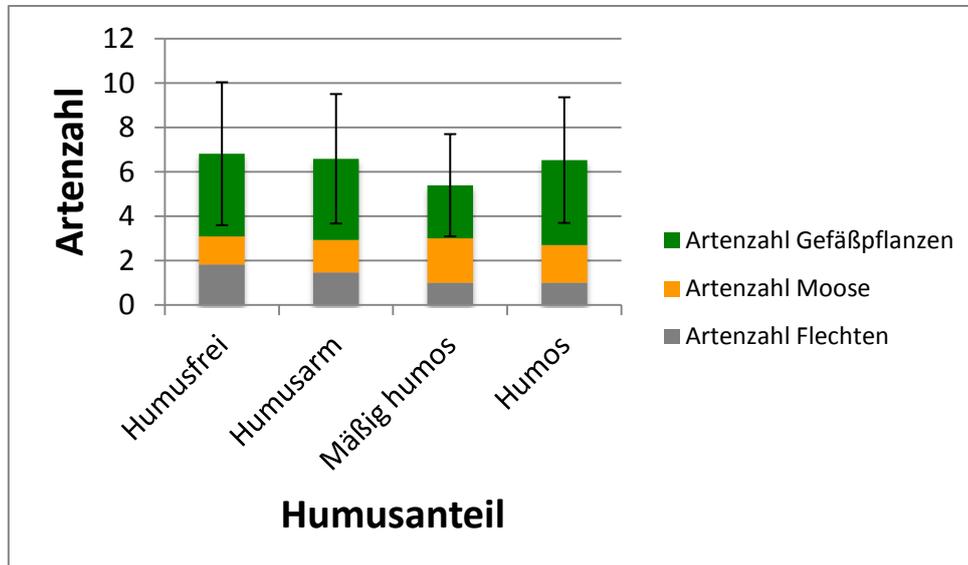


Abbildung 207: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Humusanteil im Feinboden

Abbildung 208 zeigt, dass mit steigendem **Tonanteil im Feinboden** die Artenzahl der Gefäßpflanzen zunimmt. Die Artenzahl der Flechten hingegen nimmt mit steigendem Tonanteil ab. Die Moosarten nehmen zwar auch mit steigendem Tonanteil ab, sie haben ihre geringste Artenzahl jedoch im mäßig tonhaltigen Bereich und erhöhen ihre Artenzahl an tonreichen Standorten wieder.

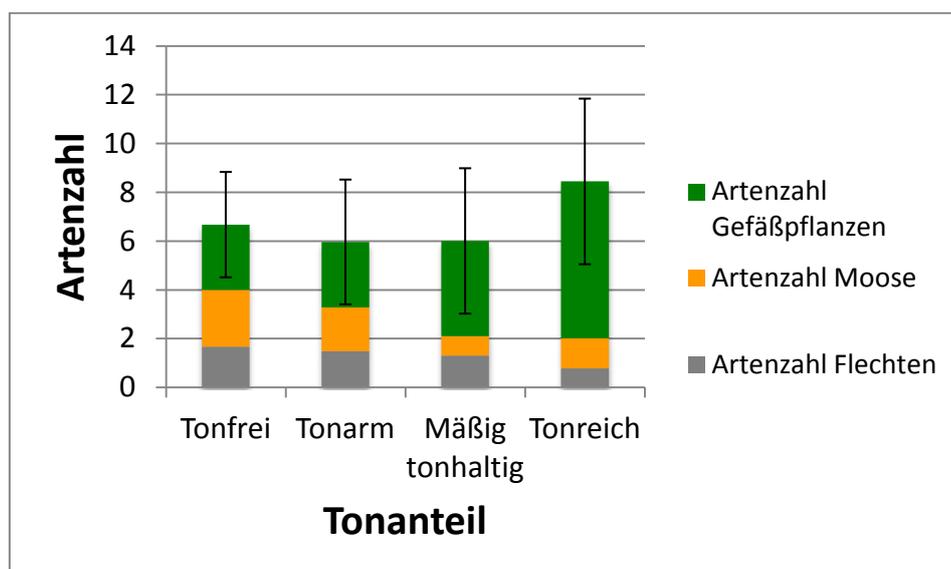


Abbildung 208: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Tonanteil im Feinboden

Mit steigendem **Kupfer-Gesamtgehalt** nehmen die Artenzahlen der Flechten zu, die wenigsten Flechtenarten (etwa 0,6) sind an kupferarmen Standorten zu finden. In mäßig kupferreichen und sehr kupferreichen Bereichen kommen die Flechten auf durchschnittlich zwei Arten pro Messpunkt. Die Zahl der Moosarten verhält sich von kupferfrei bis mäßig kupferreich ähnlich mit etwa zwei Arten pro Messpunkt, erst im sehr kupferreichen Bereich treten weniger Moosarten (eine Art) auf. Die Gefäßpflanzen (durchschnittlich fünf Arten pro Messpunkt) treten vermehrt an kupferfreien und an mäßig kupferreichen Standorten auf, die geringste Artenzahl (ca. zwei Arten) haben sie an sehr kupferreichen Standorten (Abbildung 209) (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

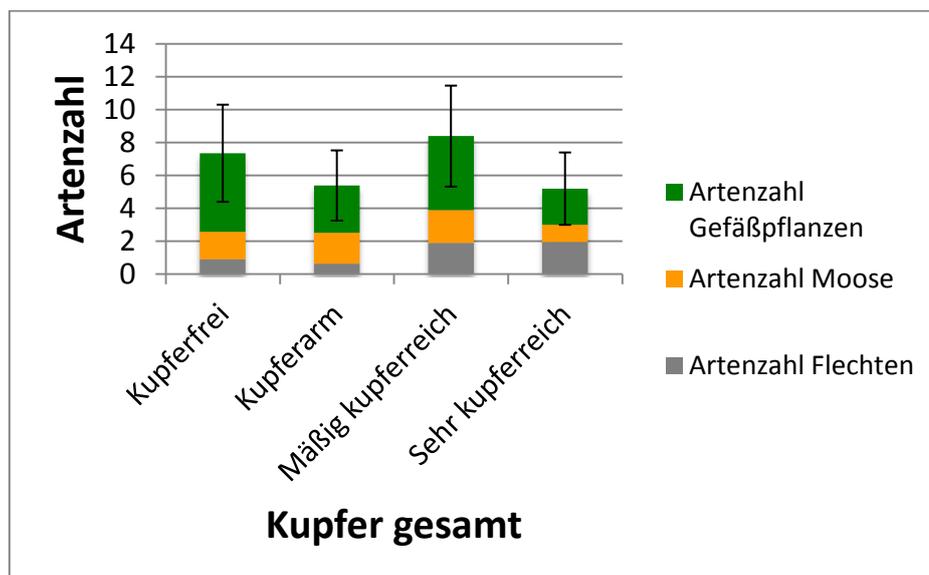


Abbildung 209: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt

Im mäßig eisenreichen Bereich sind die höchsten Gesamtartenzahlen zu finden. Je höher der **Eisen-Gesamtgehalt**, desto größer die durchschnittliche Artenzahl der Flechten (eisenfrei, eisenarm 0,5-1 Art, mäßig eisenreich 2,4, sehr eisenreich 2,2 Arten). Die Moosarten, ein bis zwei pro Messpunkt, variieren nicht stark zwischen den verschiedenen Eisengehalten. Bei den Gefäßpflanzen hingegen können die höchsten Artenzahlen (durchschnittlich fünf Arten pro Messpunkt) auf eisenfreien, gefolgt von eisenarmen (etwa drei Arten pro Messpunkt) Standorten registriert werden. In mäßig eisenreichen und sehr eisenreichen Bereichen beläuft sich die Artenzahl der Gefäßpflanzen auf durchschnittlich zwei Arten pro Messpunkt (Abbildung 210) (Legende Eisen-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).

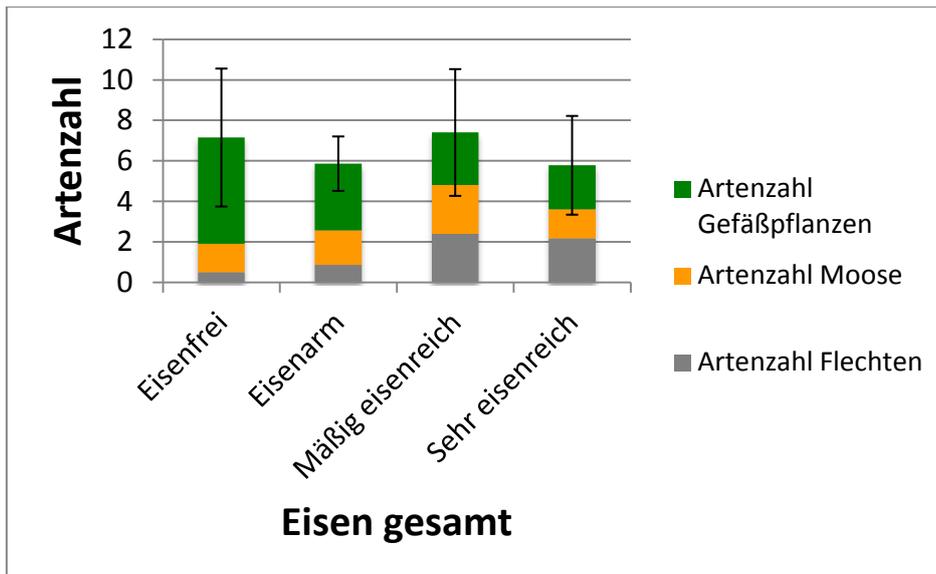


Abbildung 210: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt

Sowohl die höchste Gesamtartenzahl als auch die höchste Artenzahl der Gefäßpflanzen ist im Kupferfreien, d.h. mit dem geringsten **verfügbaren Kupfer** [mg/kg] vorzufinden. Von kupferfrei bis mäßig kupferreich nimmt die Artenzahl der Flechten pro Messpunkt zu. Am sehr kupferreichen Standort, d.h. mit der höchsten Verfügbarkeit an Kupfer [mg/kg] nimmt die Zahl der Flechtenarten wieder ab. Die Zahl der Moosarten liegt in allen Bereichen bei durchschnittlich ein bis zwei Arten pro Messpunkt (Abbildung 211) (Legende verfügbares Kupfer siehe Tabelle 3).

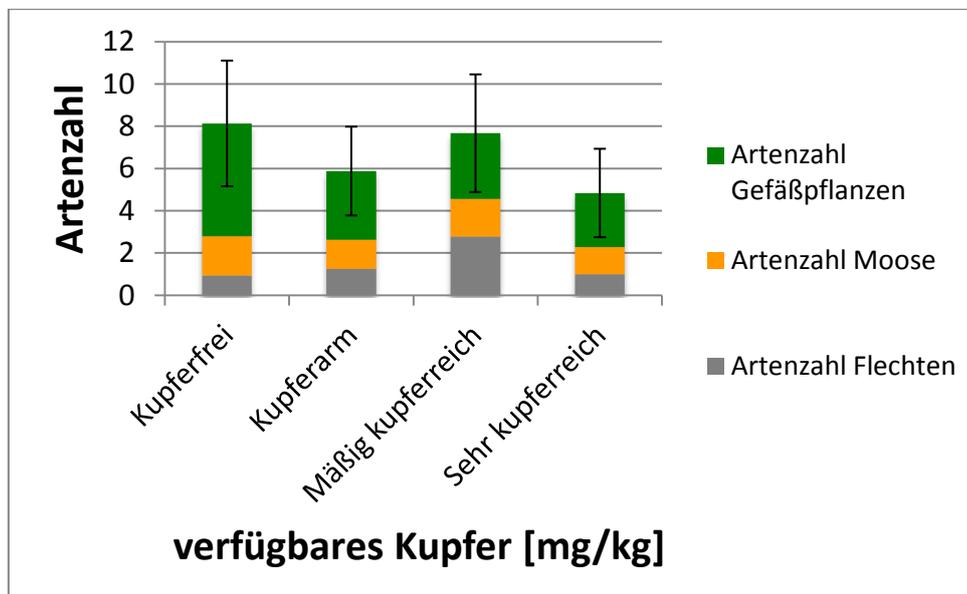


Abbildung 211: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigender Kupfer-Verfügbarkeit [mg/kg]

Bezüglich des **verfügbaren Eisens** [mg/kg] liegt die Artenzahl der Gefäßpflanzen durchwegs bei ca. 3,5 Arten pro Messpunkt. Auch die Zahl der Moosarten liegt unabhängig vom verfügbaren Eisen [mg/kg] bei durchschnittlich 1,5 Arten pro Messpunkt. Die Artenzahl der Flechten unterliegt jedoch Schwankungen. Bei eisenfreien und mäßig eisenreichen Standorten sind durchschnittlich zwei Flechtenarten pro Messpunkt anzutreffen. Eisenarme und sehr eisenreiche Bereiche sind mit durchschnittlich einer Flechtenart pro Messpunkt besiedelt (Abbildung 212) (Legende verfügbares Eisen siehe Tabelle 3).

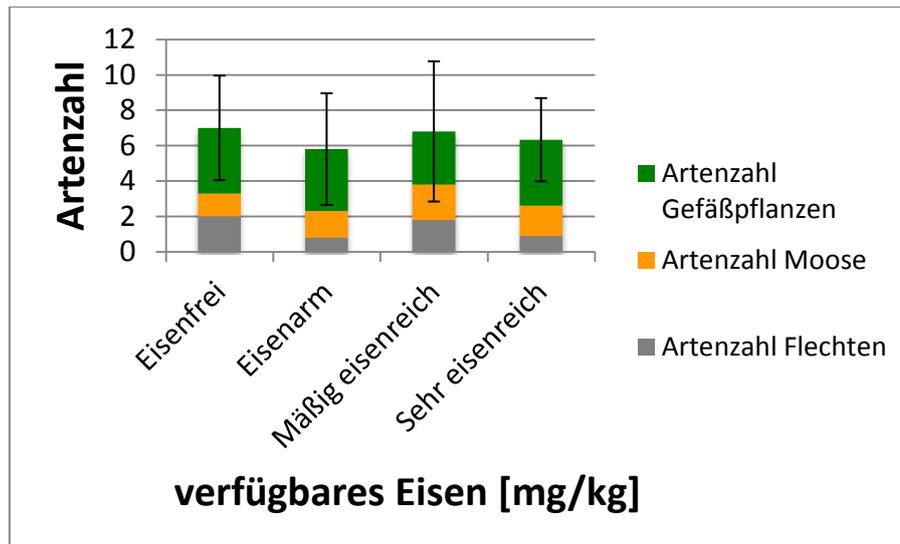


Abbildung 212: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigender Eisen-Verfügbarkeit [mg/kg]

Mit zunehmender **Beschattung** nehmen die Flechtenarten ab und die Arten der Gefäßpflanzen zu. Die Zahl der Moosarten liegen bei einer Art pro Messpunkt in Vollsonne und tiefem Schatten, und bei zwei Arten pro Messpunkt im Halbschatten und Schatten (Abbildung 213).

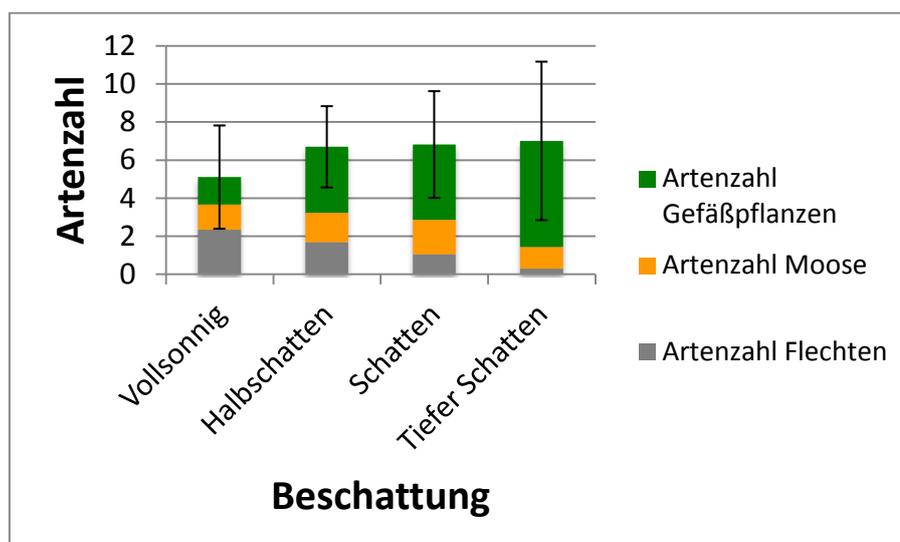


Abbildung 213 Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei zunehmender Beschattung

Die in Tabelle 22 aufgelisteten signifikanten Unterschiede zwischen den Artenzahlen in den Clustern und ausgewählten Bodenparametern zeigen, dass bei den Gefäßpflanzen mehr (fünf) signifikante Unterschiede auftreten als bei Flechten (drei). Die Moose weisen nur einen signifikanten Unterschied beim Ton-Gesamtgehalt auf. Auffallend ist, dass keine Korrelationen mit Humus-Gesamtgehalt oder pH-Wert auftreten.

