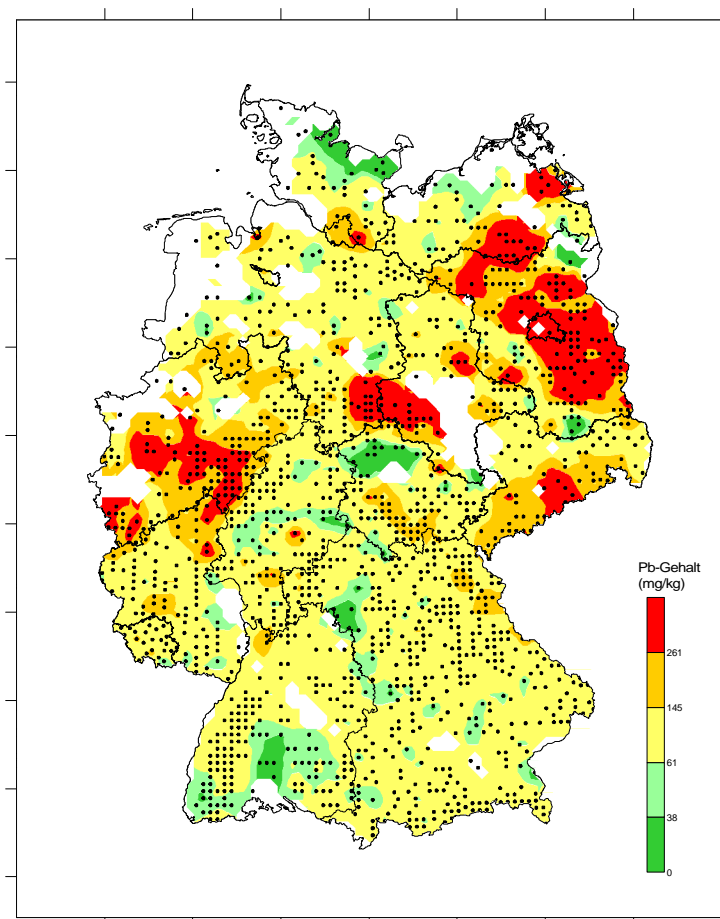


Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg  
Institut für Forstökologie und Walderfassung  
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde  
Telefon: (03334) 65-304 Telefax: (03334) 65 354

**Aufbereitung der im Rahmen der Bodenzustandserhebung unter  
Wald (BZE) erhobenen Daten zu Schwermetallgehalten in der  
Humusaufgabe für bodenschutzrelevante Auswertungen unter dem  
Gesichtspunkt der pedoregionalen Repräsentanz von  
Schwermetallgehalten im Mineralboden**

UBA-Forschungsvorhaben Nr. 299 71 232

von  
G. Baumgärtner u. B. Wolff



Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung 2000/3

Eberswalde, Juli 2000

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>METHODIK.....</b>	<b>2</b>
2.1	DATENGRUNDLAGE .....	2
2.2	DATENANALYSE .....	3
2.3	KARTENDARSTELLUNGEN UND TEXTGESTALTUNG.....	3
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>4</b>
3.1	BERECHNUNG, KLASSIFIZIERUNG UND RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER AKTUELLEN SM-GEHALTE IN DER HUMUSAUFLAGE DEUTSCHER WALDBÖDEN DIFFERENZIERT NACH SUBSTRAT, BODENTYP, HUMUSFORM UND BAUMART .....	4
3.2	ÜBERPRÜFUNG DER PEDOREGIONALEN EINTEILUNG VORHANDENER UNTERSUCHUNGEN ZU SCHWERMETALL-HINTERGRUNDWERTEN IM HINBLICK AUF DIE REPRÄSENTANZ FÜR WALDSTANDORTE .....	10
3.2.1	Vergleich der Hintergrundwerte (BGR) mit den Schwermetallgehalten der Humusauflagen auf der Basis der Bodenausgangsgesteine und der geologischen Informationen des bundesweiten BZE-Datensatzes.....	10
3.2.2	Schwermetallgehalte im mineralischen Oberboden (0 - 10 cm) der bayerischen BZE-Standorte .....	12
3.2.3	Schwermetallgehalte im mineralischen Oberboden (0 - 10 cm) der nordrhein-westfälischen BZE-Standorte.....	16
3.3	ZUORDNUNG DER BZE-PUNKTINFORMATIONEN ZU AUSGEWÄHLTEN PEDOREGIONALEN EINHEITEN UND VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER AKTUELLEN SCHWERMETALLGEHALTE IN DEN HUMUSAUFLAGEN VON WALDBÖDEN MIT VORLIEGENDEN HINTERGRUNDWERTEN.....	18
3.3.1	Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte mit den auf Grundlage der BAG 1000 regionalisierten Schwermetallgehalten in den Humusauflagen deutscher Wälder .....	18
3.3.2	Schwermetallgehalte in den Humusauflagen und im mineralischen Oberboden (0 - 30 cm) der bayerischen BZE-Standorte .....	22
3.3.3	Schwermetallgehalte in den Humusauflagen und im mineralischen Oberboden (0 - 90 cm) ausgewählter BZE-Standorte in Nordrhein-Westfalen .....	26
3.3.4	Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten der Humusauflage und des Mineralbodens.....	28
3.4	VERGLEICH DER SCHWERMETALLGEHALTE IN MOOSEN UND IN DER HUMUSAUFLAGE .....	29
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>35</b>

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen..	6
Tabelle 2:	Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen und Hauptbodentypen.....	6
Tabelle 3:	Anteile der Geologietreffer nach BÜK an den BZE-Standorten mit Angaben zu Schwermetallgehalten in der Humusauflage .....	11
Tabelle 4:	Vergleich der Bleigehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten* .....	13
Tabelle 5:	Vergleich der Kupfergehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten* .....	14
Tabelle 6:	Vergleich der Cadmiumgehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten* .....	15
Tabelle 7:	Vergleich der Zinkgehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten* .....	15
Tabelle 8:	Mediane und 90-Perzentilwerte der Schwermetallgehalte im Oberboden nordrhein-westfälischer BZE-Standorte .....	16
Tabelle 9:	Tiefenverteilung der Schwermetallgehalte eines Bodenprofils (Kiefer auf armen Sanden) bis in eine Tiefe von 90 cm .....	17
Tabelle 10:	Tiefenverteilung der Schwermetallgehalte eines Bodenprofils (Fichte auf Tongestein) bis in eine Tiefe von 90 cm.....	18
Tabelle 11:	Grenz-pH-Werte für die Mobilisierung von Schwermetallen im Boden .....	18
Tabelle 12:	Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte* (HGW) für Blei im Oberboden und der Bleigehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM) .....	19
Tabelle 13:	Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte* (HGW) für Cadmium im Oberboden und der Cadmiumgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM) .....	20
Tabelle 14:	Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte* (HGW) für Kupfer im Oberboden und der Kupfergehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM) .....	21
Tabelle 15:	Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte* (HGW) für Zink im Oberboden und der Zinkgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM) .....	21
Tabelle 16:	Schwermetallgehalte in den Humusauflagen der bayerischen BZE-Punkte und im BZE-Gesamtkollektiv.....	23
Tabelle 17:	Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Schwermetallgehalten in der Humusauflage und den ersten Mineralbodentiefenstufen ( T10 = 0 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm) .....	24

Tabelle 18: Schwermetallgehalte in den Humusauflagen der nordrhein-westfälischen BZE-Punkte und im BZE-Gesamtkollektiv ..... 26

Tabelle 19: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Bleigehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm) ..... 26

Tabelle 20: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Kupfergehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm)..... 27

Tabelle 21: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Zinkgehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm) ..... 27

Tabelle 22: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Cadmiumgehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm)..... 28

Tabelle 23: Vergleich der Schwermetallgehalte in Humusauflagen deutscher Waldböden (BZE) und in Moosproben des bundesweiten Moosmonitorings aus den Jahren 1990/91 und 1995/96 ..... 29

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Darstellung der 50- und 90-Perzentilwerte der Hintergrundwerte (Forst) über unterschiedlichen Bodenausgangsgesteinen (UTERMANN, et al., 1999) ..... 4

Abbildung 2: Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen.. 6

Abbildung 3: Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen und Hauptbodentypen..... 7

Abbildung 4: Vergleich der Bleigehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999) ..... 13

Abbildung 5: Vergleich der Kupfergehalten in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999) ..... 14

Abbildung 6: Vergleich der Cadmiumgehalten in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999) ..... 15

Abbildung 7: Vergleich der Zinkgehalten in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999) ..... 16

Abbildung 8: Beziehung zwischen Pb-Gehalt und pH-KCl in der Humusauflage (Karbonatstandorte) ..... 23

**Anlage**

- Karte 1: Verteilung der Bleigehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 2: Verteilung der Cadmiumgehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 3: Verteilung der Kupfergehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 4: Verteilung der Zinkgehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 5: Räumliche Verteilung der Bleigehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 6: Räumliche Verteilung der Cadmiumgehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 7: Räumliche Verteilung der Kupfergehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 8: Räumliche Verteilung der Zinkgehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden
- Karte 9: Übereinstimmung der geologischen Informationen aus dem BZE-Datensatz und der BAG 1000
- Karte 10: BZE-Standorte der Bundesländern Bayern und Nordrhein-Westfalen mit verfügbaren Daten zu Schwermetallgehalten im Mineralboden
- Karte 11: Hintergrundwerte (BGR) für Blei an BZE-Standorten über getroffenen Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 12: 90-Perzentile der Bleigehalte in der Humusaufgabe differenziert nach Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 13: Verhältnis zwischen den 90-Perzentilen für Bleigehalte in der Humusaufgabe und den entsprechenden Hintergrundwerten
- Karte 14: Hintergrundwerte (BGR) für Cadmium an BZE-Standorten über getroffenen Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 15: 90-Perzentile der Cadmiumgehalte in der Humusaufgabe differenziert nach Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 16: Verhältnis zwischen den 90-Perzentilen für Cadmiumgehalte in der Humusaufgabe und den entsprechenden Hintergrundwerten
- Karte 17: Hintergrundwerte (BGR) für Kupfer an BZE-Standorten über getroffenen Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 18: 90-Perzentile der Kupfergehalte in der Humusaufgabe differenziert nach Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 19: Verhältnis zwischen den 90-Perzentilen für Kupfergehalte in der Humusaufgabe und den entsprechenden Hintergrundwerten
- Karte 20: Hintergrundwerte (BGR) für Zink an BZE-Standorten über getroffenen Legendeneinheiten der BAG 1000

- Karte 21: 90-Perzentile der Zinkgehalte in der Humusauflage differenziert nach Legendeneinheiten der BAG 1000
- Karte 22: Verhältnis zwischen den 90-Perzentilen für Zinkgehalte in der Humusauflage und den entsprechenden Hintergrundwerten
- Karte 23: Räumliche Verteilung der Bleigehalte in Moosproben des Moosmonitorings 1990/91
- Karte 24: Räumliche Verteilung der Cadmiumgehalte in Moosproben des Moosmonitorings 1990/91
- Karte 25: Räumliche Verteilung der Kupfergehalte in Moosproben des Moosmonitorings 1990/91
- Karte 26: Räumliche Verteilung der Zinkgehalte in Moosproben des Moosmonitorings 1990/91
- Karte 27: Verteilung der Cadmiumgehalte in der Humusauflage von BZE-Standorten der Legendeneinheit 11 (Tongesteine) der BAG 1000

**Abkürzungen und Erläuterungen**

Abkürzung	Volltext/Erläuterung
BAG	Bodenausgangsgesteine
BAG 1000	Karte der Bodenausgangsgesteine, Maßstab 1 : 1.000.000
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BÜK 1000	Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, Maßstab 1 : 1.000.000
BZE	Bodenzustandserhebung im Wald
HGW	Hintergrundwert
HUM	Humusaufgabe
50-P	Median, 50-Perzentilwert einer Verteilung
90-P	90-Perzentilwert einer Verteilung
BAG - Legendeneinheiten	
TUS	Terrassen- und Schotterablagerungen
SAN	Sande
G/S	Geschiebemergel/-lehme mit sandiger Deckschicht
GLM	Geschiebemergel/-lehme
LÖS	Lösse
KST	Karbonatgesteine (Kalk- und Mergelsteine)
TST	Tongesteine
SST	Sandsteine
BMM	Basische Magmatite und Metamorphite
SMM	Saure Magmatite und Metamorphite
Substratgruppen (BZE)	
01	Karbonathaltige Lockersedimente über karbonathaltigen Ausgangsgesteinen bzw. karbonathaltiges Ausgangsgestein
02	Karbonatfreie Lockersedimente über karbonathaltigem Ausgangsmaterial
03	Umgelagerte kalkfreie Lockersedimente
04	Verwitterungs- bzw. Decklehme über Ton- und Schluffstein; Ton, Tonsteine, Grauwacken
05	Verwitterungslehme und Decklehm über quarzreichen Ausgangsgesteinen sowie quarzreiche Ausgangsgesteine (z.B. Buntsandstein, paläozoische Sandsteine, Quarzite, sonstige Sandsteine)
06	arme (pleistozäne) Sande
07	Basische Magmatite oder Metamorphite sowie Lehme oder Mischsubstrate über basischen Magmatiten oder Metamorphiten
08	Intermediäre und saure Magmatite oder Metamorphite sowie Lehme oder Mischsubstrate über intermediären und sauren Magmatiten oder Metamorphiten (z.B. Keratophyne, Andesite, Bims, Granite, Gneise)

*ALLE DINGE SIND GIFT, UND NICHTS IST OHNE GIFT.  
ALLEIN DIE DOSIS MACHT, DAB EIN DING KEIN GIFT IST.*

Philippus Aureolus Theophrastus Paracelsus  
(eigentlich: Theophrastus Bombastus von Hohenheim)  
11.11.1493 bis 24.9.1541  
Arzt, Naturforscher und Philosoph.

## **1 Einleitung**

Für bodenschutzrelevante Fragestellungen ist die Ermittlung bundesweit repräsentativer Hintergrundwerte für Schwermetalle von hohem Interesse. Zur Untersetzung des Bundes-Bodenschutzgesetzes wurden Hintergrundwerte für Schwermetallgehalte in Oberböden ermittelt (Bund-Länder-AG 1998). Hintergrundwerte sind dabei definiert als repräsentative Werte für allgemein verbreitete Hintergrundgehalte eines Stoffes oder einer Stoffgruppe in Böden. Der Hintergrundgehalt eines Stoffes setzt sich dabei aus dem geogenen Grundgehalt des Bodens und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden zusammen. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes sollen vorhandene Datenquellen zu Schwermetallgehalten in Waldböden erschlossen und bewertet werden.

In einem gerade abgeschlossenen Vorhaben des UBA (Vorhaben F&E 297 71 010 siehe Bericht: UTERMANN, et al. 1999), welches von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) durchgeführt wurde, sind mit Hilfe von Mineralbodenuntersuchungen der Bundesländer pedoregional repräsentative Flächen für Hintergrundgehalte von Schwermetallen in Mineralböden erarbeitet worden. Die abgeleiteten Hintergrundwerte resultieren aus der Regionalisierung auf Basis der geologischen Verhältnisse (Bodenausgangsgesteine BAG) und der Hauptlandnutzungsformen (HLN). Die Waldverteilung ging somit in die Herleitung der Hintergrundwerte ein. Bei der Analyse der Schwermetallgehalte im Boden von Waldstandorten blieb die Humusaufgabe in diesem Vorhaben unberücksichtigt.

Im Rahmen der Bodenzustandserhebung im Wald BZE (WOLFF & RIEK, 1997) wurden ca. 1800 Waldstandorte bodenchemisch analysiert. Dies umschloss auch die Analyse der Schwermetallgehalte in der Humusaufgabe. Schwermetallanalysen des Mineralbodens wurden im Rahmen der BZE nicht flächendeckend durchgeführt.