Tabelle 22: signifikante Unterschiede zwischen den Artenzahlen und ausgewählten Bodenparametern (Kruskal-Wallis Test); (\*signifikant, \*\*hoch signifikant)

	Gefäßpflanzen	Moose	Flechten
Skelettanteil	*	--	--
pH Wert	--	--	--
Humus gesamt	--	--	--
Ton gesamt	*	*	--
Cu gesamt	*	--	*
Fe gesamt	**	--	**
Cu verfügbar	--	--	--
Fe verfügbar	--	--	--
Beschattung	**	--	*

Die Korrelationen der Artenzahlen mit ausgewählten Bodenparametern sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Korrelation ( $R^2$ ) der Artenzahlen mit Bodenparametern (Spearman Test); (\*signifikant, \*\*hoch signifikant)

	Gefäßpflanzen	Moose	Flechten
Beschattung	0,35*	--	-0,48**
Wassergehalt aktuell	--	--	-0,28*
Skelettanteil	-0,32*	--	--
Feinschluff gesamt	0,42**	-0,33*	-0,29*
Ton gesamt	0,40**	-0,32*	-0,29*
Ton (Feinboden)	0,38**	-0,35*	-0,31*
Sand (Feinboden)	-0,47**	--	0,43**
Schluff (Feinboden)	0,40**	0,31*	--
Mn gesamt	-0,29*	--	0,40**
Fe gesamt	-0,48**	--	0,48**
Cu gesamt	-0,41**	--	0,36**
Phosphat	--	0,31*	--
Kalium	--	--	-0,32*
Mn verfügbar	--	--	-0,32*
Fe verfügbar	--	--	-0,33*
Cu verfügbar	-0,36*	--	--
Mn verfügbar%	0,30*	--	-0,42**
Fe verfügbar%	0,28*	--	-0,45**
Zn verfügbar%	--	--	-0,28*
Cd verfügbar%	--	0,32*	-0,34*
Pb verfügbar%	--	0,35*	--

### 5.5.3 Korrelationen zwischen den Pflanzen

Die Korrelationen zwischen den **Gehölzen** und allen Pflanzenarten sind in Tabelle 24 aufgelistet.

Tabelle 24: Korrelationen ( $R^2$ ) zwischen den Gehölzen und allen Pflanzenarten (Spearman Test); (\*signifikant, \*\*hoch signifikant)

	<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Strauchschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	<i>Picea abies</i> Baumschicht	<i>Picea abies</i> Krautschicht	<i>Larix decidua</i> Baumschicht	<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	<i>Larix decidua</i> Krautschicht	<i>Quercus petrea</i> Krautschicht	<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	<i>Rosa canina</i>
<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	X	--	--	--	--	--	-0,29*	-0,35*	--	--	--	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Strauchschicht	--	X	--	--	--	--	0,69**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	--	--	X	--	0,46**	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Picea abies</i> Baumschicht	--	--	--	X	--	--	--	0,32*	0,35*	--	--	--	0,32*	0,32**
<i>Picea abies</i> Krautschicht	--	--	0,46**	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Baumschicht	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	-0,29*	0,69**	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Krautschicht	-0,35*	--	--	0,32*	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--
<i>Quercus petrea</i> Krautschicht	--	--	--	0,35*	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--
<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X	--	1**	0,70**	0,70**
<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	0,70**
<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1**	--	X	0,70**	0,70**
<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	--	--	--	0,32*	--	--	--	--	--	0,70**	--	0,70**	X	1**
<i>Rosa canina</i>	--	--	--	0,32**	--	--	--	--	--	0,70**	0,70**	0,70**	1**	X
<i>Vaccinium vitis-idea</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Vaccinium myrtillus</i>	0,29*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Strauchschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	<i>Picea abies</i> Baumschicht	<i>Picea abies</i> Krautschicht	<i>Larix decidua</i> Baumschicht	<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	<i>Larix decidua</i> Krautschicht	<i>Quercus petraea</i> Krautschicht	<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	<i>Rosa canina</i>
<i>Oxalis acetosella</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,48**	--	--	--
<i>Rumex acetosella</i>	-0,52**	--	--	--	--	--	0,38**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Melampyrum pratense</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,31*	--	0,31**	--	--
<i>Luzula luzuloides</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,54**	0,54**	0,54**	0,36**	0,36*
<i>Helleborus niger</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Silene nemoralis</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fragaria vesca</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,38**	--
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,47**	--
<i>Euphorbia cyparissias</i>	--	--	--	0,32*	--	--	--	--	--	0,70**	0,70**	0,70**	1**	--
<i>Trifolium alpestre</i>	--	--	--	0,32*	--	--	--	--	--	--	--	--	0,48**	--
<i>Hieracium murorum</i>	--	--	--	--	--	--	0,28*	--	--	0,43**	0,43**	0,43**	0,61**	--
<i>Tanacetum corymbosum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,70**	0,70**	0,70**	0,48**	--
<i>Carex flacca</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Sesleria albicans</i>	--	--	--	0,48**	--	--	--	--	0,41**	--	--	--	0,70**	--
<i>Avenella flexuosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Hypnum cupressiforme</i>	0,38**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Dicranum scoparium</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pleurozium schreberi</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Ceratodon purpureus</i>	--	--	0,30*	--	--	--	--	0,29**	--	--	--	--	--	--
<i>Thuidium tamariscinum</i>	--	--	--	0,48**	--	--	--	--	0,41**	--	--	--	0,70**	--
<i>Hylocomium splendens</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Strauchschicht	<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	<i>Picea abies</i> Baumschicht	<i>Picea abies</i> Krautschicht	<i>Larix decidua</i> Baumschicht	<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	<i>Larix decidua</i> Krautschicht	<i>Quercus petrea</i> Krautschicht	<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	<i>Rosa canina</i>
<i>Pohlia nutans</i>	--	--	--	--	--	--	0,71**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia lutescens</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia drummondii</i>	--	--	--	--	--	--	0,49**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia sp.</i>	-0,43**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Orthotrichum anomalum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cynodontium polycarpum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Orthodicranum montanum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cetraria islandica</i>	--	--	--	--	--	0,42**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia cervicornis</i>	-0,60**	0,31*	--	--	--	--	0,47**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia arbuscula</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia pyxidata</i>	-0,55**	0,34*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia furcata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia fimbriata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia rangiferina</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia squamosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia coniocraea</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia digitata</i>	--	--	--	0,32*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia macroceras</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Porpidia macrocarpa</i>	-0,56**	--	--	--	--	--	--	0,38**	--	--	--	--	--	--

Die Korrelationen zwischen den **krautigen Pflanzen** und allen Pflanzenarten sind in Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 25: Korrelationen (R<sup>2</sup>) zwischen den krautigen Pflanzen und allen Pflanzenarten (Spearman Test); (\*signifikant, \*\*hoch signifikant)

	<i>Vaccinium vitis-idea</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Oxalis acetosella</i>	<i>Rumex acetosella</i>	<i>Melampyrum pratense</i>	<i>Luzula luzuloides</i>	<i>Helleborus niger</i>	<i>Silene nemoralis</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	<i>Euphorbia cyparissias</i>	<i>Trifolium alpestre</i>	<i>Hieracium murorum</i>	<i>Tanacetum corymbosum</i>	<i>Carex flacca</i>	<i>Sesleria albicans</i>	<i>Avenella flexuosa</i>
<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	--	0,29*	--	- 0,52**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Strauchschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Picea abies</i> Baumschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32*	0,32*	--	--	--	0,48**	--
<i>Picea abies</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Baumschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	--	--	--	0,38**	--	--	--	--	--	--	--	--	0,28*	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Quercus petraea</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,41**	--
<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	--	--	--	--	0,31*	0,54**	--	--	--	--	0,70**	--	0,43**	0,70**	--	--	--
<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	--	--	0,48**	--	--	0,54**	--	--	--	--	0,70**	--	0,43**	0,70**	--	--	--

	<i>Vaccinium vitis-idea</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Oxalis acetosella</i>	<i>Rumex acetosella</i>	<i>Melampyrum pratense</i>	<i>Luzula luzuloides</i>	<i>Helleborus niger</i>	<i>Silene nemoralis</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	<i>Euphorbia cyparissias</i>	<i>Trifolium alpestre</i>	<i>Hieracium murorum</i>	<i>Tanacetum corymbosum</i>	<i>Carex flacca</i>	<i>Sesleria albicans</i>	<i>Avenella flexuosa</i>
<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	--	--	--	--	0,31**	0,54**	--	--	--	--	0,70**	--	0,43**	0,70**	--	--	--
<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	0,36**	--	--	0,38**	0,47**	1**	0,48**	0,61**	0,48**	--	0,70**	--
<i>Rosa canina</i>	--	--	--	--	--	0,36*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Vaccinium vitis-idea</i>	X	--	0,48**	--	--	0,37**	0,37*	--	0,60**	0,48**	--	0,48**	--	--	0,34*	0,34*	--
<i>Vaccinium myrtillus</i>	--	X	0,30*	-0,31*	0,42**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Oxalis acetosella</i>	0,48**	0,30*	X	--	0,48*	0,83**	0,70**	--	0,81**	0,49**	--	0,48**	--	--	0,70**	--	--
<i>Rumex acetosella</i>	--	-0,31*	--	X	--	--	--	0,31*	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Melampyrum pratense</i>	--	0,42**	0,48*	--	X	0,58**	0,36*	--	0,36*	--	--	--	--	0,48**	--	--	--
<i>Luzula luzuloides</i>	0,37**	--	0,83**	--	0,58**	X	0,57**	--	0,66**	0,40**	0,36*	0,40**	0,47**	0,79**	0,59**	--	--
<i>Helleborus niger</i>	0,37*	--	0,70**	--	0,36*	0,57**	X	--	0,57**	--	--	--	0,43**	0,70**	--	--	--
<i>Silene nemoralis</i>	--	--	--	0,31*	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fragaria vesca</i>	0,60**	--	0,81**	--	0,36*	0,66**	0,57**	--	X	0,81**	0,38**	0,81**	0,48**	0,38**	0,57**	0,57**	--
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	0,48**	--	0,49**	--	--	0,40**	--	--	0,81**	X	0,47**	1**	--	--	0,71**	0,69**	--
<i>Euphorbia cyparissias</i>	--	--	--	--	--	0,36*	--	--	0,38**	0,47**	X	0,48**	0,61**	--	--	0,70**	--
<i>Trifolium alpestre</i>	0,48**	--	0,48**	--	--	0,40**	--	--	0,81**	1**	0,48**	X	--	--	0,70**	0,70**	--
<i>Hieracium murorum</i>	--	--	--	--	--	0,47**	0,43**	--	0,48**	--	0,61**	--	X	0,60**	--	0,43**	--

	<i>Vaccinium vitis-idea</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Oxalis acetosella</i>	<i>Rumex acetosella</i>	<i>Melampyrum pratense</i>	<i>Luzula luzuloides</i>	<i>Helleborus niger</i>	<i>Silene nemoralis</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	<i>Euphorbia cyparissias</i>	<i>Trifolium alpestre</i>	<i>Hieracium murorum</i>	<i>Tanacetum corymbosum</i>	<i>Carex flacca</i>	<i>Sesleria albicans</i>	<i>Avenella flexuosa</i>
<i>Tanacetum corymbosum</i>	--	--	--	--	0,48**	0,79**	0,70**	--	0,38**	--	--	--	0,60**	X	--	--	--
<i>Carex flacca</i>	0,34*	--	0,70**	--	--	0,59**	--	--	0,57**	0,71**	--	0,70**	--	--	X	--	--
<i>Sesleria albicans</i>	0,34*	--	--	--	--	--	--	--	0,57**	0,69**	0,70**	0,70**	0,43**	--	--	X	--
<i>Avenella flexuosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X
<i>Hypnum cupressiforme</i>	--	--	--	-0,45**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32*
<i>Dicranum scoparium</i>	--	--	--	-0,34*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,30*
<i>Pleurozium schreberi</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32*
<i>Ceratodon purpureus</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,30*
<i>Thuidium tamariscinum</i>	0,34*	--	--	--	--	--	--	--	0,57**	0,69**	0,70**	0,70**	0,43**	--	--	1**	--
<i>Hylocomium splendens</i>	--	--	0,48**	--	--	0,40**	--	--	0,38**	0,49**	--	--	--	--	0,70**	--	--
<i>Pohlia nutans</i>	--	--	--	0,31*	--	--	--	--	--	--	--	--	0,43**	--	--	--	--
<i>Pohlia lutescens</i>	--	--	--	0,37**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia drummondii</i>	--	--	--	0,45**	--	--	--	0,70**	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia sp.</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,36*
<i>Orthotrichum anomalum</i>	0,39**	0,30*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cynodontium polycarpum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	<i>Vaccinium vitis-idea</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Oxalis acetosella</i>	<i>Rumex acetosella</i>	<i>Melampyrum pratense</i>	<i>Luzula luzuloides</i>	<i>Helleborus niger</i>	<i>Silene nemoralis</i>	<i>Fragaria vesca</i>	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	<i>Euphorbia cyparissias</i>	<i>Trifolium alpestre</i>	<i>Hieracium murorum</i>	<i>Tanacetum corymbosum</i>	<i>Carex flacca</i>	<i>Sesleria albicans</i>	<i>Avenella flexuosa</i>
<i>Orthodicranum montanum</i>	0,34*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cetraria islandica</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia cervicornis</i>	--	--	--	0,41**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia arbuscula</i>	--	--	--	0,31**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia pyxidata</i>	--	--	--	0,42**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia furcata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia fimbriata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia rangiferina</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia squamosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia coniocraea</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia digitata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,31*
<i>Cladonia macroceras</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Porpidia macrocarpa</i>	--	--	--	0,55**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Die Korrelationen zwischen den **Moosen** und allen Pflanzenarten sind in Tabelle 26 aufgelistet.

Tabelle 26: Korrelationen (R<sup>2</sup>) zwischen den Moosen und allen Pflanzenarten (Spearman Test); (\*signifikant, \*\*hoch signifikant)

	<i>Hypnum cupressiforme</i>	<i>Dicranum scoparium</i>	<i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Thuidium tamariscinum</i>	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pohlia nutans</i>	<i>Pohlia lutescens</i>	<i>Pohlia drummondii</i>	<i>Pohlia sp.</i>	<i>Orthotrichum anomalum</i>	<i>Cynodontium polycarpum</i>	<i>Orthodicranum montanum</i>
<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	0,38**	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,43**	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Strauchsicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	--	--	--	0,30*	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Picea abies</i> Baumschicht	--	--	--	--	0,48**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Picea abies</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Baumschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Strauchsicht	--	--	--	--	--	--	0,71**	--	0,49**	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Krautschicht	--	--	--	0,29**	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Quercus petraea</i> Krautschicht	--	--	--	--	0,41**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	--	--	--	--	0,70**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Rosa canina</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	--	--	--	--	0,34*	--	--	--	--	--	0,39**	--	0,34*
<i>Vaccinium myrtillus</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,30*	--	--
<i>Oxalis acetosella</i>	--	--	--	--	--	0,48**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Rumex acetosella</i>	-0,45**	-0,34*	--	--	--	--	0,31*	0,37**	0,45**	--	--	--	--

	<i>Hypnum cupressiforme</i>	<i>Dicranum scoparium</i>	<i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Thuidium tamariscinum</i>	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pohlia nutans</i>	<i>Pohlia lutescens</i>	<i>Pohlia drummondii</i>	<i>Pohlia sp.</i>	<i>Orthotrichum anomalum</i>	<i>Cynodontium polycarpum</i>	<i>Orthodicranum montanum</i>
<i>Melampyrum pratense</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Luzula luzuloides</i>	--	--	--	--	--	0,40**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Helleborus niger</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Silene nemoralis</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	0,70**	--	--	--	--
<i>Fragaria vesca</i>	--	--	--	--	0,57**	0,38**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	--	--	--	--	0,69**	0,49**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Euphorbia cyparissias</i>	--	--	--	--	0,70**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Trifolium alpestre</i>	--	--	--	--	0,70**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Hieracium murorum</i>	--	--	--	--	0,43**	--	0,43**	--	--	--	--	--	--
<i>Tanacetum corymbosum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Carex flacca</i>	--	--	--	--	--	0,70**	--	--	--	--	--	--	--
<i>Sesleria albicans</i>	--	--	--	--	1**	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Avenella flexuosa</i>	0,32*	0,30*	0,32*	0,30*	--	--	--	--	--	-0,36*	--	--	--
<i>Hypnum cupressiforme</i>	X	0,52**	--	--	--	--	--	--	--	-0,31*	--	--	--
<i>Dicranum scoparium</i>	0,52**	X	0,44**	0,31*	--	--	--	--	--	-0,30*	--	--	--
<i>Pleurozium schreberi</i>	--	0,44**	X	0,38**	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Ceratodon purpureus</i>	--	0,31*	0,38**	X	--	--	--	--	--	--	--	0,41**	--
<i>Thuidium tamariscinum</i>	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Hylocomium splendens</i>	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia nutans</i>	--	--	--	--	--	--	X	--	0,70**	--	--	--	--
<i>Pohlia lutescens</i>	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--
<i>Pohlia drummondii</i>	--	--	--	--	--	--	0,70**	--	X	--	--	--	--

	<i>Hypnum cupressiforme</i>	<i>Dicranum scoparium</i>	<i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Ceratodon purpureus</i>	<i>Thuidium tamariscinum</i>	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pohlia nutans</i>	<i>Pohlia lutescens</i>	<i>Pohlia drummondii</i>	<i>Pohlia sp.</i>	<i>Orthotrichum anomalum</i>	<i>Cynodontium polycarpum</i>	<i>Orthodicranum montanum</i>
<i>Pohlia sp.</i>	-0,31*	-0,30*	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--
<i>Orthotrichum anomalum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--
<i>Cynodontium polycarpum</i>	--	--	--	0,41**	--	--	--	--	--	--	--	X	--
<i>Orthodicranum montanum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X
<i>Cetraria islandica</i>	--	0,42**	0,33*	0,33*	--	--	--	--	--	--	--	0,44**	--
<i>Cladonia cervicornis</i>	-0,29*	--	--	--	--	--	0,35*	--	--	--	--	0,31*	--
<i>Cladonia arbuscula</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia pyxidata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,29*	--
<i>Cladonia furcata</i>	--	0,49**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,31*	--
<i>Cladonia fimbriata</i>	--	--	--	--	--	--	--	0,33*	--	--	--	--	--
<i>Cladonia rangiferina</i>	--	0,55**	0,33*	0,32*	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia squamosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia coniocraea</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia digitata</i>	0,32*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia macroceras</i>	--	0,30*	--	0,30*	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Porpidia macrocarpa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32*	--	--	--
<i>Trapelia coarctata</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,45**	--	--	--

Die Korrelationen zwischen den **Flechten** und allen Pflanzenarten sind in Tabelle 27 aufgelistet.

Tabelle 27: Korrelationen ( $R^2$ ) zwischen den Flechten und allen Pflanzenarten (Spearman Test); (\*signifikant, \*\*hoch signifikant)

	<i>Cetraria islandica</i>	<i>Cladonia cervicornis</i>	<i>Cladonia arbuscula</i>	<i>Cladonia pyxidata</i>	<i>Cladonia furcata</i>	<i>Cladonia fimbriata</i>	<i>Cladonia rangiferina</i>	<i>Cladonia squamosa</i>	<i>Cladonia coniocraea</i>	<i>Cladonia digitata</i>	<i>Cladonia macroceras</i>	<i>Porpidia macrocarpa</i>	<i>Trapelia coarctata</i>
<i>Pinus sylvestris</i> Baumschicht	--	-0,60**	--	-0,55**	--	--	--	--	--	--	--	-0,56**	--
<i>Pinus sylvestris</i> Strauchschicht	--	0,31*	--	0,34*	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pinus sylvestris</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Picea abies</i> Baumschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32*	--	--	--
<i>Picea abies</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Baumschicht	0,42**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Strauchschicht	--	0,47**	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Larix decidua</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,38**	--
<i>Quercus petrea</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fraxinus excelsior</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Acer pseudoplatanus</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fagus sylvatica</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Crataegus monogyna</i> Krautschicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Rosa canina</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Vaccinium myrtillus</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Oxalis acetosella</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Rumex acetosella</i>	--	0,41**	0,31**	0,42**	--	--	--	--	--	--	--	0,55**	--
<i>Melampyrum pratense</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	<i>Cetraria islandica</i>	<i>Cladonia cervicornis</i>	<i>Cladonia arbuscula</i>	<i>Cladonia pyxidata</i>	<i>Cladonia furcata</i>	<i>Cladonia fimbriata</i>	<i>Cladonia rangiferina</i>	<i>Cladonia squamosa</i>	<i>Cladonia coniocraea</i>	<i>Cladonia digitata</i>	<i>Cladonia macroceras</i>	<i>Porpidia macrocarpa</i>	<i>Trapelia coarctata</i>
<i>Luzula luzuloides</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Helleborus niger</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Silene nemoralis</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Fragaria vesca</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Euphorbia amygdaloides</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Euphorbia cyparissias</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Trifolium alpestre</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Hieracium murorum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Tanacetum corymbosum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Carex flacca</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Sesleria albicans</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Avenella flexuosa</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,31*	--	--	--
<i>Hypnum cupressiforme</i>	--	-0,29*	--	--	--	--	--	--	--	0,32*	--	--	--
<i>Dicranum scoparium</i>	0,42**	--	--	--	0,49**	--	0,55**	--	--	--	0,30*	--	--
<i>Pleurozium schreberi</i>	0,33*	--	--	--	--	--	0,33*	--	--	--	--	--	--
<i>Ceratodon purpureus</i>	0,33*	--	--	--	--	--	0,32*	--	--	--	0,30*	--	--
<i>Thuidium tamariscinum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Hylocomium splendens</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia nutans</i>	--	0,35*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia lutescens</i>	--	--	--	--	--	0,33*	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia drummondii</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Pohlia sp.</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32*	0,45**
<i>Orthotrichum anomalum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	<i>Cetraria islandica</i>	<i>Cladonia cervicornis</i>	<i>Cladonia arbuscula</i>	<i>Cladonia pyxidata</i>	<i>Cladonia furcata</i>	<i>Cladonia fimbriata</i>	<i>Cladonia rangiferina</i>	<i>Cladonia squamosa</i>	<i>Cladonia coniocraea</i>	<i>Cladonia digitata</i>	<i>Cladonia macroceras</i>	<i>Porpidia macrocarpa</i>	<i>Trapelia coarctata</i>
<i>Cynodontium polycarpum</i>	0,44**	0,31*	--	0,29*	0,31*	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Orthodicranum montanum</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cetraria islandica</i>	X	--	--	--	0,40**	--	0,50**	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia cervicornis</i>	--	X	0,31*	0,54**	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia arbuscula</i>	--	0,31*	X	0,34*	--	--	--	0,40**	0,49**	--	--	0,31*	--
<i>Cladonia pyxidata</i>	--	0,54**	0,34*	X	--	--	--	--	--	--	--	0,44**	0,34**
<i>Cladonia furcata</i>	0,40**	--	--	--	X	--	0,49**	--	--	--	--	--	--
<i>Cladonia fimbriata</i>	--	--	--	--	--	X	--	--	--	0,30**	--	--	--
<i>Cladonia rangiferina</i>	0,50**	--	--	--	0,49**	--	X	0,38**	--	--	0,55**	--	--
<i>Cladonia squamosa</i>	--	--	0,40**	--	--	--	0,38**	X	--	--	--	--	--
<i>Cladonia coniocraea</i>	--	--	0,49**	--	--	--	--	--	X	0,79**	--	--	--
<i>Cladonia digitata</i>	--	--	--	--	--	0,30**	--	--	0,79**	X	--	--	--
<i>Cladonia macroceras</i>	--	--	--	--	--	--	0,55**	--	--	--	X	--	--
<i>Porpidia macrocarpa</i>	--	--	0,31*	0,44**	--	--	--	--	--	--	--	X	0,31*
<i>Trapelia coarctata</i>	--	--	--	0,34*	--	--	--	--	--	--	--	0,31*	X

### 5.5.4 Vegetationsschichten (Kruskal-Wallis Test)

Wie in Abbildung 214 ersichtlich sind auf sehr skelettarmen bis mäßig skelettreichen Standorten meist alle fünf Vegetationsschichten vorhanden. Nur in sehr skelettreichen Bereichen liegt der Median bei vier Vegetationsschichten (Legende **Skelettanteil** siehe Tabelle 3).

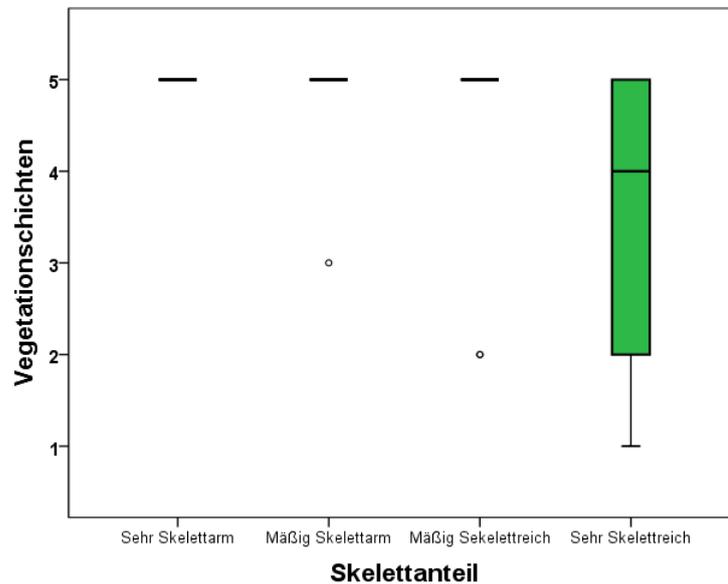


Abbildung 214: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Skelettanteil (Kruskal-Wallis Test)

Hoch signifikante Unterschiede der Anzahl in den Vegetationsschichten treten bei steigendem **pH-Wert** auf. Nur im schwach Sauren ist eine größere Streuung zu erkennen (Abbildung 215) (Legende pH-Wert siehe Tabelle 3).

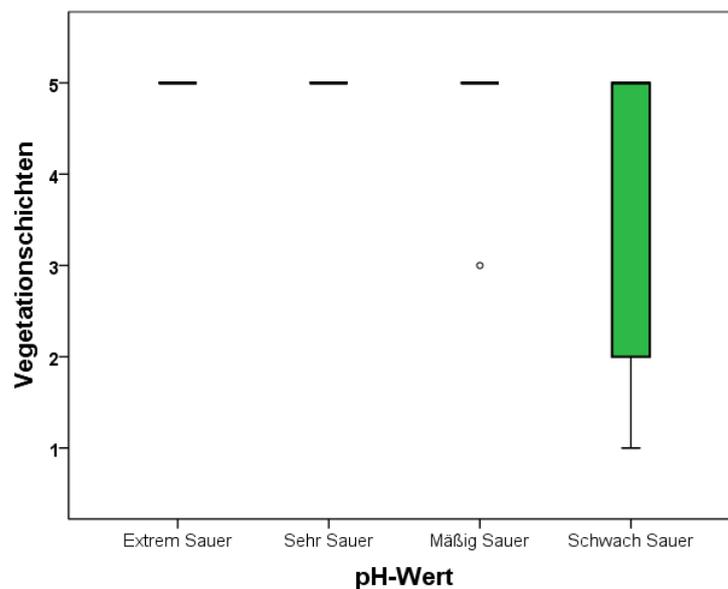


Abbildung 215: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Skelettanteil (Kruskal-Wallis Test)

Im humusarmen bis humosen Bereich sind meist alle fünf Vegetationsschichten vorzufinden. Die humusfreien Standorte weisen zwei bis fünf Vegetationsschichten auf (Abbildung 216). Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant, da einige Ausreißer vorhanden sind (Legende **Humusanteil im Feinboden** siehe Tabelle 3).

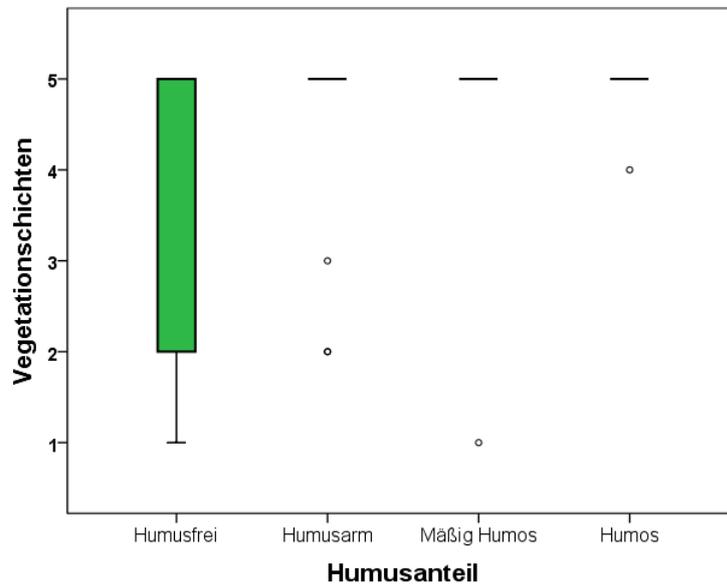


Abbildung 216: keine signifikanten Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Humusanteil im Feinboden (Kruskal-Wallis Test)

Während manganfreie und manganarme Messpunkte meist alle fünf Vegetationsschichten vorweisen, kommen im mäßig manganreichen Bereich vier bis fünf Vegetationsschichten vor. Im sehr Manganreichen liegt der Median bei vier Vegetationsschichten (Abbildung 217) (Legende **Mangan-Gesamtgehalt** siehe Tabelle 3).

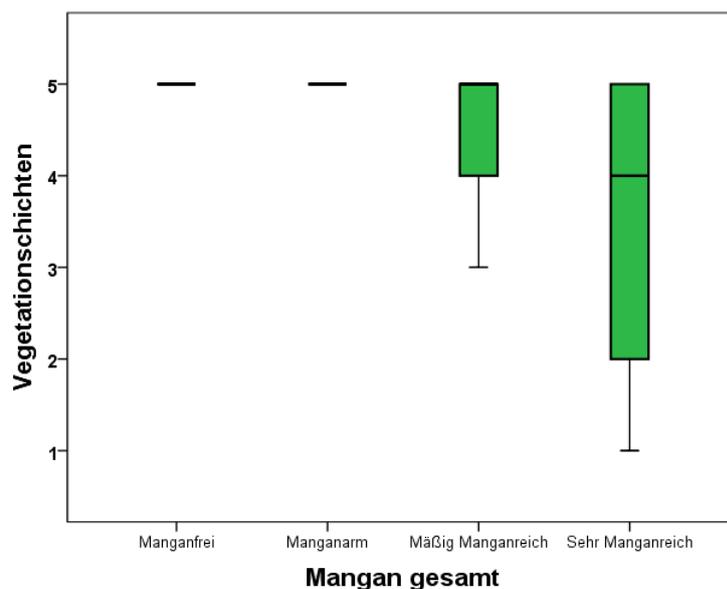
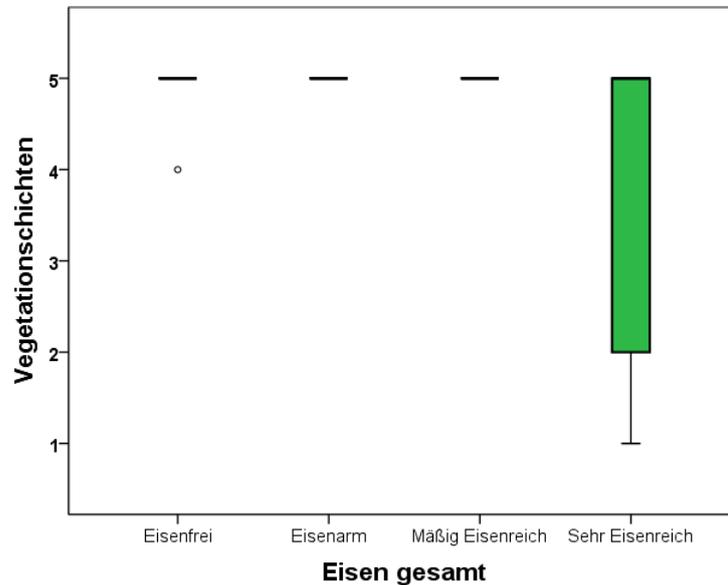


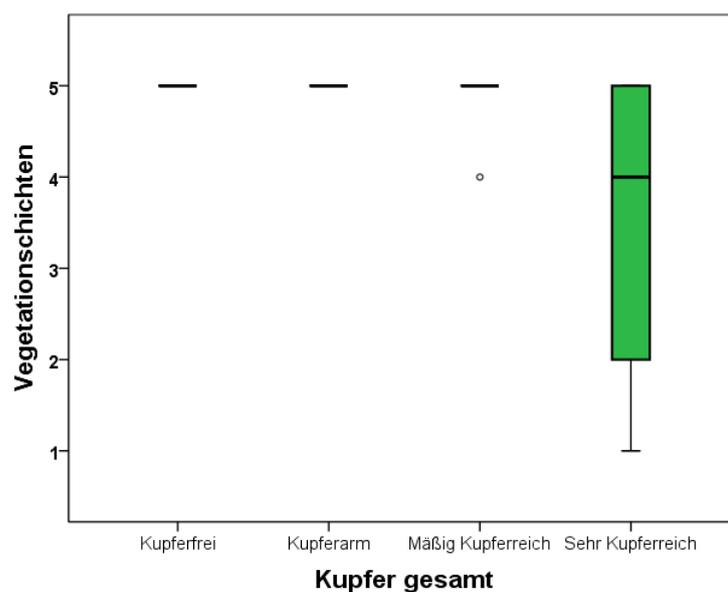
Abbildung 217: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] (Kruskal Wallis Test)

Die Ergebnisse der Anzahl von Vegetationsschichten bei steigendem **Eisen-Gesamtgehalt** sind ähnlich den Ergebnissen bei steigendem pH-Wert. Im Eisenfreien bis mäßig Eisenreichen sind meist fünf Vegetationsschichten vorhanden. Sehr eisenreiche Standorte weisen zwei bis fünf Vegetationsschichten auf (Abbildung 218) (Legende Eisen-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).



**Abbildung 218: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] (Kruskal-Wallis Test)**

Aus Abbildung 219 ist ersichtlich, dass in kupferfreien bis mäßig kupferreichen Bereichen alle fünf Vegetationsschichten vorhanden sind. An sehr kupferreichen Standorten sinkt der Median auf vier Vegetationsschichten (zwei bis fünf Vegetationsschichten können zugeordnet werden) (Legende Kupfer-Gesamtgehalt siehe Tabelle 3).



**Abbildung 219: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] (Kruskal-Wallis Test)**

## 5.6 Analyse von *Rumex acetosella*

*Rumex acetosella* enthält in seinem Spross durchschnittlich  $964 \pm 399$  mg/kg Kupfer, der Maximalwert liegt bei 2.044,36 mg/kg Kupfer.

Der Zwergsauerampfer weist keine Korrelationen mit anderen untersuchten Parametern auf. Am ehesten korreliert *Rumex acetosella* mit dem Kupfer-Gesamtgehalt (Signifikanz von 0,09).

Je geringer die **Beschattung** der Pflanze ist, desto höher ist der **Kupfergehalt** im *Rumex acetosella*. An vollsonnigen Messpunkten beträgt der Kupfergehalt in dieser Pflanze etwa 1.000 mg/kg, im Halbschatten liegt der Kupfergehalt bei etwa 750 mg/kg (Abbildung 220). Die Ergebnisse zeigen jedoch keinen signifikanten Unterschied auf.