Die Hintergrundgehalte der Schwermetalle setzen sich aus einem geogenem (z.T. durch pedogene Prozesse überlagerten) und einem atmogenem Anteil (ubiquitär/diffuse Einträge) zusammen. Der atmogene Eintrag ist auch bei Annahme einer diffusen Verteilung in verschiedenen Waldökosystemen nicht gleich. Ursache ist die unterschiedliche Interzeption bei verschiedenen Bestockungen. (ANGEHRN-BETTINAZZI, HERTZ, 1990; BRECHTEL, 1989). Als primäre Akzeptoren für die Deposition (nasse und trockene) dienen die Baumkronen. Eingetragene Schwermetalle erreichen dann durch Abwaschung oder Streufall die Humusaufgabe. Die Ergebnisse der BZE zeigen, dass zum Teil erhebliche Mengen an Schwermetallen in der Humusaufgabe gebunden werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Schwermetalle aus anthropogenen Quellen gegenüber geogenen Anreicherungen eine wesentlich höhere Mobilität aufweisen (KUNTZE, FLEIGE, GRUPE, KOCH, PLUQUET, STUMPFE, 1995) stellen hohe Gesamtgehalte in der Humusaufgabe ein Gefährdungspotential dar. Vor dem Hintergrund des Schutzes von Waldökosystemen, Böden und Grundwasser sollte daher die Humusaufgabe bei der



Beurteilung von Schwermetallgehalten in Waldböden unbedingt berücksichtigt werden.

In der Kombination der von der BGR vorliegenden Ergebnisse zur Regionalisierung der Hintergrundwerte in Oberböden und der Daten der BZE aus der Humusaufgabe sollte ermittelt werden, in wie weit die Schwermetallgehalte in der Humusaufgabe den Bodenausgangsgesteinen folgen und ob deren Geometrie für eine Regionalisierung der Schwermetallgehalte in der Humusgehalte verwendet werden kann. Erwartet wurde ein stärkerer atmogener Einfluss, der im Weiteren durch einen Vergleich der Schwermetallgehalte in der Humusaufgabe an BZE-Standorten mit den für diese Standorte anzunehmenden Hintergrundgehalten im Oberboden überprüft und durch den Vergleich mit den Daten des Moosmonitorings belegt werden sollte.

## **2 Methodik**

### **2.1 Datengrundlage**

Folgende Daten standen für die Auswertungen zur Verfügung:

- Schwermetallgehalte in den Humusaufgaben deutscher Waldböden (N = 1674, aus dem Gesamtdatensatz der Bodenzustandserhebung im Wald BZE)
- Hintergrundwerte im Mineralboden unter Wald auf unterschiedlichen Bodenausgangsgesteinen (UTERMANN, et al., 1999). Punktinformationen standen nicht zur Verfügung.
- Ergebnisse des bundesweiten Moosmonitorings 1990/91 (HERPIN, U., MARKERT, B., LIETH, H., 1995)
- Ergebnisse des bundesweiten Moosmonitorings 1995/96 (SIEWERS, U., HERPIN, U., 1998)

Zusätzlich wurden durch die Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen bisher noch nicht veröffentlichte Daten aus Zusatzuntersuchungen zur BZE zur Verfügung gestellt:

- Schwermetallgehalte aus den Mineralbodentiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm aller bayerischen BZE-Standorte (N = 414)
- Schwermetallgehalte im Mineralboden bis in eine Tiefe von max. 90 cm aller in nordrhein-westfälischen Staatswäldern gelegenen BZE-Standorten (N = 25).

Ein zentrales Problem des Forschungsvorhabens ist die Vergleichbarkeit der vorliegenden Datengrundlagen. Dies beruht auf mehreren Aspekten. Es können nur an ausgewählten Standorten Daten aus Humusaufgabe und Mineralboden verglichen werden (BZE-Datensatz aus Bayern, Teile des Datensatzes Nordrhein-Westfalen). Die zur Ermittlung der Hintergrundwerte herangezogenen Schwermetalldaten lagen nicht vor. Es ist davon auszugehen, dass die Probenstandorte (BGR, BZE) auf gleichen Ausgangsgesteinen sowohl in bodenchemischen als auch in standörtlichen Bedingungen (z.B. Bestandesstruktur, Exposition) zum Teil erheblich voneinander abweichen.

Darüber hinaus differieren die Aufschluss- und Analyseverfahren. In der Regel wurden bei der BZE Schwermetallgehalte aus einem Königswasserauszug bestimmt. Im Rahmen einer BZE-begleitenden Ringanalyse konnte für die BZE-Ergebnisse jedoch gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Aufschluss- (Königswasser, HNO<sub>3</sub>-Druckaufschluss) und Analyseverfahren für Schwermetallgehalte eine bundesweite Auswertung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen nicht wesentlich beeinträchtigen (KÖNIG, WOLFF, 1993). Bei der Analytik zur Berechnung der Hintergrundwerte wurden durch die BGR Totalgehalte mittels HF/HCL/HClO<sub>4</sub>-druckaufschluss bzw. Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt. Gehalte, die aus einem Königswasserauszug bestimmt wurden, konnten mit Hilfe von Regressionsfunktionen in Totalgehalte umgerechnet werden. Die Hintergrundwerte gehen somit auf Totalgehalte zurück ().

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnte nachgewiesen werden, dass auch bei verhältnismäßig geringem Immissionseinfluss (Bayern) die Gehalte der Humusauflagen beim Königswasserauszug signifikant gegenüber den Mineralbodengehalten erhöht sind. Da in der Regel die Totalgehalte höher liegen als die Gesamtgehalte aus dem Königswasserauszug (vgl. Regressionsfunktionen UTERMANN, et al., 1999), wird die Differenz beim Vergleich der Königswassergehalte aus dem BZE-Datensatz mit den Totalgehalten als Grundlage der Hintergrundwerte eher unter- als überschätzt. Eine Überbewertung der Humusgehalte ist somit ausgeschlossen. Die aufwendige Umrechnung der Gehalte aus verschiedenen Methoden wurde nicht durchgeführt.

## **2.2 Datenanalyse**

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit SAS für Windows Version 6.12 durchgeführt. In der Regel wurde bei Testprozeduren eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,05$  angenommen. Im folgenden werden daher nur Abweichungen von dieser Festlegung explizit erwähnt. Auf eine Ausweisung unterschiedlicher Signifikanzniveaus wurde verzichtet.

Neben den herkömmlichen statistischen Verfahren wurden auch geostatistische Berechnungen vorgenommen. Zur Berechnung und Darstellung wurde das Programm Surfer Version 7.0 angewendet.

Die Datenverwaltung erfolgte mit Microsoft Access 97. Die Aufbereitung der Daten für SAS und Teile der graphischen Aufbereitung des Textes erfolgten mit Microsoft Excel 97.