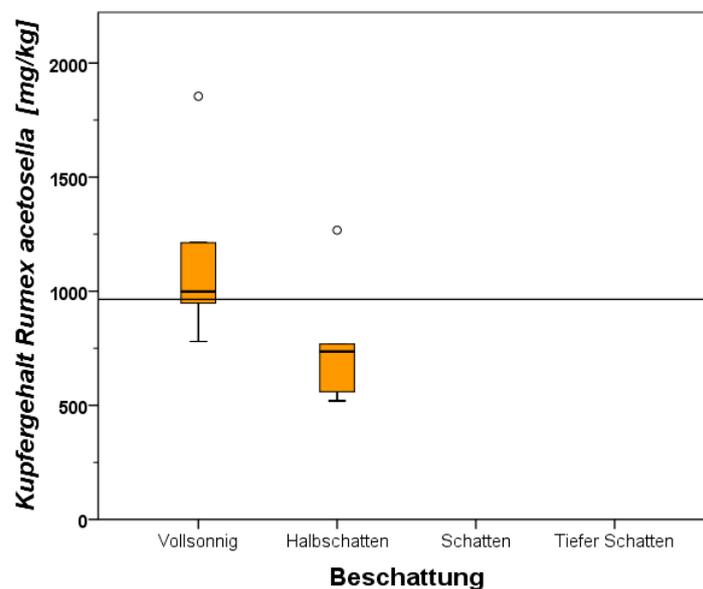


Abbildung 220: Kupfergehalt im *Rumex acetosella* bei zunehmender Beschattung

*Rumex acetosella* enthält in seinem Spross durchschnittlich  $4.474,12 \pm 2.410,57$  mg/kg Mangan, der Maximalwert liegt bei 11.429,29 mg/kg.

Je geringer die **Beschattung** der Pflanze ist, desto höher ist der **Mangangehalt** im *Rumex acetosella*. Im vollsonnigen Bereich beträgt der Mangangehalt im Zwergsauerampfer etwa 5000 mg/kg. Im Halbschatten liegt der Mangangehalt in der Pflanze bei etwa 3000 mg/kg (Abbildung 221).

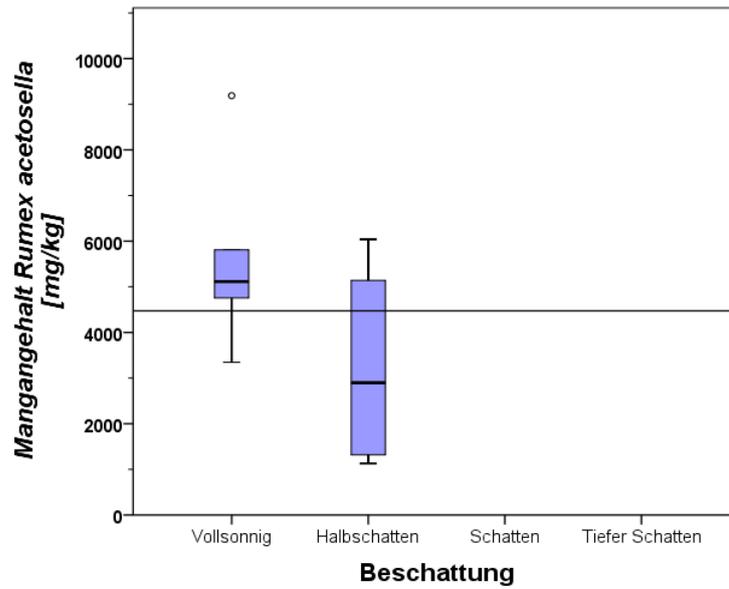


Abbildung 221: Mangangehalt im *Rumex acetosella* bei zunehmender Beschattung

Die **Photosynthese** von *Rumex acetosella* liegt bei  $0,79 \pm 0,05 F_v/F_m$ . Aus Abbildung 222 geht hervor, dass im Vollsonnigen und im Halbschatten die Photosyntheserate von *Rumex acetosella* etwa  $0,8 F_v/F_m$  beträgt.

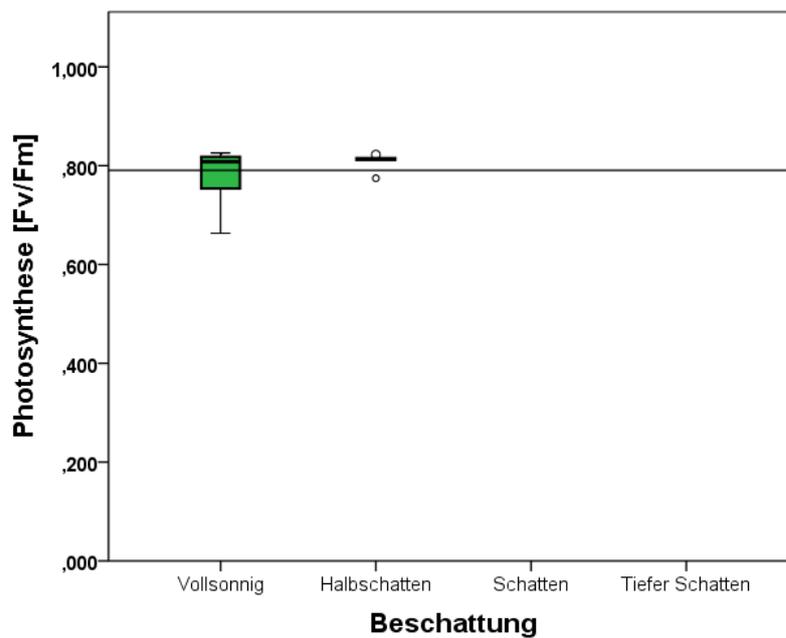


Abbildung 222: Photosynthese von *Rumex acetosella* bei zunehmender Beschattung

Die **Photosynthese** nimmt mit steigendem **verfügbarem Kupfer** [mg/kg] zu (Abbildung 223). Die Photosyntheserate hängt am ehesten mit dem verfügbaren Kupfer [mg/kg] zusammen.

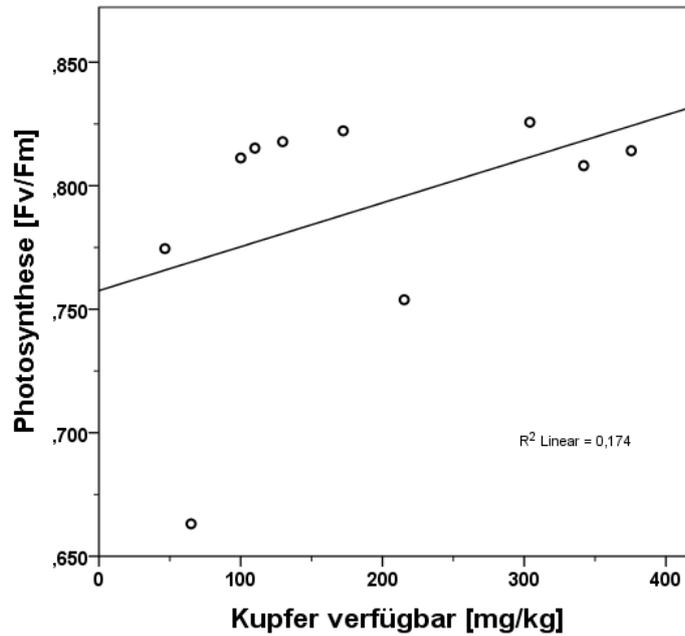


Abbildung 223: Photosynthese von *Rumex acetosella* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]

*Rumex acetosella* erreicht seinen höchsten **Deckungsgrad** von zwei bei 80-390 mg/kg verfügbarem Kupfer (Abbildung 224).

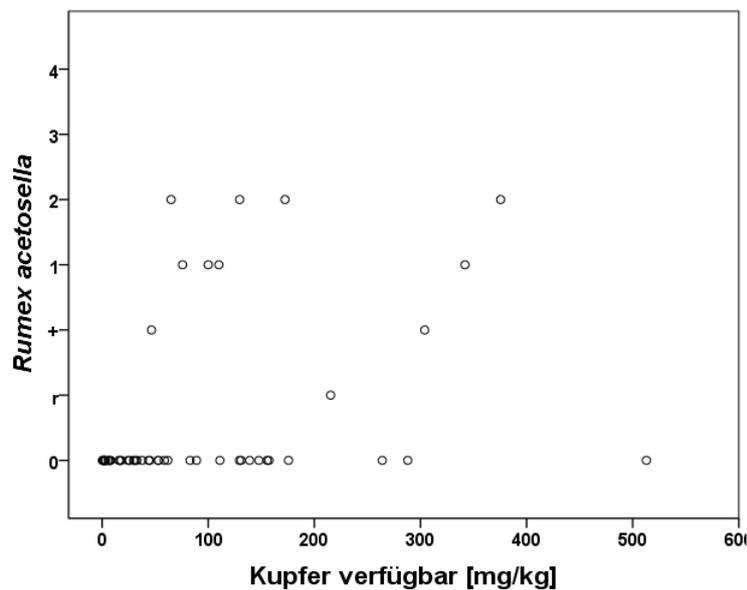


Abbildung 224: Deckungsgrad von *Rumex acetosella* bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg]

## 6 Diskussion

Die Schwermetallhalde am Knappenberg bei Edlach an der Rax (NÖ, AUT) zeichnet sich durch eine ausgeprägt azonale Vegetation aus. Sie ist artenreich an Flechten und grenzt sich deutlich zum umliegenden Wald ab.

Mittels Bodenanalysen und Vegetationsanalysen wurde die Wirkung unterschiedlicher Parameter auf die Vegetation des Untersuchungsgebietes herausgearbeitet.

### 6.1 Mikroklima

Im Untersuchungsgebiet wurde ein für diese Jahreszeit repräsentativer (ZAMG, 2002), Tagesgang gemessen (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Wind, Bewölkungsgrad, Strahlung, Rückstrahlung, Temperatur der Bodenoberfläche, Bodentemperatur in 10 cm Tiefe, Bodentemperatur in 30 cm Tiefe). Aus diesen Ergebnissen lassen sich Schlussfolgerungen ziehen, welche Klima-Parameter daran beteiligt sein könnten, dass auf der Halde ein für Pflanzen extremer Standort herrscht.

Die Lufttemperatur auf der Halde (durchschnittlich 18,9°C) und im Wald (durchschnittlich 18,6°C) weist keine großen Unterschiede auf (Abbildung 13). Die relative Luftfeuchte weist ebenfalls keine starken Unterschiede zwischen Halde (durchschnittlich 54,6%) und umliegendem Wald (durchschnittlich 54%) auf (Abbildung 14). Man kann also davon ausgehen, dass sowohl die Lufttemperatur als auch die relative Luftfeuchte keinen Einfluss auf die Verteilung der Vegetation im zu untersuchenden Gebiet hat. Die Ergebnisse der Lufttemperaturspannweite bei HW 15 und 16 (südlicher Wald) waren im Gegensatz zum nördlichen (linken) Wald mit HW 12 und 13 um etwa 5 °C höher. Grund dafür könnte der NW-Wind sein, der die Haldenluft in den südlichen Wald hineinbläst.

Der Messpunkt HW 14 direkt auf der Halde ist ganztägig wärmer als die umliegenden Messpunkte am Waldrand und im Wald. Die Wärme staut sich in der warmen Jahreszeit nahe der Bodenoberfläche und erhitzt diese im Gegensatz zur Bodenoberfläche im Wald stärker.

Die Strahlung erreicht auf der Halde (HW 14) ihr Maximum bei 108.600 Lux. Im Wald hingegen liegen die Maximumwerte der Strahlung bei 65.500 Lux (HW 16) und 17.790 Lux (HW12). Auf der Halde fehlen die Bäume und somit auch die Beschattung. Deshalb trifft die Strahlung direkt auf die Bodenoberfläche und heizt sie auf.

Schaut man sich nun die Ergebnisse der Temperaturmessungen an der Bodenoberfläche an (Abbildung 18), so zeigen diese, dass die Temperatur der Bodenoberfläche ihr Maximum bei

42,6°C hat. Im Wald liegen die Temperaturmaxima hingegen nur bei 18,1°C auf HW 12 und 26,3°C auf HW 16. Das heißt die Temperatur der Bodenoberfläche auf der Halde ist fast doppelt so hoch wie jene im Wald. Der relativ dunkel gefärbte Limonit auf der Halde absorbiert viel Strahlung. Aus diesem Grund kann sich die Halde auch so enorm aufheizen.

Abbildung 17 zeigt, dass die Werte der Rückstrahlung im Wald, am Waldrand und auf der Halde keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Nachdem der relativ dunkle Limonit einen großen Teil der Strahlung absorbiert, bleibt eine hohe Rückstrahlung auf der Halde aus.

Diese Erkenntnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Verhältnisse direkt auf der Halde (HW 14) in Bodennähe mit einer starken Einstrahlung und einer stark erhöhten Temperatur der Bodenoberfläche einen extremen Standort für die Vegetation darstellen.

## **6.2 Geologie und Boden**

Das ursprüngliche Erz enthält Sulfide, welche während der Verwitterung zu Sulfaten oxidieren, die wiederum relativ leicht löslich sind und ausgewaschen werden. Es konnten keine nennenswerten Sulfat-Gehalte nachgewiesen werden. Dies könnte eine Erklärung dafür liefern, dass kaum mehr Primärerze im Boden sind, die verwittern könnten. Außerdem war kaum Sulfid, sondern eher Karbonat auf der Halde zu finden.

### **6.2.1 Radioaktivität**

Die Messungen ergaben mit  $310 \pm 13$  mBq definitiv keine erhöhte Radioaktivität auf der Halde. Steinhauser (pers. Mitteilung) hat bei Untersuchungen bis zu 22,3 ppm Uran auf der Halde gefunden, welche unter der Annahme einer Halbwertszeit von 4,5 Mrd. Jahren jedoch nicht zur Radioaktivität beitragen ( $5 \text{ Zerfälle kg}^{-1}\text{s}^{-1}$ ). Die gemessene Radioaktivität von 310 mBq ist also auf die allgegenwärtige Hintergrundstrahlung zurückzuführen.

### **6.2.2 pH-Wert**

Für einen Schwermetallstandort weist diese Abraumhalde einen recht hohen pH-Wert von ca. 4,4 auf (Abbildung 40). Ursprünglich wurden Karbonate (Siderit) und Sulfide (Chalkopyrit) abgebaut. Kupfer-Sulfid wird über Zwischenstufen in Malachit oder Azurit umgewandelt, die unter atmosphärischen Bedingungen stabile Kupfer-Formen sind. Aktuell sind auf der Halde keine Verbindungen mehr vorhanden, die Säure abgeben könnten. Hinzu kommt, dass Karbonat ein guter Puffer ist. Der umgebende Waldboden hingegen wird durch Niederschläge, Humusaufgabe und Nadelstreu von *Pinus sylvestris* angesäuert (pH ca. 3,3). Je humoser der Boden ist, desto geringer ist der pH-Wert.

### **6.2.3 Bodenskelett**

Auf der Halde dominiert die grobe Fraktion mit >80% (Abbildung 28), der Feinerdeanteil ist mit ca. 17% sehr gering (Abbildung 30). Die weitgehend groben Steine, ca. 60-88 % Skelettanteil im gesamten Untersuchungsgebiet, sind jedoch in allen Clustern zu finden, nur sind diese im Wald im Gegensatz zur Halde von Feinerde bedeckt.

Der Sandanteil ist auf der Halde mit etwa 57% signifikant höher als im Wald mit ca. 38% (Abbildung 36).

Schluff-, Ton- und Humusanteile sind im Wald höher, als auf der Halde (Abbildung 31, Abbildung 32, Abbildung 33, Abbildung 37),

Der höhere Gehalt von Humus im Wald liefert eine Erklärung für die im Gegensatz zum Wald (ca. 100%) viel geringere WHC auf der Halde mit etwa 50% (Abbildung 39). Humus besitzt eine hohe WHC, er vermag ca. das 3-5fache seines Eigengewichts an Wasser zu speichern (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Die WHC hängt in diesem speziellen Fall ausschließlich vom Humusgehalt ab, nicht jedoch wie allgemein vermutet auch vom Tonanteil. Ein kleiner Bereich des Untersuchungsgebiets (HW 12, 21, 22, 26) weist einen besonders hohen Tongehalt auf, dies hat auch eine deutlich veränderte Vegetationszusammensetzung zur Folge. Auf diesen Messpunkten sind u.a. *Melampyrum pratense*, *Fragaria vesca*, *Luzula luzuloides*, *Vaccinium vitis-idea*, *Oxalis acetosella* und *Helleborus niger* vertreten. Ein Grund für den erhöhten Tongehalt in diesem bestimmten Bereich konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.

### **6.2.4 Wassergehalt aktuell**

Der aktuelle Wassergehalt beträgt auf den Clustern der *Halde* ca. 20-40% und den Clustern im *Wald* etwa 60%. Der Cluster *Wald (Avenella und Vaccinium)* weist mit 130% den höchsten aktuellen Wassergehalt auf (Abbildung 86).

Der aktuelle Wassergehalt sinkt mit steigendem Skelettanteil (Abbildung 89) und sinkendem Humusanteil im Feinboden (Abbildung 91). Überraschenderweise traten zwischen den Werten von Ton im Feinboden bzw. Feinschluff im Feinboden und den Werten des aktuellen Wassergehalts keine Korrelationen auf.

Bei den Ergebnissen sind Co-Korrelationen aufgetreten, so nimmt etwa der aktuelle Wassergehalt bei steigendem pH-Wert ab (Abbildung 90). Der pH-Wert ist jedoch eine Folge des Humus-Gehaltes (je mehr Humus, desto niedriger ist der pH-Wert) und dürfte selbst keinen Einfluss auf den Wassergehalt haben.

### **6.2.5 Dämpfungstiefe**

Die Dämpfungstiefe ist im Wald mit 40 cm (HW 12) und 32 cm (HW 16) am höchsten. Am Waldrand nimmt die Dämpfungstiefe ab, 19 cm bei HW 13 und 29 cm bei HW 15. Die geringste Dämpfungstiefe von 18 cm tritt beim Messpunkt HW 14 direkt auf der Halde auf (Abbildung 21). Grundsätzlich leiten Minerale (Wärmeleitfähigkeit etwa  $88 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , Wärmekapazität  $2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ) die Wärme ca. 30mal besser als Humus (Wärmeleitfähigkeit etwa  $2,5 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , Wärmekapazität  $2,5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Es ist zu erwarten, dass sich die Wärmeleitfähigkeit des Bodens mit dem Wassergehalt und der Bodenstruktur ändert. Wasser leitet die Wärme etwa 25mal besser als Luft, Luft wirkt als Wärmeisolator im Boden (Fiedler, 2001). Dies setzt jedoch voraus, dass der Wassergehalt auf der Halde und im Wald gleich ist.

Im Untersuchungsgebiet speichert der Humus im Wald das Wasser. Da Wasser die Wärme besser leitet als Luft ist der Humus als Isolation in diesem Fall irrelevant. Im Zuge der Untersuchungen ist ein geringerer Wassergehalt auf der Halde festgestellt worden. Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Luft zwischen den Gesteinen gut isoliert und so die Wärme auf der Halde nur schlecht in den Boden abgeleitet werden kann (Korrelation zwischen den Werten der WHC und den Werten der Dämpfungstiefe siehe Abbildung 24). Eine lineare Korrelation zwischen der Dämpfungstiefe und dem Sandanteil im Feinboden ergibt  $R^2=0,49$ . Die Dämpfungstiefe nimmt mit steigendem Sandanteil im Feinboden ab (Abbildung 25).

Die geringe Dämpfungstiefe auf der Halde könnte einen Erklärungsansatz dafür liefern, warum sich die Halde und die Haldenoberfläche so aufheizen. Die Wärme kann nicht nach unten in den Boden abgeleitet werden.

### **6.2.6 Nährstoffe**

Verfügbares Kalium ( $> 100 \text{ mg/kg}$ ) und verfügbares Phosphat ( $16 \text{ mg/kg}$ ) wurden im umliegenden Wald nachgewiesen (Abbildung 42, Abbildung 43). Die Nährelemente Eisen ( $250.000 \text{ mg/kg}$ ) und Mangan ( $28.000 \text{ mg/kg}$ ) sind auf der Halde zwar reich vorhanden (Abbildung 44, Abbildung 46), für Pflanzen aber nicht verfügbar. Nitrat konnte nicht nachgewiesen werden. Es sind also alle Messpunkte nährstoffarm, wobei die Halde noch nährstoffärmer ist als der Wald. Auf der Halde könnte der Nährstoffmangel eine wichtige Rolle bei der Zusammensetzung der Vegetation spielen. Mangels Ton und Humus auf der Halde werden die Nährstoffe dort nicht gebunden und daher ausgewaschen.

Interessante Ergebnisse der Bodenparameter lieferte der Messpunkt HW 19 direkt auf der Halde. Entgegen den Erwartungen weist dieser Messpunkt für die Halde einen recht geringen Gesamtgehalt an Mangan, Eisen und Kupfer auf. Auch der pH-Wert liegt bei  $< 3$  und der Skelettanteil bei  $< 40\%$ . Der Humus im Feinboden ergab  $> 15\%$ . Dieser Messpunkt liegt dort, wo

die Halde am schmalsten ist und bereits *Vaccinium myrtillus*, *Avenella flexuosa*, *Hypnum cupressiforme*, *Dicranum scoparium* und *Pleurozium schreberi* mit hohen Deckungsgraden auftreten. Eine Erklärung für diese „Ausreißer-Werte“ auf der Halde könnte sein, dass in diesem Bereich durch die Humusbildung pH-Wert und Skelettanteil gesunken sind und somit das Auftreten einer geschlossenen Vegetationsdecke möglich machen.

### 6.3 Schwermetalle

Steinhauser (pers. Mitteilung) führte auf der Abraumhalde an zwei Messpunkten Neutronenaktivierungen (Tabelle 28) durch, deren Ergebnisse mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen und diskutiert werden. Die Ergebnisse der Neutronenaktivierung in Tabelle 28 sind nicht höher als die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse. Man kann also davon ausgehen, dass die in dieser Arbeit verwendete Methode des Königswasseraufschlusses alle im Boden vorhandenen Schwermetalle extrahiert hat.

**Tabelle 28: Elementgehalte [mg/kg] auf der Halde am Knappenberg, Steinhauser (pers. Mitteilung)**

	HW1; A/1	HW2; A/5
<b>Na</b>	1.000,00	900,00
<b>K</b>	18.000,00	12.000,00
<b>Sc</b>	2,69	2,92
<b>Cr</b>	19,13	21,79
<b>Mn</b>	16.900,00	9.400,00
<b>Fe</b>	160.000,00	62.000,00
<b>Co</b>	43,97	41,99
<b>Cu</b>	4.600,00	4.200,00
<b>Zn</b>	91,97	108,42
<b>As</b>	1.165,29	450,71
<b>Rb</b>	26,69	39,88
<b>Zr</b>	72,12	55,90
<b>Sb</b>	998,28	553,76
<b>Cs</b>	2,47	3,65
<b>Ba</b>	1.373,28	9.224,15
<b>La</b>	10,44	15,00
<b>Ce</b>	20,17	29,07
<b>Nd</b>	122,50	90,96
<b>Sm</b>	3,98	3,70
<b>Eu</b>	1,10	0,98
<b>Tb</b>	0,55	0,34
<b>Lu</b>	0,08	0,14
<b>Hf</b>	1,00	1,11
<b>Ta</b>	0,13	0,10

<b>Th</b>	2,02	2,91
<b>U</b>	10,17	22,30

Auffallend bei den Ergebnissen von Steinhauser sind die erhöhten Werte von Arsen, Antimon Neodym und Barium. Das Barium bildet mit dem leicht löslichen, durch Verwitterung entstandenen Sulfat einen Komplex (Baryt). Somit ist es nicht löslich und wirkt daher mit Sicherheit nicht toxisch.

Das Vorhandensein von Arsen und Antimon (Fahlerz  $(\text{Cu}, \text{Ag}, \text{Fe}, \text{Zn})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ - $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Ag}, \text{Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ) auf der Halde wird bereits von Bode (1994) aufgezeigt. Nach Steinhauser et al. (Steinhauser *et al.*, 2009) können Arsen und Antimon einen deutlichen Einfluss auf die Vegetation haben, möglicherweise tragen auch diese beiden Elemente zur Verbreitung der einzelnen Pflanzenarten bei.

### **6.3.1 Mangan**

Ähnlich dem Eisen ist das Mangan direkt auf der Halde mit 28.000 mg/kg Boden in großen Mengen vorhanden (Abbildung 45), ist aber dort mit < 1 mg/kg nur gering verfügbar (Abbildung 52). Das Mangan ist auf der Halde im Skelettanteil und Sand gebunden.

Die Mangan-Verfügbarkeit ist abhängig vom pH-Wert. Mangan-Oxide und Mangan-Komplexe sind die wichtigsten Mangan-Reserven für die Pflanzen. Sie stehen mit den  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen in der Bodenlösung im pH-abhängigen Gleichgewicht. Sinkt der pH-Wert um eine Einheit, erhöht dies die Löslichkeit im Boden und bewirkt somit eine Zunahme der  $\text{Mn}^{2+}$ -Konzentration (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Die Halde weist einen höheren pH-Wert (ca. 4,4) auf als der umgebende Wald (etwa 3,3). Dies ist vermutlich der Grund für die schlechte Verfügbarkeit des Mangans auf der Halde. Weiters ist das Mangan an Schluff- und Humuspartikel gebunden, die im Wald, jedoch kaum auf der Halde vorkommen.

### **6.3.2 Eisen**

Der größte Teil der Abraumhalde besteht aus eisenhaltigem Gestein (bis zu 25%). Rein rechnerisch besteht die Halde aus bis zu 77% Siderit beziehungsweise 59% Limonit. Das Pflanzen verfügbare Eisen ist auf der Abraumhalde praktisch nicht vorhanden (Abbildung 53 - Abbildung 54). Diese Erkenntnisse werfen die Frage auf, ob die Pflanzen auf der Halde an Eisenmangel leiden.

Die Werte der prozentuellen Eisen-Verfügbarkeit korrelieren mit den Werten der WHC ( $R^2=0,71^{**}$ ). Je weniger Wasser vorhanden ist, desto höher ist der Sauerstoffgehalt und desto

geringer ist die prozentuelle Eisen-Verfügbarkeit. Eisen liegt unter aeroben Bedingungen vor allem in Form von Fe(III)-Oxiden und silikatischen Bindungen im Boden vor. Bei den Oxiden sind Goethit und Hämatit sehr stabile Verbindungen, in denen das Eisen unter oxidierenden Bedingungen in einer kaum für die Pflanzen verfügbarer Form vorliegt. Unter anaeroben Bedingungen können nach Reduktion von Fe(III)-Oxiden zu Fe<sup>2+</sup>-Ionen hohe Fe<sup>2+</sup> Konzentrationen in der Bodenlösung vorliegen (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Die Eisen-Verfügbarkeit im Boden wird unter aeroben Bedingungen zwischen kristallinen Fe(III)-Oxiden und löslichen organischen Komplexbildnern bestimmt, welche die löslichen Fe(II,III)-Komplexe bilden. Die Eisen-Mobilisierung wird durch lösliche Fulvo- und Huminsäuren oder durch Wurzelexsudate der Pflanze bewirkt (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Diese Fakten erklären sowohl die festgestellte Korrelation zwischen den Werten des verfügbaren Eisens [mg/kg] und den Werten des Humus im Feinboden ( $R^2=0,54^{**}$ ) als auch den Unterschied der Eisen-Verfügbarkeit zwischen Halde und Wald.

Diese Erkenntnisse lassen die Vermutung zu, dass viele Pflanzenarten, die im umliegenden Wald vorkommen nicht durch das vorhandene Kupfer, sondern durch zu wenig verfügbares Eisen und daraus resultierende Eisen-Mangelercheinungen die Halde meiden.

### **6.3.3 Kupfer**

Das Gestein der Halde enthält bis zu 1% Kupfer. Auch im umgebenden Waldboden sind stark erhöhte Kupferwerte gemessen worden (Abbildung 49). Mit > 100 ppm ist das Kupfer auf der Halde am besten verfügbar (Abbildung 56).

Ca. 9.000 mg/kg Boden Kupfer-Gesamtgehalt zeichnen die Halde aus (Abbildung 48), Bouslama (2006) gibt für die am stärksten kontaminierten Bereiche der Halde einen Wert von 5.305,82 mg/kg an. Steinhauser (pers. Mitteilung) nur einen Kupfer-Gesamtgehalt von 4.600 mg/kg. Für das Zustandekommen dieser unterschiedlich hohen Werte kommen verschiedenen Erklärungsansätze in Frage. So analysierte Bouslama (2006) lediglich den Auflagehumus, in der vorliegenden Arbeit wurden jedoch die Bodenproben bis in einer Tiefe von 30 cm genommen und analysiert.

Aus der Karte (Abbildung 49) ist ersichtlich, dass sich auf der Halde Messpunkte mit einem Kupfer-Gesamtgehalt vom > 6.000 mg/kg, aber auch zwei Messpunkte mit < 2.000 mg/kg Kupfer befinden. Da die Stichprobenzahl sowohl bei Steinhauser (pers. Mitteilung) als auch bei Bouslama (2006) sehr klein ist, ist davon auszugehen, dass ihre Ergebnisse nicht die der gesamten Abraumhalde repräsentieren.

Für eine Kupfer-Halde stellen die gemessenen Ergebnisse keinen außergewöhnlich hohen Wert bezüglich des Kupfer-Gesamtgehaltes dar. Auf der verwachsenen Schutthalde der Schwarzwand,

die mit großen Mengen an kupferhaltigem Schlamm überzogen ist, stellte Hus (2008) einen Kupfer-Gesamtgehalt von 6.910 mg/kg fest.

In der Slowakei in Rudnay wurden Werte > 3.000 mg/kg, in Cechy (Slowakei) sogar Werte zwischen 3.000 mg/kg und 11.000 mg/kg gemessen (Hubalek & Müllner, 2007).

Aus den hohen Korrelationen zwischen den Werten des Eisen-Gesamtgehaltes (Abbildung 103) bzw. Kupfer-Gesamtgehaltes (Abbildung 104) und den Werten des Skelettanteils lässt sich schließen, dass ein großer Teil des Eisen-Gesamtgehalts bzw. Kupfer-Gesamtgehalts im Sand (wahrscheinlich abgebröckelt von den Steinen) lokalisiert und somit nicht verfügbar ist.

Die prozentuelle Verfügbarkeit von Kupfer ist zwar auf der Halde höher, nicht jedoch signifikant höher als im Wald (Abbildung 55, Abbildung 61). Wendet man den statistischen Anova-Test an, wäre bei der prozentuellen Kupfer-Verfügbarkeit auch ein signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald zu erkennen. Die unterschiedlichen Ergebnisse sind wahrscheinlich auf zu wenige Stichproben zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen eine im Vergleich zur Halde ähnlich hohe Verfügbarkeit des Kupfers [mg/kg] im Wald (Abbildung 56). Dies bestärkt die Annahme, dass die Anwendung von Ammoniumnitrat als Extraktionsmittel überdacht werden sollte.

Das Kupfer ist auch weit unterhalb am Fuße der Halde im Wald zu finden (HW 41, 42, 46, 48). Da überall im Untergrund Steine und Kupfer zu finden sind, liegt die Vermutung nahe, dass einiges Abraummateriale von der Halde in den Wald gerutscht ist. Sobald sich in diesem Waldabschnitt am Fuße der Halde aus der Nadelstreu Rohhumus bildet kann sich eine Vegetationsdecke über dem Abraummateriale entwickeln.

#### **6.3.4 Zink, Kadmiun und Blei**

Diese Schwermetalle liegen im Untersuchungsgebiet in normalen, durchschnittlichen Konzentrationen vor. Die Gesamtgehalte von Zink und Blei weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen Halde und Wald auf. Der Kadmiun-Gesamtgehalt ist mit ca. 0,76 mg/kg signifikant höher als im Wald mit 0,46 mg/kg (Abbildung 50). Diese Schwermetalle stammen wahrscheinlich nicht aus den Erzen. Der Bleigehalt weist auf der Halde die geringste Konzentration auf. Die Bleikonzentrationen im Wald sind wahrscheinlich auf die Luftverschmutzung zurückzuführen, Blei bindet außerdem leicht an den Humus im Wald.

Die Verfügbarkeiten von Zink und Kadmiun korrelieren stark positiv mit einander ( $R^2=0,91^{**}$ ). Zurückführen kann man das darauf, dass sie sich chemisch sehr ähnlich sind (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Auf der Halde sind diese Schwermetalle kaum verfügbar (Abbildung 62 Abbildung 64), da sie keine Partikel zum Binden haben und somit wahrscheinlich ausgewaschen werden. Im Wald können diese Schwermetalle z.B. an Humus und Ton binden und weisen dort eine höhere Verfügbarkeit auf. Zink- und Kadmiunminerale wurden auf der Halde nicht

gefunden. Scheffer & Schachtschabel (2002) weisen auf eine Zink-Zufuhr durch Niederschläge sowie einen beträchtlichen Zink-Eintrag in den Boden durch Staubbiederschlag in der Nähe von Ballungsräumen hin.

Bei allen Schwermetallen lässt sich ein Zusammenhang zwischen pH-Wert und der Verfügbarkeit erkennen (Tabelle 16). Je humoser der Boden ist, desto geringer ist der pH-Wert. Mit sinkendem pH-Wert steigt die Metallverfügbarkeit im Untersuchungsgebiet. Das bedeutet die Pflanzen-Verfügbarkeit auf der Halde ist im Falle der Abraumhalde am Knappenberg geringer als im umliegenden Wald. Aus der Literatur (Scheffer & Schachtschabel, 2002) geht hervor, dass Humus Schwermetalle bindet, die Verfügbarkeit in der Umgebung sollte also geringer sein als auf der Halde, dies ist jedoch nur der Fall, wenn die Abraumhalde saurer als das Umland ist und trifft auf der Halde am Knappenberg nicht zu.

### **6.3.5 Faktorenanalyse & lineare Modelle**

Die Ähnlichkeit der Verteilung der Elemente (Gesamtgehalte) in Abbildung 111 zeigt die chemisch sehr ähnlichen Elemente Zink und Kadmium (Scheffer & Schachtschabel, 2002) nahe nebeneinander liegen. Eine weitere Gruppe bilden die Elemente der Halde, Eisen, Mangan und Kupfer, die aus den Erzmineralen stammen. Abseits der anderen Elemente befindet sich das Blei, was bestätigt, dass das Blei nicht aus dem Erz sondern vermutlich aus der Luft stammt.

Die Verteilung der Elemente nach ihrer Pflanzen-Verfügbarkeit [mg/kg] in Abbildung 112 zeigt eine große Gruppe bestehend aus den Nährstoffen Ammonium, Phosphat, Sulfat und Kalium zusammen mit Zink, Mangan und Kadmium auf. Abseits der anderen Elemente befinden sich das verfügbare Eisen und Blei. Das verfügbare Kupfer ist isoliert von allen anderen Elementen lokalisiert.