## **2.3 Kartendarstellungen und Textgestaltung**

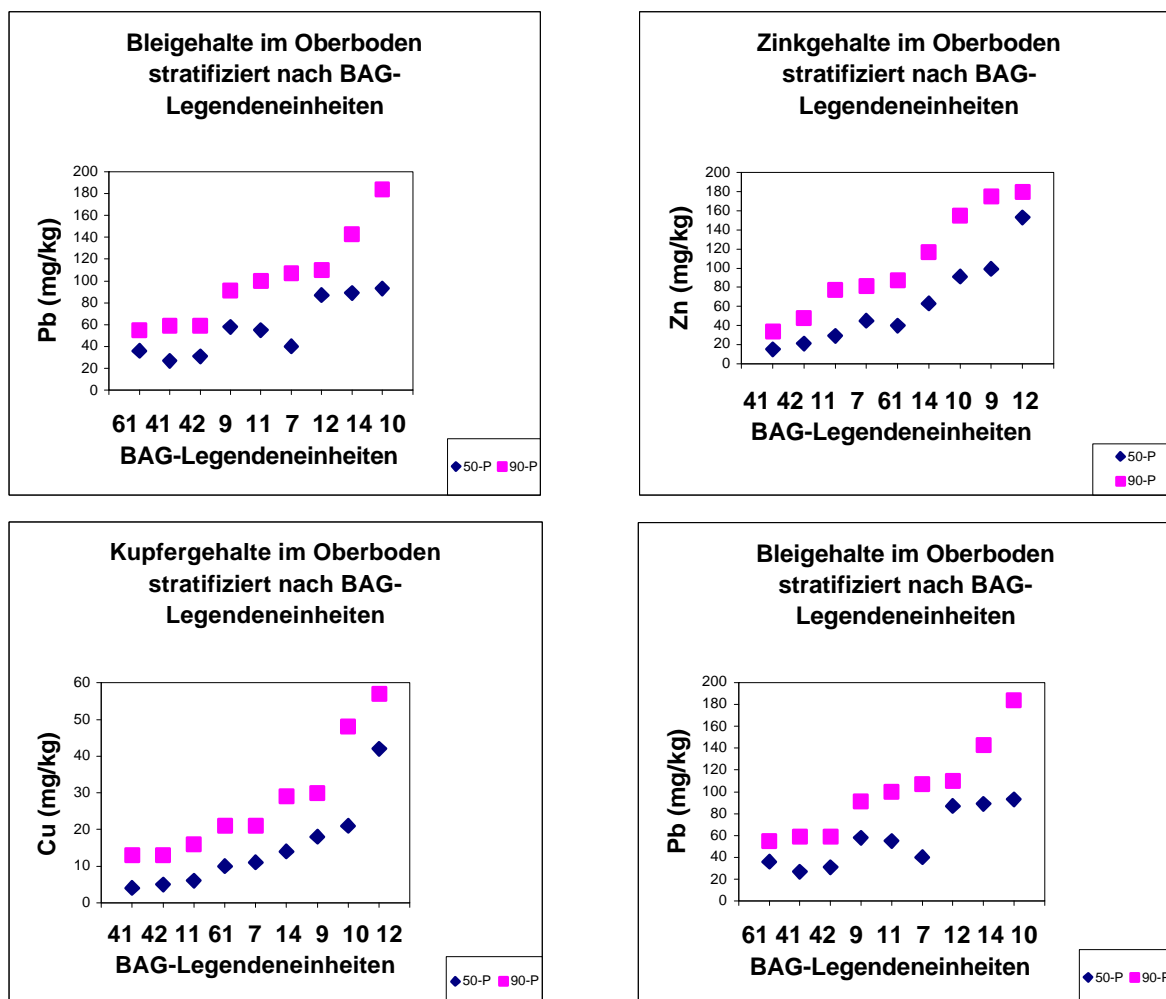
Die im Bericht vorhandenen Karten wurden mit Hilfe von PCArcInfo und ArcView GIS Version 3.0 erstellt. Die Kartendarstellungen auf geostatistischer Grundlage erfolgten mit Surfer 7.0. Die Karten werden im Maßstab 1 : 4.000.000 dargestellt.

Die Textgestaltung erfolgt mit Hilfe der Microsoft-Office 97 Produkte. Bei der Erstellung von Graphiken wurden zusätzlich Harvard Graphics 3.0 und CorelDRAW 9.0 eingesetzt.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Berechnung, Klassifizierung und räumliche Darstellung der aktuellen SM-Gehalte in der Humusauflage deutscher Waldböden differenziert nach Substrat, Bodentyp, Humusform und Baumart

Zunächst wurden die räumlichen Verteilungsmuster der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden rekapituliert und graphisch dargestellt (Anlage Karten 1 - 4). Die im Waldbodenbericht (WOLFF & RIEK, 1997) vorgenommene Einteilung der Gesamtvarianz durch unterschiedlich weit gefasste Perzentilspannen (0-10, 10-25, 25-75, 75-90, 90-100) wurde übernommen. Die bundesweit vorliegenden Schwermetallgehalte in den Humusauflagen wurden in Hinblick auf regionale Besonderheiten nach verschiedenen Standortparametern stratifiziert. Diese Stratifizierung wurde in der Erstauswertung der BZE-Daten noch nicht vorgenommen. Es wurden hierbei Einzelparameter sowie Parameterkombinationen



BAG-Legendeneinheiten ( 41 = Sande (NW), 42 = Sande (NO), 61 = Geschiebemergel/-lehme, 7 = Löss, 9 = Karbonatgesteine, 10 = Tongesteine, 11 = Sandsteine, 12 = Basische Magmatite und Metamorphite, 14 = Saure Magmatite und Metamorphite

**Abbildung 1: Darstellung der 50- und 90-Perzentilwerte der Hintergrundwerte (Forst) über unterschiedlichen Bodenausgangsgesteinen (UTERMANN, et al., 1999)**

auf ihre Eignung geprüft. Grundlage für die Beurteilung der Ergebnisse waren die Auswertung der Hintergrundwerte der BGR-Studie. Die Abbildung 1 zeigt die vorliegenden Hintergrundwerte für verschiedene Bodenausgangsgesteine.

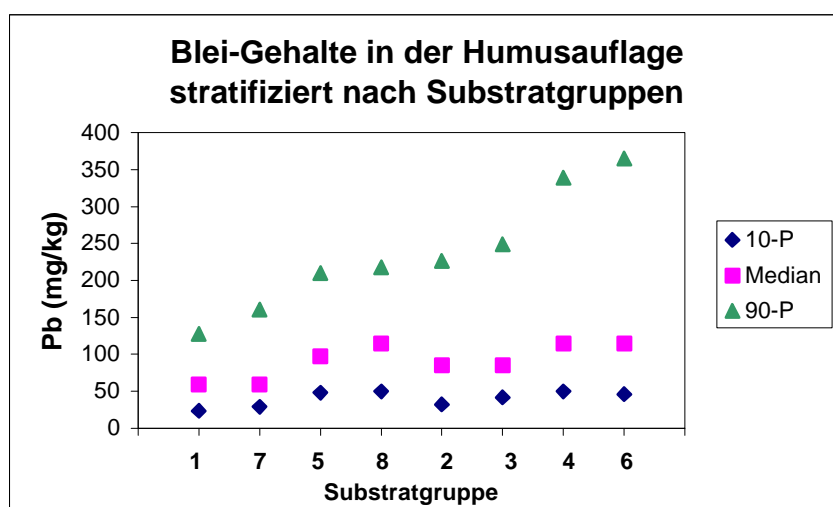
Bei Cadmium, Kupfer und Zink steigen neben den 90-Perzentilwerten auch die Medianwerte an. Dies deutet auf eine geologische Ursache für die unterschiedlichen Schwermetallgehalte. Beim Blei zeigen die schwankenden Mediane bei steigenden 90-Perzentilwerten eine stärkere Beeinflussung der Hintergrundwerte durch andere Einflüsse (z. B. diffuse Einträge). Bei der Prüfung geologisch geprägter Merkmale auf ihre Eignung als Eingangsgrößen bei der Regionalisierung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen dient das Verhältnis zwischen 90-Perzentilwerten und Medianen als Indiz. Bei geogen geprägten Gehalten müssen die 90-Perzentile und die Mediane zweier oder mehrerer geologischer Einheiten annähernd gleiche Verhältnisse aufweisen. Ist dies nicht der Fall überlagern andere Einflussgrößen die Schwermetallverteilung.

Um die Möglichkeit einer Regionalisierung anhand von bodenkundlichen bzw. standörtlichen Faktoren zu prüfen wurden geeignete Indikatoren aus dem BZE-Datensatz untersucht. Als potentiell geeignet wurden die Merkmale Substratgruppe, Hauptbodentyp, Hauptbaumart und Hauptthumusform (zu Definitionen vgl. Deutscher Waldbodenbericht WOLFF & RIEK, 1997) und ihre verschiedenen Kombinationen ausgewählt und analysiert. Ein besonderes Augenmerk lag hierbei auf den Substratgruppen, die neben der geologischen Grundlage auch verschiedene bodenchemische und bodenphysikalische Bedingungen repräsentieren. Im Rahmen der BZE wurden die Substrattypen zu Substratgruppen zusammengefasst (WOLFF & RIEK, 1997). Diese Substratgruppen wurden bei den vorliegenden Auswertungen zugrunde gelegt. Die Untersuchungen ergaben für die Einzelfaktoren sowie für die untersuchten Faktorenkombinationen ein ähnliches Bild. Im folgenden werden daher nur die Ergebnisse der Stratifizierung nach Substratgruppen und nach Substratgruppen/Hauptbodentypen eingehender vorgestellt.