Für die Verteilung der prozentuellen Pflanzen-Verfügbarkeit (Abbildung 113) gilt das Gleiche wie für die Pflanzen-Verfügbarkeit [mg/kg].

Diese Faktorenanalysen zeigen, dass Kupfer zwar an den gleichen Standorten wie Eisen und Mangan im Untersuchungsgebiet vorkommt, aber keine Ähnlichkeiten zwischen der Verfügbarkeit von Kupfer und der Verfügbarkeit von Mangan oder Eisen bestehen.

Für Mangan ( $R^2=0,82^{**}$ ), Blei ( $R^2=0,78^{**}$ ) und Zink ( $R^2=0,89^{**}$ ) sind genau die für die Verfügbarkeit wichtigen Parameter wie pH-Wert, Grobschluff fein und Eisen-Gesamtgehalt bestimmt worden. Bei Kupfer ( $R^2=0,61^*$ ) und Eisen ( $R^2=0,57^*$ ) müssen noch andere Parameter zur Verfügbarkeit beitragen. Diese Parameter könnten beispielsweise Redoxpotential, lösliche Huminsäuren oder Karbonatgehalt sein.

## 6.4 Pflanzen

Bei Vegetationsaufnahmen auf der Halde und im unmittelbaren Umfeld wurden gesamt 39 Gefäßpflanzenarten, 14 Moosarten und 18 Flechtenarten bestimmt. Bodenalgen waren nicht zu finden.

### 6.4.1 Gefäßpflanzen

Die Gefäßpflanzen haben ihre größte Vielfalt mit durchschnittlich vier bis sechs Arten an günstigen Standorten mit viel Tonanteil (Abbildung 208) und geringen Schwermetallkonzentrationen (Abbildung 209, Abbildung 210). Im Wald findet man die typischen Arten hochsubmontaner Mischwälder entsprechend dem mitteleuropäischen Heidelbeer – Rotföhrenwald, *Vaccinio myrtilli – Pinetum sylvestris* (Willner & Grabherr, 2007), auch wenn er sich nicht ganz klar einer Subassoziation zuordnen lässt.

Die Gefäßpflanzen benötigen Feinschluff gesamt ( $R^2=0,42^{**}$ ), Ton gesamt ( $R^2=0,40^{**}$ ) und einen hohe Eisen-Verfügbarkeit ( $R^2=0,28^*$ ), siehe Tabelle 23. Sie meiden grobe Steine ( $R^2=-0,32^*$ ), was erklärt, warum die Halde nahezu Gefäßpflanzen frei ist.

Auf der Halde ist nur *Rumex acetosella* zu finden, auffallend ist das Fehlen von vielen anderen Kupfer-Arten wie *Armeria bottendorfensis*, *Silene nutans* oder *Minuartia verna* (van der Ent *et al.*, 2007). Obwohl die Abraumhalde nicht extrem kupferreich ist, ist sie sehr arm an Schwermetall toleranten Gefäßpflanzenarten. Im Gebiet um die Halde gibt es keine Vorkommen der oben genannten Gefäßpflanzen, von denen aus die Samen weiter transportiert werden könnten, daher fehlen diese Kupfer-Arten im Untersuchungsgebiet.

*Pinus sylvestris* in der Strauchschicht und Krautschicht sind auf den Messpunkten am Waldrand und auf der Halde vorgekommen. Im Wald wurden keine Jungpflanzen gefunden. Man kann also davon ausgehen, dass es sich bei *Pinus sylvestris* in der Strauchschicht und Krautschicht offenbar nicht um Jungpflanzen, sondern um Zwergformen handelt, die sich durch Stress nicht weiter entwickeln. Auch die auf der Halde vorkommende *Larix decidua* ist eine Zwergform.

Zu erwähnen ist, dass *Euphorbia cyparissias* am Knappenberg nur im unbelasteten Teil des Untersuchungsgebiets wächst. Am Serpentin Standort Redlschlag oder am Quecksilber-Standort Zlatna Dos Valley (Rumänien) vorkommend ist diese Pflanze nämlich als höchst resistent gegen Nickel, Chrom und Quecksilber, nicht jedoch gegen Kupfer eingestuft. Am untersuchten Kupfer-Standort ergibt die Auswertung eine negative Korrelation ( $R^2=-0,30^*$ ) zwischen *Euphorbia cyparissias* und Kupfer-Gesamtgehalt, diese Pflanze meidet also Kupfer.

#### **6.4.2 Moose**

Die Artenzahl der Moose ist über das gesamte Untersuchungsgebiet mehr oder weniger gleich verteilt, an sehr kupferreichen Standorten haben sich jedoch nur wenige Moose wie *Pohlia sp.* angesiedelt.

*Ceratodon purpureus* gilt in der Literatur als Schwermetall tolerant. Dieses Moos tritt in Lintich und Spania Dolina (Slowakei) auf Schwermetallhalden auf (Hus *et al.*, 2006). Auch in Rudnay (Slowakei) ist *Ceratodon purpureus* auf Schwermetall kontaminiertem Boden zu finden (Hubalek & Müllner, 2007). Auf der Halde am Knappenberg fehlt es, man findet es nur vereinzelt im umliegenden Wald.

Kupfer-Moose, die zu erwarten gewesen wären, wie beispielsweise *Racomitrium canescens* (Hus *et al.*, 2006) oder *Mielichhoferia elongata* und *Mielichhoferia mielichhoferi* (Saukel, 1980) fehlen auf der Halde am Knappenberg vollständig.

Ein Großteil der Moosvielfalt ist auf dem Waldboden vorzufinden, dieser ist jedoch nicht, wie vorher beschrieben, luftfeuchter wohl aber schattiger als die Halde. Gründe für das Ausweichen der Moose von der Halde in den umliegenden Wald könnten das Meiden der Schwermetalle und das Meiden der hohen Bodenoberflächentemperatur sein. Weiters bevorzugen Moose den sauren Waldboden. Der einzige Zusammenhang der Moose tritt mit Phosphat ( $R^2=0,31^*$ ) auf, welches im Wald eine signifikant höhere Verfügbarkeit [mg/kg] aufweist (Tabelle 23).

#### **6.4.3 Flechten und Pilze**

Die Flechten treten gehäuft auf den Messpunkten mit nur wenigen Gefäßpflanzen auf und bevorzugen sonnige Standorte. Das Auftreten der Flechten korreliert im Allgemeinen aber nicht mit dem Kupfer auf der Halde (Tabelle 20). Die Flechten könnten also das Kupfer ertragen, um die sonnigen Standorte zu besiedeln und der Konkurrenz durch andere Pflanzen oder Moosen zu entgehen.

Einige Pilzarten wurden vorgefunden, deren weiteren Erforschung lohnenswert wäre.

#### **6.4.4 Algen**

Es wurden keine Algen auf der Abraumhalde gefunden. Nach Adlassnig (mdl. Mitteilung) wurden unter Anwendung der gleichen Methode auf Arsen-Halden in Schleining Algen gefunden. Dies lässt die Vermutung zu, dass Algen gegen Arsen, nicht jedoch gegen Kupfer resistent sind.

## Beschreibung der wichtigsten Arten:

### **6.4.5 *Pinus sylvestris***

*Pinus sylvestris* dominiert den Wald des Untersuchungsgebietes und ist eine Leitart für den vorherrschenden Waldtyp Heidelbeer – Rotföhrenwald, *Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvestris* (Abbildung 114). Nur auf den Messpunkten direkt auf der Halde fehlt diese Art.

### **6.4.6 *Avenella flexuosa***

*Avenella flexuosa* kommt überall im Untersuchungsgebiet vor, jedoch nicht direkt auf der Halde (Abbildung 125). An Standorten mit hoher prozentueller Kupfer-Verfügbarkeit fehlt sie ebenfalls (Abbildung 134). *Avenella flexuosa* ist die einzige Pflanze, die prozentuell verfügbares Kupfer meidet. Der mit *Avenella flexuosa* bewachsene Streifen am südlichen Rand der Halde entlang konnte im Zuge der Untersuchungen nicht erklärt oder dafür verantwortliche Parameter aufgezeigt werden. Eine mögliche Erklärung könnte die Hauptwindrichtung in Niederösterreich liefern, bei NW Wind (ZAMG, 2002) wird *Avenella flexuosa* mit etwas wärmerer Haldenluft versorgt.

### **6.4.7 *Rumex acetosella***

*Rumex acetosella* ist vor allem auf der Halde, selten am Haldenrand und nicht im Wald vertreten (Abbildung 137). Er ist auf dieser Halde also an schwach sauren Standorten (ca. pH 4,4) im Vollsonngingen bzw. Halbschatten zu finden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass weder der pH Wert noch die Beschattung für *Rumex acetosella* eine Rolle spielt. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von Schwermetallhalden in der Slowakei. In Terézia, Richtárová, Libethen und Spania Dolina (Slowakei) wächst *Rumex acetosella* auf Schwermetallhalden bei einem pH-Wert von 5, in Lintich wurde beim Auftreten von *Rumex acetosella* ein pH-Wert von 4 gemessen (Hus et al., 2006).

Adlassnig & Sassmann (pers. Mitteilung) fanden den Zwergsauerampfer auf der Kreealm im Großarlal (AUT) durchaus auch an schattigen Standorten. Er bevorzugt kupferreiche Standorte, meidet allerdings die extrem kupferreichen Bereiche (Abbildung 145).

*Rumex acetosella* enthält durchschnittlich 4.474,12 ± 2.410,57 mg/kg Trockensubstanz Mangan und durchschnittlich 964 mg/kg Trockensubstanz Kupfer in den oberirdischen Pflanzenteilen. Der Wert des Kupfergehalts stimmt mit den von Bouslama (2006) gemessenen Werten (831 mg/kg bzw.

1.521 mg/kg Kupfer) überein. Ein besonderes Augenmerk sollte man auf den Zeitpunkt der Probenahme legen. So stellte Bouslama (2006) Überlegungen an, dass junge Wurzeln mehr Kupfer aufnehmen und in den Spross weiterleiten. Durch die Adaptation der Wurzeln einer

älteren Pflanze könnte die Akkumulation reduziert werden. Um diese Überlegung zu untersuchen, müssten über eine Vegetationsperiode mehrere Proben von *Rumex acetosella* genommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde *Rumex acetosella* nur einmal geerntet und untersucht. Somit kann im Rahmen dieser Untersuchungen keine Aussage über einen eventuell unterschiedlichen Kupfer-Gehalt in Jungpflanzen und älteren Pflanzen getroffen werden. Die Werte der Kupfer-Aufnahme in *Rumex acetosella* korrelieren kaum mit den Werten des im Ammoniumnitrat löslichen Kupfers im Boden, daher wäre zu überlegen, ob eine EDTA-Extraktion bzw. Oxalsäure-Extraktion vielleicht der Ammoniumnitrat-Extraktion vorzuziehen wäre.

Auf Grund des partiellen Vorkommens von *Rumex acetosella* im Untersuchungsgebiet konnten nicht viele Sammelpunkte gesetzt werden, daher zeigen auch die Ergebnisse nicht viele signifikante Zusammenhänge zwischen den gemessenen Parametern auf.

Der Zwergsauerampfer nimmt Kupfer besonders bei hohem Kupfer-Gesamtgehalt und hoher Sonneneinstrahlung auf (Abbildung 220). Die Ergebnisse des Transferfaktors (F) ergeben ca. 11,4%, man kann also von einer mittleren Aufnahmefähigkeit von Kupfer in die Pflanze ausgehen.

Die Photosyntheserate ( $0,79 F_v/F_m$ ) dieser Pflanze steigt mit verfügbarem Kupfer [mg/kg] (Abbildung 223). *Rumex acetosella* tritt regelmäßig mit *Pohlia sp.*, *Cladonia*-Arten und *Porpidia macrocarpa* auf den Messpunkten auf (Tabelle 25).

Schlechte Eisen-Verfügbarkeit zeichnet die Halde aus, der auf der Halde angesiedelte *Rumex acetosella* muss also mit sehr wenig Eisen auskommen. Diese Tatsache wirft die Frage auf, ob Haldenpflanzen spezifische Methoden entwickelt haben, um das Eisen in Lösung zu bringen.

Auf der Halde ist das Phosphat ähnlich dem Eisen nur in geringen Mengen für die Pflanzen verfügbar. Nach Sandberg et al. (2009) verfügt *Rumex acetosella* über Mechanismen, um eine hohe Phosphat-Verfügbarkeit ohne Mykorrhiza im Boden herzustellen und aufrechtzuerhalten. Auf Grund dieser Möglichkeit schafft *Rumex acetosella* es auf der Halde Stress, hervorgerufen durch Phosphat-Mangel, zu entgehen.

Mit allen Pflanzen, die im Wald auftreten, weist *Rumex acetosella* eine negative Korrelation auf, das heißt beim Vorhandensein von *Rumex acetosella* fehlen die im umliegenden Wald vorkommenden Pflanzenarten.

#### **6.4.8 *Vaccinium myrtillus***

*Vaccinium myrtillus* ist eine Leitart für den vorherrschenden Waldtyp Heidelbeer – Rotföhrenwald, *Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvestris*. Im Untersuchungsgebiet bevorzugt *Vaccinium myrtillus* (Abbildung 148) Schatten, sauren Boden und wahrscheinlich eine hohe Wasserhaltekapazität und viel Humus, wie von Fischer et al. (2008) beschrieben. Es scheint also

nicht das Kupfer der begrenzende Faktor für *Vaccinium myrtillus* auf der Halde zu sein, sondern eher fehlender Humus, geringe Wasserhaltekapazität und ein eher weniger saurer Boden auf der Halde im Gegensatz zum Wald.

#### **6.4.9 *Hypnum cupressiforme***

*Hypnum cupressiforme* ist wahrscheinlich das verbreitetste Moos in Mitteleuropa (Zechmeister, pers. Mitteilung). Es tritt gemeinsam mit *Dicranum scoparium* auf den Messpunkten des sauren Waldbodens auf (Abbildung 159). Grundsätzlich kann dieses Moos auch an sehr kupferreichen Standorten wachsen, wie die Ergebnisse in Abbildung 167 zeigen. Es meidet aber eher die Halde. Vermutlich wächst es nicht auf der Halde, da die Bodenbeschaffenheit (höherer pH-Wert, Humusmangel und fehlende Beschattung) für *Hypnum cupressiforme* dort nicht optimal ist. Das Fehlen von *Hypnum cupressiforme* ist also nicht auf das vorhandene Kupfer zurückzuführen.

#### **6.4.10 *Pohlia* sp.**

Folkesson et al. (1988) beschreibt einige Arten der Gattung *Pohlia* auf Schwermetallstandorten. Im Untersuchungsgebiet treten drei *Pohlia*-Arten auf, die bestimmt werden konnten (Abbildung 170). Die nicht fruchtende *Pohlia* sp. auf der Halde konnte nicht zugeordnet werden. Da sie nur auf den extremen Standorten der Halde nicht fruchtet, leidet sie dort offenbar unter Stress. Auf der Schwarzwand findet man *Pohlia*-Arten auf stark kupferreichen, aber basischeren Standorten fruchtend (Saukel, 1980). Dort ist es jedoch immer feucht und kühl, was die Vermutung aufkommen lässt, dass nicht das Kupfer sondern fehlende Feuchtigkeit auf der Halde am Knappenberg *Pohlia* sp. nicht fruchten lässt.

*Pohlia drummondii* kommt auf kalkarmen bis basenreichen, feuchten, sandigen, oft humosen, recht nährstoffreichen Standorten vor. Auf der Schwarzwand wächst *Pohlia drummondii* im subalpinen Bereich in einem sehr feuchten Milieu (Hus, 2008). Am Knappenberg ist diese Art einmal im eher feuchten, humosen Cluster Wald (*Avenella flexuosa*) und einmal im Cluster Halde (*Rumex acetosella*) vereinzelt vorhanden.

Wernitznig (2009) weist auf *Pohlia nutans* als ein Moos auf Standorten mit sehr hohen Nickel- und Kupfergehalten (z.B. Ontario, Schweden) hin. Ein erhöhtes Wachstum auf feuchtem und sehr saurem Untergrund (pH < 3,5) wird auch beschrieben (Dykeman & De Sousa, 1966). Direkt auf der Halde am Knappenberg treffen diese Parameter jedoch nicht zu. Die Trockenheit auf der Halde und der für eine Abraumhalde relativ hohe pH-Wert könnten Auslöser dafür sein, dass *Pohlia nutans* die Halde eher meidet und nur vereinzelt im Cluster Halde (*Rumex acetosella*) vorkommt.

#### **6.4.11 *Cladonia***

Die wichtigste Flechte mit zehn Arten ist *Cladonia*. *Cladonia cervicornis* (Abbildung 180) und *Cladonia pyxidata* (Abbildung 190) sind v.a. auf die Halde beschränkt, auf den kupferreichsten Standorten sind jedoch nur sehr wenige Flechten vorhanden.

Die Flechten meiden definitiv den Schatten ( $R^2=-0,48^{**}$ ), daher konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht geklärt werden, ob Flechten Kupfer-Standorte besiedeln oder nur deshalb dort angesiedelt sind, weil sie Sonne bevorzugen und Kupfer ertragen. Sie benötigen aber sicher kein Kupfer.

*Cladonia rangiferina* ist eine Art, die in Mooren vorkommt. Am Knappenberg ist sie zwar im sauren und relativ feuchten Wald, nicht jedoch auf der eher weniger sauren Halde zu finden. *Cladonia rangiferina* kommt, genauso wie *Cetraria islandica*, auf Halden in Bergslagen (SWE) vor (Adlassnig, pers. Mitteilung). Das Kupfer kann also nicht der ausschlaggebende Grund für das Fernbleiben dieser Flechte sein. Ein Erklärungsansatz wäre, dass die Halde für diese Art zu wenig sauer oder zu trocken ist.