In Anlehnung an die Auswertungen zur Ermittlung der Hintergrundwerte wurden nur Gruppen berücksichtigt, für die mindestens 20 Probestandorte zur Verfügung standen. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse wird die Darstellung in Tabellen und Graphiken auf aussagekräftige Beispiele beschränkt. In Tabelle 1 und Abbildung 2 sind die Ergebnisse für die Bleigehalte in den Humusauflagen zusammengefasst. Entgegen den Beobachtungen bei den oben dargestellten Hintergrundwerten bleiben hier die Medianwerte gegenüber den 90-Perzentilwerten auf einem annähernd gleichen Niveau. Die Vermutung, dass die Verteilung der Bleigehalte in den Humusauflagen nicht oder nur indirekt vom Substrat bestimmt werden liegt nahe. Die Schwermetalle Zink und Cadmium zeigen ein ähnliches Verhalten, wobei die Mediane stärker schwanken als bei Blei. Kupfer hingegen zeigt einen annähernd gleichbleibenden Verlauf von Median- und 90-Perzentilwerten. Auffallend sind die hohen Cu-Gehalte in den Humusauflagen von sandigen Substraten, die einen extrem niedrigen natürlichen Grundgehalt an Kupfer aufweisen (2 - 5 mg/kg). Der Median liegt hier bei 22 mg/kg und der 90-Perzentilwert bei 79 mg/kg.

**Tabelle 1: Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen**

Blei-gehalte in der Humusauflage (mg/kg)					
Substratgruppe	Kürzel	N	10-Perzentil	Median	90-Perzentil
01	1	116	24	59	128
07	7	33	29	59	160
05	5	347	48	97	210
08	8	193	50	115	220
02	2	210	32	85	227
03	3	237	42	85	249
04	4	247	50	115	339
06	6	243	46	114	365



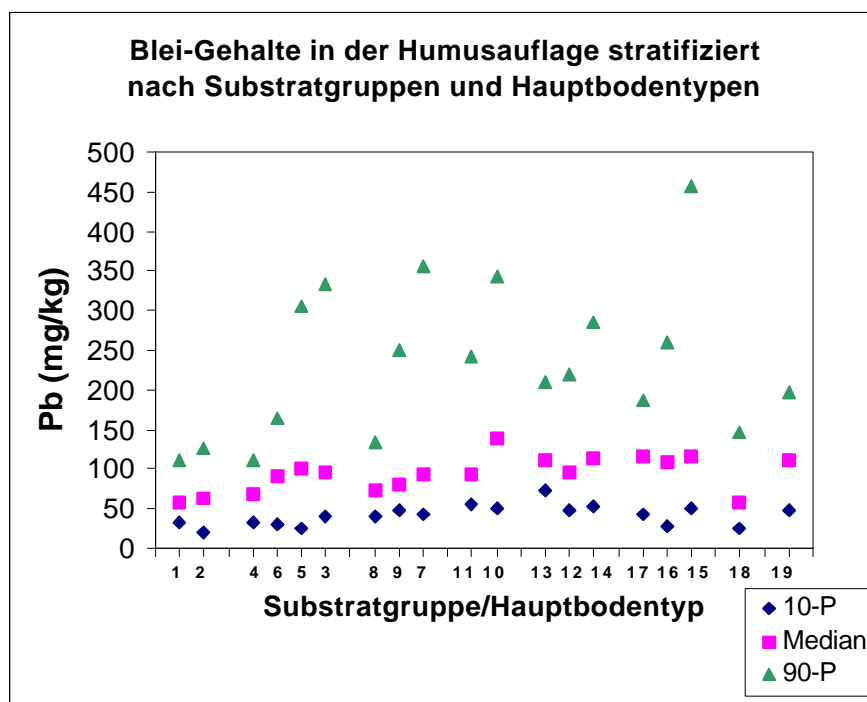
**Abbildung 2: Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen**

Zur weiteren Untergliederung der Ergebnisse der Substratgruppenstratifizierung wurden die Schwermetallgehalte in der Humusauflage zusätzlich nach Hauptbodentypen stratifiziert. Tabelle 2 und Abbildung 3 zeigen die Ergebnisse für das Element Blei. Mit Ausnahme der Substratgruppe Tongesteine differenzieren die Hauptbodentypen innerhalb der Substratgruppen nicht. Auch hier bewegen sich die Mediane bei unterschiedlichen 90-Perzentilwerten auf einem annähernd gleichem Niveau. Die Ergebnisse für die Schwermetalle Kupfer, Zink und Cadmium unterscheiden sich nicht wesentlich von den Ergebnissen für Blei.

**Tabelle 2: Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen und Hauptbodentypen**

Blei-gehalte in der Humusauflage (mg/kg)					
Hauptbodentyp	Kürzel	N	10-Perzentil	Median	90-Perzentil
Substratgruppe 01					
CF - Terra fusca	1	24	33.1	58.9	111
R - Rendzina	2	61	21.3	62.9	126
Substratgruppe 02					
CF - Terra fusca	4	37	32.3	69	111.1
S - Pseudogley	6	32	29.5	90	164.3
L - Parabraunerde	5	33	26.3	100.1	305.6
B - Braunerde	3	78	40	96.6	332.3

Bleigehalte in der Humusauflage (mg/kg)					
Hauptbodentyp	Kürzel	N	10-Perzentil	Median	90-Perzentil
Substratgruppe 03					
L - Parabraunerde	8	50	39.4	73	134.1
S - Pseudogley	9	58	48	80.9	248.8
B - Braunerde	7	91	42.9	94.4	355
Substratgruppe 04t					
S - Pseudogley	11	44	56.3	93.1	242.9
B - Braunerde	10	172	50.6	139.1	343.2
Substratgruppe 05					
P - Podsol	13	33	74	110	210.2
B - Braunerde	12	277	48	96.6	219
S - Pseudogley	14	29	54	114.1	286.4
Substratgruppe 06					
P - Podsol	17	60	43.9	116.6	188
G - Gley	16	28	26.9	108.7	259.4
B - Braunerde	15	131	50	114.9	457.2
Substratgruppe 07					
B - Braunerde	18	25	26.1	59.3	145.9
Substratgruppe 08					
B - Braunerde	19	172	48.3	112	197.9



**Abbildung 3: Bleigehalte in der Humusauflage stratifiziert nach Substratgruppen und Hauptbodentypen**

Die Berechnungen für die anderen bodenkundlichen und standörtlichen Parameter ergaben ähnliche Ergebnisse. Eine pedologische Abhängigkeit der Schwermetallgehalte in der Humusauflage als Grundlage für eine Regionalisierung der Schwermetallgehalte konnte nicht nachgewiesen werden. Vielmehr bestätigen die Ergebnisse die in der Literatur häufig genannte immissionsbedingte Überprägung

der Schwermetallgehalte in Waldböden. Die Autoren SCHULTE & BLUM, (1997) fassten die Ergebnisse verschiedener anderer Autoren wie folgt zusammen:

- Die versauerungssensitiven Elemente Cd, Co, Ni und Zn weisen bei den meisten Standorten negative Ökosystembilanzen auf.
- Die eine starke Affinität für organische Bodenkomponenten aufweisenden Schwermetalle Cu, Cr und Pb reichern sich hingegen in den Waldökosystemen vor allem in der Humusaufgabe an.

Die hieraus folgende anthropogene Prägung der Schwermetallgehalte in den Humusaufgaben wurde bereits im Deutschen Waldbodenbericht herausgestellt (WOLFF & RIEK, 1997).

Bodenkundliche und standörtliche Faktoren können nicht als alleinige Faktoren zur Regionalisierung der Schwermetallgehalte in Humusaufgaben herangezogen werden. Sie liefern jedoch wichtige Hinweise für die Interpretation der räumlichen Verteilungsmuster, die durch die kartographische Darstellung visualisiert werden können (Anlage Karten 1 - 4).

Die Höhe der Gehalte ist ein Ausdruck der Ökosystembilanzen der einzelnen Schwermetalle (SCHULTE & BLUM, 1997). Bei der Betrachtung des Ökosystemkompartiments Humusaufgabe stellt sich somit die Frage nach Ein- und Austrag von Schwermetallen. Der Eintrag erfolgt zum überwiegenden Teil über den Luftpfad als nasse und trockene Deposition. Die Höhe des Eintrages hängt im wesentlichen von der Menge der Metalle in der Atmosphäre (ALLOWAY & AYRES, 1996) und der Höhe der Niederschläge insgesamt und deren Gehalt an Schwermetallen (Bestandesniederschlag - Freilandniederschlag, BRECHTEL, 1989) ab. Weitere wichtige Randbedingungen wie Bestandesstruktur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die Exposition des Bestandes kommen hinzu. Diese sind vor allem für den Anteil der Trockendeposition entscheidend, der wiederum einen wesentlichen Anteil an der Gesamtdeposition auf Waldflächen hat. Für den Austrag der Schwermetalle sind deren Mobilität und die Zusammensetzung der organischen Substanz in der Humusaufgabe verantwortlich. Die Mobilität der Schwermetalle im Humus ist unter anderem abhängig von deren Affinität zu organischer Substanz und vom pH-Wert. Die Menge und Qualität der organischen Substanz (Zusammensetzung der org. Bestandteile) ist abhängig von bodenchemischen Parametern und der Art der anfallenden Streu. Wichtigster Parameter bei der Streuzersetzung ist der pH-Wert. Der Austrag der Schwermetalle wird somit ganz wesentlich über pH-Wert-abhängige Prozesse gesteuert.

Als Beispiele für pH-Wert-abhängige Schwermetallgehalte in Humusaufgaben sollen hier Karbonatstandorte der Alpen und der Fränkischen Alb sowie Standorte auf sauren Magmatiten und Metamorphiten des Erzgebirges herangezogen werden. Über den Karbonatgesteinen weisen die Humusaufgaben vergleichsweise hohe pH-Werte auf. Die hierdurch geförderte Streuzersetzung führt zur Bildung geringmächtiger Mull (bzw. mullartiger Moder) - Auflagehorizonten. Der hohe pH-Wert führt zu einer Immobilisierung von Cadmium, wodurch die Gehalte der Humusaufgaben stark erhöht sind. Beim Blei ist eine erhöhte Akkumulation auf diesen Standorten nicht nachweisbar. Hieraus lässt sich schließen, dass nicht eine erhöhte Immission, sondern das Verhalten des Cadmiums in der Humusaufgabe für die hohen Konzentrationen verantwortlich ist. Im Erzgebirge finden sich entgegengesetzte

Verhältnisse. Die Gewinnung und Verhüttung von Metallerzen hat hier zu einer immissionsbedingten Erhöhung der Bleikonzentrationen in den Humusauflagen geführt. Entsprechend dem Ursprung der Belastung wären hier auch erhöhte Cadmiumgehalte zu erwarten. Die niedrigen pH-Werte in den Humusauflagen bewirken hier jedoch eine verstärkte Mobilisierung des Cadmiums und somit vergleichsweise niedrige Cadmiumgehalte in den Humusauflagen. Die Verteilung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen deutscher Waldböden (Anlage Karten 1 - 4) stellen somit nur eine Momentaufnahme für den Erhebungszeitraum der BZE-Daten dar. Die Karten dürfen aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Humusauflagen (geringes oder hohes Akkumulationsvermögen, Dauer des Humusabbaus) nicht als Abbild der Immissionssituation fehlinterpretiert werden. Der Vergleich mit Depositionsmessungen kann jedoch erste Hinweise auf das Verhalten der Schwermetalle im Ökosystem, ihre Mobilität und mögliche Gefährdungen von Boden und Grundwasser liefern (vgl. Abschnitt 3.4).

Auch ohne pedologische Muster der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen sollten die punktuellen Daten der Bodenzustandserhebung im Wald in Flächeninformationen umgesetzt werden. Um möglichst vergleichbare Bedingungen für alle Bundesländer zu schaffen wurde der BZE-Datensatz in Verdichtungsregionen auf das 8 x 8 km<sup>2</sup> Grundraster reduziert. Der zur Berechnung geostatistischer Verfahren zur Verfügung stehende Datensatz für Schwermetallgehalte in Humusauflagen reduzierte sich dadurch auf ca. 1500 Datensätze.

Zunächst wurden für alle Schwermetalle Semivariogramme an die Verteilungen angepasst. Die Variogramme für Cadmium und Kupfer zeigten eine sehr hohe Variabilität unterhalb der einfachen Rasterdistanz. Eine Regionalisierung mit Hilfe des Kriging-Verfahrens schied für diese Elemente somit aus. Bei den Elementen Blei und Zink konnten interpretierbare Variogramme errechnet werden, die mit Hilfe des Kriging-Verfahrens in Flächeninformationen umgesetzt wurden. Um für die Elemente Kupfer und Cadmium zu räumlichen Verteilungsmustern zu kommen wurde ein nicht-statistisches Interpolationsverfahren (Inverse-Distance-Methode) angewendet. Da die Variogramme von Blei und Zink neben sehr starken Schwankungen auch einen großen Anteil der Varianz im sehr nahen Bereich aufwiesen, wurden die Flächendarstellungen für diese Elemente zusätzlich mit der Inverse-Distance-Methode berechnet. Die räumlichen Verteilungsmuster für Blei und Zink zeigten zwischen den Kriging-Karten und den Inverse-Distance-Karten keine wesentlichen Unterschiede. Aus Gründen der Methodengleichheit und der Vergleichbarkeit mit den Karten des Moosmonitorings wurde daher generell die Inverse-Distance-Methode verwendet.

Die Interpretation der räumlichen Verteilung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen der deutschen Wälder (Anlage, Karten 5 - 8) wird durch die nutzungsformenübergreifende Darstellung etwas erschwert. Eine ausschließliche Darstellung der Waldflächen z.B. durch die Verschneidung mit den Informationen aus dem Corine-Landcover-Modell, war im Rahmen des Vorhabens nicht zu realisieren. Um Fehlinterpretationen zu minimieren, wurden daher die Probepunkte mit dargestellt.

Hohe und sehr hohe Bleikonzentrationen finden sich in den Humusauflagen Nordrhein-Westfalens, im Harz, im Erzgebirge in weiten Teilen Brandenburgs sowie in Teilen Mecklenburg-Vorpommerns. Zusammenhängende Gebiete geringer Belastung treten nicht auf. Die Belastungsschwerpunkte beim Cadmium liegen im



westlichen Nordrhein-Westfalen im Harz, im östlichen Sachsen-Anhalt, im Großraum Berlin und in den Alpen. Weite Teile Bayerns weisen geringe bis sehr geringe Cadmiumgehalte in den Humusauflagen auf. Mit Ausnahme der Alpen ähneln die Belastungsgebiete beim Kupfer denen des Cadmiums. Ähnlich wie beim Blei sind keine größeren Gebiete geringer und sehr geringer Belastung vorhanden. Beim Zink zeigen Humusauflagen in Nordrhein-Westfalen, im Harz, im östlichen Sachsen-Anhalt im östlichen Brandenburg und in Teilen Mecklenburg Vorpommerns hohe bis sehr hohe Gehalte. In Baden-Württemberg finden sich große Gebiete mit geringen und sehr geringen Zinkgehalten.

### **3.2 Überprüfung der pedoregionalen Einteilung vorhandener Untersuchungen zu Schwermetall-Hintergrundwerten im Hinblick auf die Repräsentanz für Waldstandorte**

#### **3.2.1 Vergleich der Hintergrundwerte (BGR) mit den Schwermetallgehalten der Humusauflagen auf der Basis der Bodenausgangsgesteine und der geologischen Informationen des bundesweiten BZE-Datensatzes**

Neben der Vergleichbarkeit vorliegender Hintergrundwerte (Mineralboden) mit den Schwermetallgehalten in den Humusauflagen sollte im Rahmen des Projektes die Repräsentativität der Hintergrundwerte für die Waldflächen Deutschlands beleuchtet werden. Eine eingehende Validierung ist aufgrund der fehlenden Angaben zu Schwermetallgehalten im Mineralboden innerhalb des BZE-Datensatzes nicht möglich. Basierend auf diesen Überlegungen wurden die Teilaspekte "Vergleichbarkeit der Grundlageninformationen" und "regionale Differenzierung von Schwermetallgehalten im Mineralboden unter Wald" (Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen) näher untersucht.

#### ***Vergleichbarkeit der Grundlageninformationen***

Die Grundlage zur räumlichen Gliederung der Hintergrundwerte entstammen der Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland und im Maßstab 1 : 1.000.000 (BÜK 1000 HARTWICH, et al. 1995). Im Rahmen des UBA-Forschungsvorhabens 297 71 010 (UTERMANN, et al., 1999) wurden die Legendeneinheiten der BÜK 1000 entsprechend der geologischen Grundlagen zu Legendeneinheiten der Bodenausgangsgesteine zusammengefasst. Es entstand die Karte der Bodenausgangsgesteine im Maßstab 1 : 1.000.000 (BAG 1000). Die Bodenausgangsgesteine stellen wiederum die Basis für die Regionalisierung von Schwermetallgehalten im Mineralboden dar. Die Repräsentativität der Ergebnisse wurde im Rahmen des genannten Vorhabens untersucht. Differenziert nach den Hauptlandnutzungsformen Acker, Grünland und Wald und den Bodenausgangsgesteinen wurden beim Vorliegen einer ausreichenden Menge an Bodenprofilen Hintergrundwerte abgeleitet.