#### **6.4.12 *Porpidia macrocarpa***

Als Gesteinsflechte ist sie nicht auf humosen Feinerde-Standorten zu finden (Abbildung 201). *Porpidia macrocarpa* bevorzugt eisenreiche Standorte, die sie auf der Halde vorfindet. Offenbar toleriert diese Flechte das auf der Halde vorhandene Kupfer.

## 6.5 Schlussfolgerung & Ausblick

Die Auswertung der Daten bestätigt die angenommene Hypothese, dass die Verfügbarkeit der Schwermetalle in verschiedenen Abschnitten des Untersuchungsgebietes signifikante Unterschiede aufweist. Die aus dieser Arbeit hervorgehenden Ergebnisse zeigen, dass die Pflanzen auf der Halde mit einer geringen Verfügbarkeit von Eisen und Mangan, jedoch mit einer hohen Verfügbarkeit an Kupfer zurechtkommen müssen. Im Gegensatz dazu herrscht im umliegenden Wald eine höhere Verfügbarkeit an Mangan und Eisen. Die Verfügbarkeit von Kupfer ist im Wald jedoch sehr niedrig.

Bedingt durch den hohen Skelettanteil und das Fehlen der Humusaufgabe auf der Halde ist die Wasserhaltekapazität dort sehr gering. Bei Sonneneinstrahlung wird die Oberfläche der Halde stark aufgeheizt. Aufgrund fehlender Beschattung und geringer Dämpfungstiefe sind die Pflanzen auf der Halde enorm hohen Temperaturen an der Bodenoberfläche ausgesetzt.

Trotz der geringen Nährstoffverfügbarkeit, der geringen Wasserhaltekapazität und der hohen Temperatur der Bodenoberfläche bei Sonneneinstrahlung hat sich *Rumex acetosella* dort angesiedelt. Diese Pflanze muss also Strategien entwickelt haben, um auf dem Standort mit den oben genannten Stressfaktoren auf der Halde existieren zu können.

Die lokale Anreicherung toxischer Schwermetallverbindungen schränkt das Pflanzenwachstum vielfach auf eine stark selektierte Auswahl ökophysiologischer Spezialisten ein (Strasburger *et al.*, 1991). Die ermittelten Daten zeigen jedoch, dass auch hohe Schwermetallkonzentrationen eine geschlossene Vegetationsdecke und eine relativ hohe Biodiversität nicht verhindern, solange andere Parameter wie pH-Wert, Mikroklima und Humusgehalt günstig sind. Gut erkennbar ist dies rund um den Messpunkt 46. In diesem Teil des Waldes, am Fuße der Abraumhalde, liegt viel Abraummaterial, das wahrscheinlich von der Halde hinuntergerutscht ist. Dieses Abraummaterial ist von Bäumen stark beschattet, bereits mit Rohhumus bedeckt und gibt somit der Vegetation die Möglichkeit sich dort wieder anzusiedeln. Möglicherweise kann man ein beginnendes Zuwachsen der Halde weiter verfolgen. Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass die Zonierung der Vegetation weniger auf den Gesamtgehalt an Schwermetallen im Boden, sondern auf das Zusammenspiel weiterer Bodenparameter zurückzuführen ist.

Bedingt durch die edaphische Heterogenität des Untersuchungsgebietes können auf begrenztem Raum unterschiedliche Vegetationszusammensetzungen beobachtet werden. Auf der Halde dominieren Moose und Flechten. Als einzige krautige Pflanze kommt *Rumex acetosella* vereinzelt

auf der Halde vor. Im nördlichen Wald ist der Unterwuchs geprägt von *Vaccinium myrtillus*. In einem kleinen Bereich des nördlichen Waldes mit besonders hohem Tongehalt wachsen u.a. *Melampyrum pratense*, *Fragaria vesca*, *Luzula luzuloides*, *Vaccinium vitis-idea*, *Oxalis acetosella* und *Helleborus niger*. Der südliche Wald wird im Unterwuchs dominiert von *Avenella flexuosa* und Moosen.

### Ausblick

Für zusätzliche Forschungen auf diesem Gebiet ergeben sich weitere wissenschaftlich interessante Fragen. So sollte man den Flechten in Zukunft mehr Beachtung schenken, da sie sehr artenreich auf den Abraumhalden vorkommen. Interessant wäre die Rolle der Flechten bei der Vegetations-Sukzession einer Abraumhalde.

Pflanzen bilden Wurzelexudate, die wahrscheinlich effizientere Extraktionsmittel für Nährstoffe als das bei den Versuchen verwendete Ammoniumnitrat darstellen. Es wäre zu überlegen Oxalatsäure- oder EDTA-Extraktionen dem Ammoniumnitrat vorzuziehen.

Die Pflanzen-Verfügbarkeit von Kupfer scheint komplexer als beispielsweise die von Blei zu sein. Karbonatgehalt, Sulfidgehalt und Redoxpotential der Böden sind interessante zu bestimmende Parameter, um das verfügbare Kupfer mit non-linearen Modellen zu berechnen.

Auf Grund der erhöhten Werte von Arsen und Antimon auf der Halde (Steinhauser, pers. Mitteilung) sollte angedacht werden diese beiden Elemente in zukünftige Untersuchungen zu integrieren.

## 7 Literatur

1989. ÖNORM.In. L 1081.

2007. Grenzwerteverordnung Bundesgesetzblatt II.In.

2009. ÖNORM.In. L 1085.

**Baker AJM. 1981.** Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **3**(1-4): 643-654.

**Basta N, Gradwohl R. 2000.** Estimation of Cd, Pb, and Zn bioavailability in smelter - contaminated soils by a sequential extraction procedure. *Journal of Soil Contamination* **9**(2): 149 - 164.

**Bode R. 1994.** *Taschenbuch der Mineralienfundstellen - Österreich.*

**Bousslama S. 2006.** *Boden - Pflanze Interaktionen auf Cu - belasteten Böden in Österreich.* Diplomarbeit, Universität Wien.

**Braun-Blanquet J. 1964.** *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde:* Springer Verlag, Wien New York.

**Dykeman WR, De Sousa AS. 1966.** Natural mechanisms of copper tolerance in a copper swamp forest. *Canadian Journal of Botany* **44**: 871-878.

**Emmerer B, Steinlechner E, Trinkaus P, Gössler W 2003.** Ökologische Untersuchungen der bronzezeitlichen Kupferschlackenhalde in der Eisenerzer Ramsau. *Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark. Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen zum prähistorischen Kupferbergbau in der Eisenerzer Ramsau.* Wien: Akademie der Wissenschaft, S. 165 - 173.

**Ernst. 2007.** *Einfluss von Aquaporinen auf die Blattwachstumsgeschwindigkeit von Nicotiana tabacum (L.) und Arabidopsis thaliana (L.) Heynh.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

**Ernst W. 1974.** *Schwermetallvegetation der Erde:* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

**Fiedler HJ. 2001.** *Böden & Bodenfunktionen: in Ökosystemen, Landschaften, Ballungsräumen.* Renningen-Malmsheim: Expert Verlag.

**Fischer M, Oswald K, Adler W. 2008.** *Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol.* Linz: Land Oberösterreich, Biologiezentrum der Oberösterreich. Landesmuseen.

**Folkesson L, Anderson-Bringmark E. 1988.** Impoverishment of vegetation in a coniferous forest polluted by copper and zinc. *Can. J. Bot.* **66**: 417-428.

**Frahm J-P, Frey W. 2004.** *Moosflora.* Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.

**Gärtner G 1993.** Anreicherungskulturen von Bodenalgen. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden.* Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 271-274.

**Grey-Willson C, Blamey M. 2008.** *Die Kosmos Enzyklopädie der Blütenpflanzen:* Franckh-Kosmos Verlag Stuttgart.

- Hackenberger M 2003.** Bergbau im Semeringgebiet. In. *Archiv für Lagerstättenforschung der geologischen Bundesanstalt*. 5 - 97.
- Hubalek V, Müllner B 2007.** Schwermetall-Exkursion: Erzgebirge der Slowakei. In.
- Hus K. 2008.** *Die Aufnahme und Verteilung von Schwermetallen in Kupfermoosen der Schwarzwand/Salzburg*. Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.
- Hus K, Pohl S, Schlager T, Schmid S, Suetterle S, Theurl M, Tvarogova A 2006.** Exkursion zu den Schwermetall-Standorten im Erzgebirge der Slowakei. In.
- Jannsen J, Laatz W. 2007.** *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kandeler E 1993a.** Bestimmung von Ammonium. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 366-368.
- Kandeler E 1993b.** Humusbestimmung durch Nassoxydation. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 356 - 357.
- Knolle E, Ernst WHO, Dierschke H, Becker T, Kison H, Kratz S, Schnug E. 2011.** Schwermetallvegetation, Bergbau und Hüttenwesen im westlichen Geopark Harz - eine ökotoxikologische Exkursion. *Braunschweiger Naturkundliche Schriften* **10**(1): 1-44.
- Levitt J. 1972.** *Responses of plants to environmental stress*.: Academic press London, New York.
- Mandl G, Nowotny A, Rockenschraub M 2001.** Geologische Karte der Republik Österreich - 104 Mürzzuschlag. In: Geologische Bundesanstalt.
- Öhlinger R 1993a.** Bestimmung der Korngrößenverteilung. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 347 - 350.
- Öhlinger R 1993b.** Bestimmung der maximalen Wasserkapazität im Laborversuch. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 345.
- Öhlinger R 1993c.** Bestimmung des Wassergehaltes und der Trockensubstanz (Trockenmasse). *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 344.
- Öhlinger R 1993d.** Bestimmung von Phosphor in Bodenextrakten. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 371-373.
- Punz W, Maier R 1999.** Zur Ökologie der Vegetation auf den Bergbauhalden des Hochobir. in: *Der Hochobir - Aus Natur und Geschichte*. Klagenfurt: Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten.
- Punz W, Sieghardt H. 1993.** The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environmental and Experimental Botany* **33**(1): 85-98.
- Red.: Sauermost R, Freudig D 2003a.** Lexikon der Biologie 9. *Lexikon der Biologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Lyo-Nau.
- Red.: Sauermost R, Freudig D 2003b.** Lexikon der Biologie 12. *Lexikon der Biologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Reso-Sim.
- Ricek E. 1994.** *Die Waldbodenmoose Österreichs*. Wien: Zoologisch -Botanische Gesellschaft.

- Sandberg J, Jones D, Fransson A. 2009.** Despite high uptake efficiency, non-mycorrhizal *Rumex acetosella* increases available phosphorous in the rhizosphere soil, whereas *Viscaria vulgaris*, *Plantago lanceolata* and *Achillea millefolium* does not. *Nordic Journal of Botany* **27**(5): 444-448.
- Saukel J. 1980.** *Ökologische-soziologische, systematische und physiologische Untersuchungen an Pflanzen der Grube "Schwarzwand" im Großtal (Salzburg)*. Universität Wien.
- Scheffer F, Schachtschabel P. 2002.** *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Sieghardt H. 1985a.** Zur Frage der Besiedlung schwermetall-hältiger Abraumhalden in Bleiburg/Kärnten I: *Silene vulgaris* ssp. *glareosa* (Jord.) MARSDEN-JONES & TURILL. *Carinthia II* **175/95**: 27-45.
- Sieghardt H. 1985b.** Zur Frage der Besiedlung schwermetall-hältiger Abraumhalden in Bleiberg/Kärnten II: *Erysimum sylvestre* (CR.) SCOP. *Carinthia II* **175/96**: 377-392.
- Sieghardt H. 1987.** Schwermetall- und Nährelementgehalte von Pflanzen und Bodenproben schwermetallhaltiger Halden im Raum Bleiberg in Kärnten (Österreich) I. krautige Pflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **150**: 129-134.
- Sieghardt H 1989.** Aufnahme und Transport von Schwermetallen in Pflanzen von einer Bergbauhalde im Raum Bleiberg in Kärnten, Österreich. In: GUTTENBERGER H, BERMADINGER, E., GRILL, D. ed. *Reaktionen von Pflanzen auf Streß*.: Institut für Pflanzenphysiologie Karl-Franzens-Universität Graz, 25-33.
- Steinhauser G, Adlassnig W, Lendl T, Peroutka M, Weidinger M, Lichtscheidl IK, Bichler M. 2009.** Metalloid contaminated microhabitats and their biodiversity at a former antimony mining site in Schlaining, Austria. *Open Env. Sci.* **3**: 20-35.
- Strasburger E, Noll F, Schenck H, Schimper AFW. 1991.** *Lehrbuch der Botanik*. Stuttgart; Jena; New York: Gustav Fischer Verlag.
- van der Ent A, Baumbach H, Termeer C 2007.** International Heavy Metal Ecology Excursion 2007 Metalliferous sites in Central Germany. In. o.O.: Vereinigung Nouvelle Montagne, Arbeitsgemeinschaft Bergbaufolgelandschaften.
- Weber L 1997.** Archiv für Lagerstättenforschung. In: Geologische Bundesanstalt.
- Wernitznig S. 2009.** *Die schwermetalltoleranten Moose Melichoferia elongata und Pohlia drummondii und ihre Reaktion gegenüber Schwermetallstress*. Diplomarbeit thesis, Universität Wien Wien.
- Willner W, Grabherr G. 2007.** *Die Wälder und Gebüsche Österreichs*. München: Spektrum Akademischer Verlag.
- Wirth V. 1995.** *Flechtenflora: Bestimmung und ökologische Kennzeichnung*: Stuttgart: Ulmer.
- Wirth V, Düll R. 2000.** *Farbatlas Flechten und Moose*: Stuttgart: Ulmer.
- ZAMG 2002.** Klima-Daten von Österreich. In. Wien.

# 8 Anhang

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ökologische Konsequenzen der Schwermetalltoleranz (Abbildung nach Horak, 2011).....	11
Abbildung 2: Anreicherungstypen von Schwermetallen nach Baker (1981); (Abbildung nach Horak, 2011) .....	13
Abbildung 3: Luftbildaufnahme des Gebietes um die zu untersuchende Halde (rot umrandet), 1=erste Stufe der Halde, 2=zweite Stufe der Halde, (Quelle: <a href="http://maps.google.at/maps?hl=de&amp;tab=wl">http://maps.google.at/maps?hl=de&amp;tab=wl</a> , 25.09.2011) .....	14
Abbildung 4: Blick auf die erste Stufe der Abraumhalde, vom Wald aus gesehen (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig) .....	14
Abbildung 5: Karte des Semmeringgebietes, entnommen von Hackenberger (2003), der Pfeil zeigt die Abraumhalde;16	
Abbildung 6: geologische Karte des Gebietes rund um den Knappenberg (rot umrandet); Maßstab 1:110900; Quelle: Weber (Weber, 1997), <a href="http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html">http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html</a> (15.09.2012) .....	16
Abbildung 7: Karte (Hackenberger, 2003) des Gebietes um den Knappenberg, wo Eisen, Gold, Silber, Kupfer und Quecksilber abgebaut wurden.....	17
Abbildung 8: Chlorophyll Fluorometer mit Clips an die Blätter von <i>Rumex acetosella</i> angebracht; .....	27
Abbildung 9: Halde und umgebender Wald dominiert von <i>Pinus sylvestris</i> , auf der Halde sind kleinwüchsige <i>Larix decidua</i> zu finden. A,C: Blick vom Fuße der Halde hinauf, rechts <i>Avenella flexuosa</i> Streifen; B,D: Blick die Halde hinunter mit kleinwüchsigen <i>Larix decidua</i> auf der Halde;.....	33
Abbildung 10: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt die Messpunkte eingefärbt nach den Clustern .....	35
Abbildung 11: Bewölkungsgrad im Tagesverlauf .....	36
Abbildung 12: Wind im Tagesverlauf .....	36
Abbildung 13: Lufttemperatur im Tagesverlauf.....	37
Abbildung 14: Relative Luftfeuchte im Tagesverlauf .....	38
Abbildung 15: Strahlung im Tagesverlauf .....	39
Abbildung 17: keine signifikanten Unterschiede der Rückstrahlung im Wald am Waldrand oder auf der Halde (Kruskal-Wallis Test).....	40
Abbildung 16: Reflexion im Tagesverlauf.....	40
Abbildung 18: Temperatur der Bodenoberfläche im Tagesverlauf.....	41
Abbildung 19: Temperatur in 10 cm Bodentiefe im Tagesverlauf .....	42
Abbildung 20: Temperatur in 30 cm Bodentiefe im Tagesverlauf .....	43
Abbildung 21: Dämpfungstiefe [cm] auf den Messpunkten HW 12 bis HW 16 .....	44
Abbildung 22: Wasserhaltekapazität [%] auf den Messpunkten HW 12 bis HW 16 .....	45
Abbildung 23: Sandanteil im Feinboden [%] auf den Messpunkten HW 12 bis HW 16 .....	45
Abbildung 24: Korrelation ( $R^2$ ) zwischen der Dämpfungstiefe (OF bis 30 cm Bodentiefe) und der Wasserhaltekapazität (Pearson Test).....	46
Abbildung 25: Korrelation ( $R^2$ ) zwischen der Dämpfungstiefe (OF bis 30 cm Bodentiefe) und dem Sandanteil im Feinboden (Pearson Test) .....	46
Abbildung 26: Steine der Halde: Azurit (links oben), Malachit (rechts oben), .....	47
Abbildung 27: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich ihrer Beschattung (Mann-Whitney Test); .....	48
Abbildung 28: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich Skelettanteil (Mann-Whitney Test); der waagrechte Strich zeigt das arithmetische Mittel aller Proben;.....	49
Abbildung 29: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Skelettanteil der Messpunkte.....	50