Im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe geförderten Forschungsprojektes wurde die Datengrundlage zur Erarbeitung einer Bodenübersichtskarte für die Waldflächen Deutschlands erarbeitet (SCHMIDT, WOLFF, BARITZ, MONSE, KIWITT, 1998). Als Teil dieser Arbeit und einer weiteren Auswertung der BZE Daten (BARITZ, 1996) wurden die Angaben der BÜK 1000 mit den Aussagen zu Bodentyp und Substrat an der BZE-Standorte verglichen. Es ergab sich ein Anteil von 87,5 % der BZE-Standorte bei denen der Bodentyp mit den Leit- oder Begleitböden der Leitbodenassoziationen der BÜK 1000 übereinstimmten. Bei

12,5 % konnten keine Übereinstimmungen gefunden werden. Zusätzlich wurde überprüft, ob die Angaben zur Geologie an den BZE-Standorten mit den Angaben der Geologie der Leitbodenassoziationen übereinstimmten. An 209 der 1771 ausgewerteten BZE-Probepunkte (12 %) stimmte die Geologie nicht mit den Angaben der BÜK 1000 überein. Zur Übertragung dieser Ergebnisse auf das vorliegende Vorhaben wurden alle BZE-Standorte mit Informationen zu Schwermetallgehalten und zur Geologie herausgefiltert, für die Hintergrundwerte vorliegen. Bei Zusammenfassung der Leitbodenassoziationen zu den Legendeneinheiten der BAG 1000 ergeben sich bei den Bodenausgangsgesteinen, für die Hintergrundwerte unter Wald vorliegen, Anteile der Nichttreffer zwischen 0 und 27 % (Tabelle 3). Die Nichttreffer treten z.T. räumlich konzentriert auf (Anlage, Karte 9). Auf Grund der vorhandenen Datenlage kann die Repräsentanz der Hintergrundwerte für die Landnutzungsform Wald nicht abschließend beurteilt werden. Eventuell werden jedoch auf der Basis der Überarbeitung der BÜK 1000 (unter Einbeziehung nutzungsdifferenzierter Karten) Korrekturen der BAG 1000 und der darauf basierenden Hintergrundwerte notwendig. Für die weitere Bearbeitung wurden nur BZE-Standorte berücksichtigt, bei denen die Geologie mit den Bodenausgangsgesteinen der BAG 1000 übereinstimmt.

**Tabelle 3: Anteile der Geologietreffer nach BÜK an den BZE-Standorten mit Angaben zu Schwermetallgehalten in der Humusaufgabe**

BAG	Anzahl BZE	Geologie Nichttreffer	%	Geologietreffer
BMM	30	8	27	22
GLM (Süd)	40	0	0	40
KST	181	13	7	168
LÖS	143	23	16	120
SAN	277	35	13	241
SMM	172	19	11	153
SST	319	47	15	272
TST	290	16	6	274
Summe	1452	161	11	1290

### ***Regionale Differenzierung von Schwermetallgehalten im Mineralboden unter Wald***

Für die folgenden Vergleiche von Schwermetallgehalten im Mineralboden von BZE-Standorten mit den Hintergrundwerten sind einige methodische Voraussetzungen kurz darzustellen. Für die Ermittlung der Hintergrundwerte (Bund-Länder-AG 1998) erfolgten horizontweise Beprobungen des Oberbodens. Unter Wald wurden alle zwischen 0 - 10 cm Tiefe liegenden A-Horizonte beprobt und analysiert. In Fällen, in denen der erste A-Horizont eine größere Mächtigkeit (> 10 cm) aufwies, wurde er komplett analysiert. Bei der BZE erfolgte die Beprobung optional horizontweise oder in Tiefenstufen. Die Auswertungen erfolgten jedoch generell nach Tiefenstufen. Für den Vergleich der Schwermetallgehalten im Mineralboden der BZE-Standorte mit den Hintergrundwerten wird die Tiefenstufe 0 - 10 cm als Oberbodenschicht für die BZE-Standorte definiert. Die Schwermetallgehalten im Oberboden der BZE-Standorte wurden nach Bodenausgangsgesteinen gemäß BAG 1000 stratifiziert. Ein zusätzliches Problem ergibt sich aus den unterschiedlichen Größenordnungen der zu vergleichenden Regionen. Der von der BGR entwickelte Regionalisierungsansatz ist theoretisch auch auf der Ebene der Bundesländer anwendbar (UTERMANN, et al.,

1999). Da die Grundlagendaten für länderspezifische Hintergrundwerte jedoch nicht vorliegen, können die BZE-Mineralbodendaten der Länder nur mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten verglichen werden. Regionale Besonderheiten können daher nicht berücksichtigt werden.

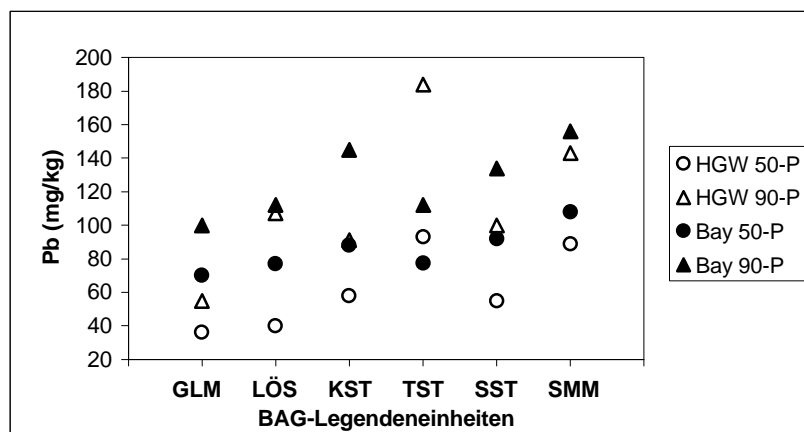
### **3.2.2 Schwermetallgehalte im mineralischen Oberboden (0 - 10 cm) der bayerischen BZE-Standorte**

Im Rahmen der Waldbodeninventur in Bayern (GULDER & KÖLBEL, 1993) wurden die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink in der Humusauflage und in den Tiefenstufen 0 - 10 cm und 10 - 30 cm des mineralischen Oberbodens untersucht. Für 322 Standorte mit Übereinstimmung der Geologie gemäß BAG 1000 liegen Daten zu den Schwermetallgehalten im Mineralboden vor. In Tabelle 4 und Abbildung 4 sind die Mediane (50-P) und 90-Perzentilwerte der Bleigehalte im Oberboden dargestellt. Die südlichen Geschiebemergel/-lehme (GLM) wurden aufgrund der räumlichen Kompaktheit auch mit nur 15 BZE-Probestandorten dargestellt. Mit Ausnahme der sauren Magmatite und Metamorphite (SMM) werden stimmen die Mediane und 90-Perzentile der Bleigehalte bayerischen Oberböden nur bedingt mit den Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999) überein. Die bereits oben besprochene Problematik des Vergleiches regionaler und überregionaler Gehalte spiegelt sich in diesen Ergebnissen wider. Bei einigen Bodenausgangsgesteinen liegen die Mediane und 90-Perzentile der bayerischen Oberbodengehalte deutlich über den Hintergrundwerten (GLM Süd, KST und SST). Im Gegensatz dazu liegen die Mediane und 90-Perzentile im Oberboden über Tongesteinen (TST) deutlich unter den Hintergrundwerten. Die Ursache dieser Abweichungen können aufgrund der fehlenden Grundlageninformationen bezüglich der Hintergrundwerte nicht näher untersucht werden. Der Vergleich mit den Bleigehalten in der Humusauflage verdeutlicht jedoch die gefundenen Abweichungen zwischen den bayerischen Oberbodengehalten und den Hintergrundwerten. Als Beispiel dient das Bodenausgangsgestein Tongesteine. In Abschnitt 3.3.2 werden die Korrelationen zwischen Humusauflage und Mineralboden bayerischer BZE-Standorte eingehender beschrieben (Tabelle 17). Bei den Bleigehalten ist eine signifikante Beziehung zwischen Humusauflage und Oberboden festzustellen. Im Vergleich der Karten 1 und 9 wird deutlich, dass die Bleigehalte in der Humusauflage über Tongesteinen in Bayern deutlich niedriger als z.B. in Nordrhein-Westfalen sind. Die Berechnung der 90-Perzentilwerte für Bleigehalte in der Humusauflage über Tongesteinen ergibt für Bayern 156 mg/kg und für die Gesamtheit aller BZE-Standorte über Tongesteinen 339 mg/kg. Unter Berücksichtigung der Korrelation der Bleigehalte zwischen Humusauflage und Oberboden ist das Verhältnis der bayerischen Oberbodengehalte zu den Hintergrundwerten als regionales Phänomen zu bewerten.