Abbildung 30: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Feinerde-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test); der waagrechte Strich zeigt das arithmetische Mittel aller Proben, Kreise kennzeichnen Extremwerte; .....	51
Abbildung 31: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Grobschluff-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test).....	51
Abbildung 32: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Feinschluff-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	52
Abbildung 33: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Ton-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	52
Abbildung 34: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Tonanteil im.....	53
Abbildung 35: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Humus-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	54
Abbildung 36: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Sandanteils im Feinboden (Mann-Whitney Test) .....	54
Abbildung 37: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Humusanteils im Feinboden (Mann-Whitney Test) .....	55
Abbildung 38: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den Humusanteil im .....	56
Abbildung 39: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der WHC (Mann-Whitney Test) ....	57
Abbildung 40: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des pH-Werts (Mann-Whitney Test) .....	57
Abbildung 41: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den pH-Wert der Messpunkte .....	58
Abbildung 42: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Phosphats (Mann-Whitney Test) .....	59
Abbildung 43: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Kaliums (Mann-Whitney Test) .....	59
Abbildung 44: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Mangan-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	60
Abbildung 45: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den.....	61
Abbildung 46: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Eisen-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	62
Abbildung 47: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den.....	63
Abbildung 48: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Kupfer-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	64
Abbildung 49: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt den.....	65
Abbildung 50: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des Kadmium-Gesamtgehalts (Mann-Whitney Test) .....	66
Abbildung 51: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Mangans (Mann-Whitney Test) .....	67
Abbildung 52: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt das verfügbare Mangan.....	68
Abbildung 53: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Eisens (Mann-Whitney Test) .....	69
Abbildung 54: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt das verfügbare Eisen der Messpunkte.....	70

Abbildung 55: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Kupfers (Mann-Whitney Test).....	71
Abbildung 56: die Karte des Untersuchungsgebietes zeigt das verfügbare .....	72
Abbildung 57: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Blei (Mann-Whitney Test).....	73
Abbildung 58: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich des verfügbaren Zink (Mann-Whitney Test) .....	73
Abbildung 59: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Mangan-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test).....	74
Abbildung 60: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Eisen-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test).....	75
Abbildung 61: kein signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Kupfer-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test).....	75
Abbildung 62: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Blei-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test).....	76
Abbildung 63: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Zink-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test).....	76
Abbildung 64: hoch signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der prozentuellen Kadmium-Verfügbarkeit (Mann-Whitney Test).....	77
Abbildung 65: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Skelettanteil (Kruskal-Wallis Test); der waagrechte Strich zeigt das arithmetische Mittel aller Proben, Kreise kennzeichnen Extremwerte; .....	80
Abbildung 66: quadratische Korrelation zwischen Ton gesamt und dem Skelettanteil.....	81
Abbildung 67: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Feinerde gesamt (Kruskal-Wallis Test) .....	81
Abbildung 68: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Feinschluff gesamt (Kruskal-Wallis Test) .....	82
Abbildung 69: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Humus-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test) .....	82
Abbildung 70: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Sandanteil im Feinboden (Kruskal-Wallis Test)....	83
Abbildung 71: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Tonanteil im Feinboden (Kruskal-Wallis Test) .....	84
Abbildung 72: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich pH-Wert (Kruskal-Wallis Test) .....	85
Abbildung 73: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Mangan-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test).....	85
Abbildung 74: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Eisen-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test) .....	86
Abbildung 75: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Kupfer-Gesamtgehalt (Kruskal-Wallis Test) .....	87
Abbildung 76: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich verfügbarem Eisen (Kruskal-Wallis Test) .....	87
Abbildung 77: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich verfügbarem Kupfer (Kruskal-Wallis Test) .....	88
Abbildung 78: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich verfügbarem Blei (Kruskal-Wallis Test).....	88
Abbildung 79: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Mangan-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test).....	89
Abbildung 80: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Eisen-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test) .....	90
Abbildung 81: keine signifikanten Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Kupfer-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test).....	90
Abbildung 82: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich prozentueller Blei-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test) .....	91

Abbildung 83: hoch signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich der prozentuellen Kadmium-Verfügbarkeit (Kruskal-Wallis Test) .....	92
Abbildung 84: keine signifikanten Unterschiede des Sättigungsgrades zwischen den Clustern (Kruskal-Wallis Test) ...	92
Abbildung 85: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen aktuellem Wassergehalt und Wasserhaltekapazität (Pearson Test) ...	93
Abbildung 86: signifikante Unterschiede der Cluster bezüglich Wassergehalt aktuell (Kruskal-Wallis Test).....	94
Abbildung 87: signifikanter Unterschied zwischen Halde und Wald bezüglich der Feinerde gesamt (Mann-Whitney Test) .....	95
Abbildung 88: signifikanter Unterschied im aktuellen Wassergehalt im Bezug auf die Beschattung (Kruskal-Wallis Test) .....	95
Abbildung 89: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen Skelettanteile im Boden (Kruskal-Wallis Test) .....	96
Abbildung 90: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen pH-Werte im Boden (Kruskal-Wallis Test) .....	97
Abbildung 91: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen Humusanteile im Feinboden (Kruskal-Wallis Test) .....	97
Abbildung 92: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] im Boden (Kruskal Wallis Test).....	98
Abbildung 93: signifikante Unterschiede im aktuellen Wassergehalt der verschiedenen Kupfer-Gesamtgehalte im Boden (Kruskal-Wallis Test) .....	99
Abbildung 94: hoch signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Pinus sylvestris</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test).....	100
Abbildung 95: hoch signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Rumex acetosella</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test).....	100
Abbildung 96: kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Avenella flexuosa</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test).....	101
Abbildung 97: kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Vaccinium myrtillus</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test).....	101
Abbildung 98: kein signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Hypnum cupressiforme</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test) .....	102
Abbildung 99: signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Pohlia sp.</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test).....	102
Abbildung 100: hoch signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Cladonia pyxidata</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test) .....	103
Abbildung 101: signifikanter Unterschied beim Auftreten von <i>Porpidia macrocarpa</i> in Abhängigkeit vom Wassergehalt aktuell (Mann-Whitney Test).....	103
Abbildung 102: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und Humusanteil im Feinboden (Pearson Test).....	112
Abbildung 103: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] und Skelettanteil (Pearson Test) .....	112
Abbildung 104: quadratische Korrelation ( $R^2$ ) zwischen Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] und Skelettanteil (Pearson Test) .....	113
Abbildung 105: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen Humus-Gesamtgehalt und Skelettanteil (Pearson Test).....	113
Abbildung 106: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] (Pearson Test).....	114
Abbildung 107: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] (Pearson Test).....	114

Abbildung 108: kubische Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und prozentueller Mangan-Verfügbarkeit (Pearson Test)	115
Abbildung 109: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen pH-Wert und prozentueller Kadmium-Verfügbarkeit (Pearson Test)	115
Abbildung 110: lineare Korrelation ( $R^2$ ) zwischen prozentuelle Zink-Verfügbarkeit und Humusanteil im Feinboden (Pearson Test)	116
Abbildung 111: Verteilung der Elemente nach ihrem Gesamtgehalt [mg/kg]	117
Abbildung 112: Verteilung der Elemente nach ihrer Verfügbarkeit [mg/kg]	117
Abbildung 113: Verteilung der Elemente nach ihrer prozentuellen Verfügbarkeit	118
Abbildung 114: Vorkommen von <i>Pinus sylvestris</i> in der Baumschicht auf den Messpunkten (grün eingefärbt)	132
Abbildung 115: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) auf den verschiedenen Clustern	133
Abbildung 116: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei zunehmender Beschattung	133
Abbildung 117: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem pH-Wert	134
Abbildung 118: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg]	134
Abbildung 119: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem verfügbaren Mangan [mg/kg]	135
Abbildung 120: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]	135
Abbildung 121: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem verfügbaren Eisen [mg/kg]	136
Abbildung 122: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]	136
Abbildung 123: Deckungsgrad von <i>Pinus sylvestris</i> (Baumschicht) bei steigendem verfügbaren Kupfer [mg/kg]	137
Abbildung 124: Herbar von <i>Avenella flexuosa</i> ; Standort: Messpunkt HW 3, Sammler: Yasmin Weiss	138
Abbildung 125: Vorkommen von <i>Avenella flexuosa</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)	139
Abbildung 126: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> auf den verschiedenen Clustern	140
Abbildung 127: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei zunehmender Beschattung	140
Abbildung 128: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem pH-Wert	141
Abbildung 129: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt	141
Abbildung 130: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem verfügbaren Mangan [mg/kg]	142
Abbildung 131: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]	142
Abbildung 132: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem verfügbaren Eisen [mg/kg]	143
Abbildung 133: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt	143
Abbildung 134: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigender prozentuellen Kupfer-Verfügbarkeit	144
Abbildung 135: Deckungsgrad von <i>Avenella flexuosa</i> bei steigendem verfügbaren Kupfer [mg/kg]	145
Abbildung 136: <i>Rumex acetosella</i> auf der Kupfer Abraumhalde in Hirschwang; (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig)	146
Abbildung 137: Vorkommen von <i>Rumex acetosella</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte)	147
Abbildung 138: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> auf den verschiedenen Clustern, die Kreise kennzeichnen Ausreißer	148
Abbildung 139: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei zunehmender Beschattung	148
Abbildung 140: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem pH-Wert	149
Abbildung 141: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt	149
Abbildung 142: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem verfügbaren Mangan [mg/kg]	150
Abbildung 143: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg]	150
Abbildung 144: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem verfügbaren Eisen [mg/kg]	151
Abbildung 145: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg]	151

Abbildung 146: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg] .....	152
Abbildung 147: <i>Vaccinium myrtillus</i> am nördlichen (linken) Rand der Halde (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig).....	153
Abbildung 148: Vorkommen von <i>Vaccinium myrtillus</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte).....	154
Abbildung 149: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> auf den verschiedenen Clustern.....	155
Abbildung 150: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei zunehmender Beschattung .....	155
Abbildung 151: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem pH-Wert.....	156
Abbildung 152: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	156
Abbildung 153: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg].....	157
Abbildung 154: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	157
Abbildung 155: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg] .....	158
Abbildung 156: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	158
Abbildung 157: Deckungsgrad von <i>Vaccinium myrtillus</i> bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg] .....	159
Abbildung 158: <i>Hypnum cupressiforme</i> (Quelle: <a href="http://www.bildatlas-moose.de">http://www.bildatlas-moose.de</a> , 15.10.2012) .....	160
Abbildung 159: Vorkommen von <i>Hypnum cupressiforme</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte) .....	161
Abbildung 160: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> auf den verschiedenen Clustern .....	162
Abbildung 161: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei zunehmender Beschattung.....	162
Abbildung 162: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem pH-Wert .....	163
Abbildung 163: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg].....	163
Abbildung 164: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg] .....	164
Abbildung 165: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg].....	164
Abbildung 166: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg].....	165
Abbildung 167: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	165
Abbildung 168: Deckungsgrad von <i>Hypnum cupressiforme</i> bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg] .....	166
Abbildung 169: <i>Pohlia sp.</i> auf der Halde (Foto: Dr. Wolfram Adlassnig) .....	167
Abbildung 170: Vorkommen von <i>Pohlia sp.</i> (grün), <i>Pohlia drummondii</i> (blau) und <i>Pohlia lutescens</i> (rot) auf den Messpunkten, <i>Pohlia nutans</i> wurde nur auf HW 9 gefunden.....	168
Abbildung 171: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> auf den verschiedenen Clustern .....	169
Abbildung 172: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei zunehmender Beschattung .....	169
Abbildung 173: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem pH-Wert.....	170
Abbildung 174: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	170
Abbildung 175: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg] .....	171
Abbildung 176: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	171
Abbildung 177: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg] .....	172
Abbildung 178: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	172
Abbildung 179: Deckungsgrad von <i>Pohlia sp.</i> bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg] .....	173
Abbildung 180: Vorkommen von <i>Cladonia cervicornis</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte) .....	174
Abbildung 181: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> auf den verschiedenen Clustern.....	175
Abbildung 182: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei zunehmender Beschattung.....	175
Abbildung 183: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem pH-Wert .....	176
Abbildung 184: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg].....	176
Abbildung 185: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg].....	177
Abbildung 186: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg].....	177

Abbildung 187: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg].....	178
Abbildung 188: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	178
Abbildung 189: Deckungsgrad von <i>Cladonia cervicornis</i> bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg] .....	179
Abbildung 190: Vorkommen von <i>Cladonia pyxidata</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Punkte) .....	180
Abbildung 191: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> auf den verschiedenen Clustern .....	181
Abbildung 192: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei zunehmender Beschattung.....	181
Abbildung 193: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem pH-Wert .....	182
Abbildung 194: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] .....	182
Abbildung 195: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem verfügbarem Mangan [mg/kg] .....	183
Abbildung 196: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg].....	183
Abbildung 197: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem verfügbarem Eisen [mg/kg] .....	184
Abbildung 198: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg].....	184
Abbildung 199: Deckungsgrad von <i>Cladonia pyxidata</i> bei steigendem verfügbarem Kupfer [mg/kg].....	185
Abbildung 200: <i>Porpidia macrocarpa</i> , rostig überlaufene Lager und große (>1 mm) Apothecien, Foto: Yasmin Weiss	186
Abbildung 201: Vorkommen von <i>Porpidia macrocarpa</i> auf den Messpunkten (grün eingefärbte Messpunkte) .....	187
Abbildung 202: Deckungsgrad von <i>Porpidia macrocarpa</i> auf den verschiedenen Clustern .....	188
Abbildung 203: Deckungsgrad von <i>Porpidia macrocarpa</i> bei zunehmender Beschattung .....	188
Abbildung 204: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten in den verschiedenen Clustern, die schwarzen Striche stellen die Standardabweichung der Gesamtartenzahl dar. ....	191
Abbildung 205: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei verschiedenen Skelettgehalten .....	192
Abbildung 206: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem .....	192
Abbildung 207: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Humusanteil im Feinboden.....	193
Abbildung 208: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Tonanteil im Feinboden .....	193
Abbildung 209: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Kupfer-Gesamtgehalt.....	194
Abbildung 210: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigendem Eisen-Gesamtgehalt.....	195
Abbildung 211: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigender Kupfer-Verfügbarkeit [mg/kg].....	195
Abbildung 212: Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei steigender Eisen-Verfügbarkeit [mg/kg].....	196
Abbildung 213 Zusammensetzung der Artenzahlen von Gefäßpflanzen, Moose und Flechten bei zunehmender Beschattung .....	196
Abbildung 214: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Skelettanteil (Kruskall-Wallis Test).....	211
Abbildung 215: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Skelettanteil (Kruskall-Wallis Test).....	211
Abbildung 216: keine signifikanten Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Humusanteil im Feinboden (Kruskall-Wallis Test).....	212

Abbildung 217: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Mangan-Gesamtgehalt [mg/kg] (Kruskall Wallis Test) .....	212
Abbildung 218: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Eisen-Gesamtgehalt [mg/kg] (Kruskall-Wallis Test) .....	213
Abbildung 219: hoch signifikante Unterschiede der Vegetationsschichten bei zunehmendem Kupfer-Gesamtgehalt [mg/kg] (Kruskall-Wallis Test) .....	213
Abbildung 220: Kupfergehalt im <i>Rumex acetosella</i> bei zunehmender Beschattung .....	214
Abbildung 221: Mangangehalt im <i>Rumex acetosella</i> bei zunehmender Beschattung .....	215
Abbildung 222: Photosynthese von <i>Rumex acetosella</i> bei zunehmender Beschattung .....	215
Abbildung 223: Photosynthese von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem verfügbaren Kupfer [mg/kg] .....	216
Abbildung 224: Deckungsgrad von <i>Rumex acetosella</i> bei steigendem verfügbaren Kupfer [mg/kg] .....	216

## Curriculum Vitae

**Vorname** Yasmin Sarina  
**Nachname** Weiss  
**Adresse** Mozartstraße 25, 2500 Baden bei Wien  
**Email-Adresse** a0548704@unet.univie.ac.at  
**Geburtsdatum** 15.06.1987 (Klagenfurt, Kärnten)  
**Nationalität** Österreich

### Schulbildung

**1993-1997** Volksschule Pfarrgasse Baden bei Wien  
**1997-2005** Gymnasium Frauengasse Baden bei Wien (Matura)

### Universitäre Ausbildung

**2006-2010** Universität Wien, Studium der Biologie  
**2010-2013** Studienzweig der Ökologie

#### **Schwerpunkt des Studiums**

- Ökologie, Schwermetallstress

#### **Titel der Diplomarbeit**

##### **„Kupferhalde Knappenberg“**

- Vergleichende Analyse der azonalen Vegetation und Bodenparameter von einer Schwermetallhalde und des umliegenden Waldes bei Hirschwang

### Sprachkenntnisse

Deutsch (Muttersprache)  
Englisch (fließend)

### Lehrtätigkeit

#### **Tutor**

**2010** 300173 PP Ökologie von Siedlungsräumen  
**2011** 300459 UE Experimente in Pflanzenphysiologie:  
Schulversuchsübungen

- 2011** 300503 UE Pflanzenphysiologie für LA-BU
- 2011** 300277 PP Funktionelle Cytologie und Anatomie der Pflanze - Struktur und Funktion der Drüsen von fleischfressenden Pflanzen
- 2012** 300459 UE Experimente in Pflanzenphysiologie:  
Schulversuchsübungen
- 2012** 300503 UE Pflanzenphysiologie für LA-BU
- 2012** 300207 UE Freilandübungen zur Ökophysiologie der Pflanzen