**Tabelle 4: Vergleich der Bleigehalte in der ersten Mineralbodentiefe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten\***

Bleigehalte in Oberböden					
Länderübergreifende Hintergrundwerte			Oberboden (0-10 cm) Bayern		
BAG (Forst)	50-P	90-P	50-P	90-P	N
GLM (Süd)	36	55	70	100	15
LÖS	40	107	77	112	57
KST	58	91	88	145	85
TST	93	184	78	112	44
SST	55	100	92	134	64
SMM	89	143	108	156	57

\*(UTERMANN, et al., 1999)



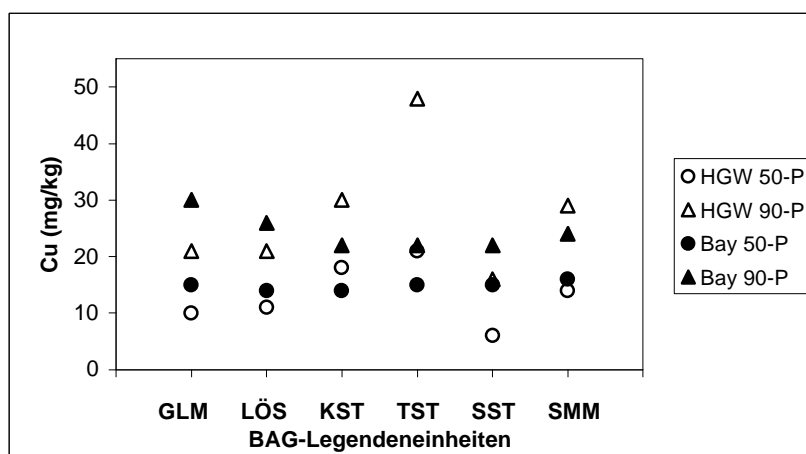
**Abbildung 4: Vergleich der Bleigehalte in der ersten Mineralbodentiefe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999)**

Mit Ausnahme der Karbonatstandorte sind die Verhältnisse zwischen den Medianen bzw. den 90-Perzentilen der Kupfergehalte im Oberboden bayerischer BZE-Standorte und den Hintergrundwerten denen für die Bleigehalte vergleichbar. In Abbildung 5 wird deutlich, dass das 90-Perzentil der Kupfergehalte im Oberboden über Karbonatstandorten nur geringfügig über dem Median für den länderübergreifenden Kupfer-Hintergrundwert liegt.

**Tabelle 5: Vergleich der Kupfergehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten\***

Kupfergehalte in Oberböden					
Länderübergreifende Hintergrundwerte			Oberboden (0-10 cm) Bayern		
BAG (Forst)	50-P	90-P	50-P	90-P	N
GLM (Süd)	10	21	15	30	15
LÖS	11	21	14	26	57
KST	18	30	14	22	85
TST	21	48	15	22	44
SST	6	16	15	22	64
SMM	14	29	16	24	57

\*(UTERMANN, et al., 1999)



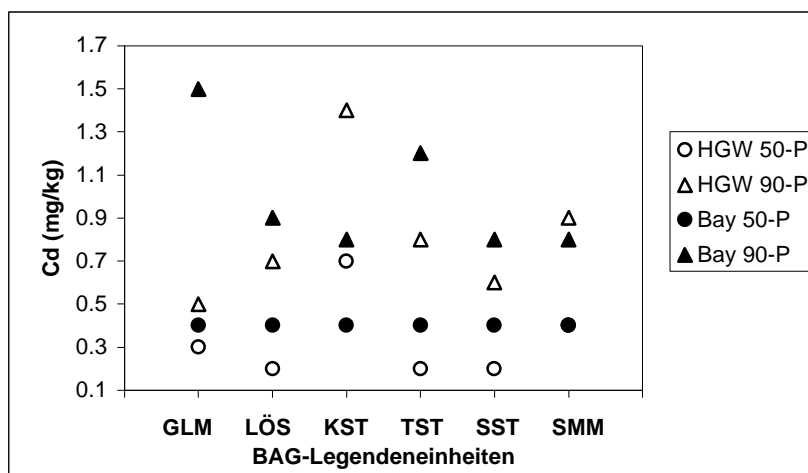
**Abbildung 5: Vergleich der Kupfergehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999)**

Die Mediane und 90-Perzentile der Cadmiumgehalte im Oberboden bayerischer BZE-Standorte liegen weitgehend im Bereich der entsprechenden Hintergrundwerte. Eine deutliche Differenz ist bei den südlichen Geschiebemergeln/ -lehen (GLM) festzustellen. Das 90-Perzentil der Oberbodengehalte (1,5 mg/kg) ist gegenüber dem 90-Perzentil des Hintergrundwertes (0,5 mg/kg) deutlich erhöht. Der geringe BZE-Stichprobenumfang (N = 15) muss bei der Interpretation jedoch berücksichtigt werden. Bei den Karbonatstandorten liegt das 90-Perzentil der Oberbodengehalte nur geringfügig über dem Median für den länderübergreifenden Cadmium-Hintergrundwert.

**Tabelle 6: Vergleich der Cadmiumgehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten\***

Cadmiumgehalte in Oberböden					
Länderübergreifende Hintergrundwerte			Oberboden (0-10 cm) Bayern		
BAG (Forst)	50-P	90-P	50-P	90-P	N
GLM (Süd)	0.3	0.5	0.4	1.5	15
LÖS	0.2	0.7	0.4	0.9	57
KST	0.7	1.4	0.4	0.8	85
TST	0.2	0.8	0.4	1.2	44
SST	0.2	0.6	0.4	0.8	64
SMM	0.4	0.9	0.4	0.8	57

\*(UTERMANN, et al., 1999)

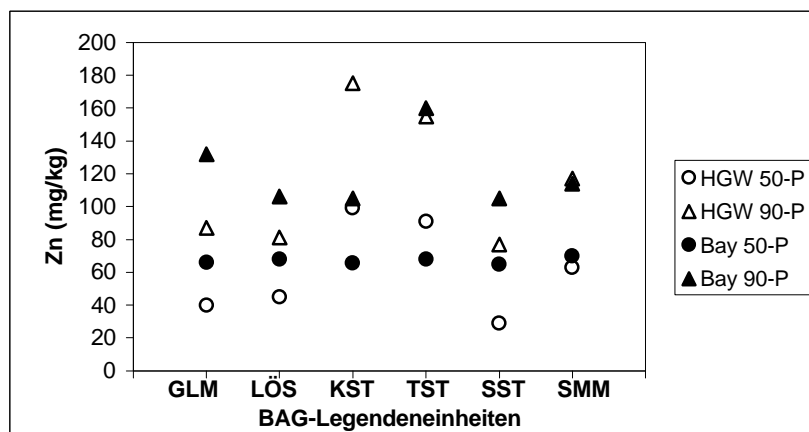


**Abbildung 6: Vergleich der Cadmiumgehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999)**

**Tabelle 7: Vergleich der Zinkgehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten\***

Zinkgehalte in Oberböden					
Länderübergreifende Hintergrundwerte			Oberboden (0-10 cm) Bayern		
BAG (Forst)	50-P	90-P	50-P	90-P	N
GLM (Süd)	40	87	66	132	15
LÖS	45	81	68	106	57
KST	99	175	65.5	105	85
TST	91	155	68	160	44
SST	29	77	65	105	64
SMM	63	117	70	114	57

\*(UTERMANN, et al., 1999)



**Abbildung 7: Vergleich der Zinkgehalte in der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) bayerischer BZE-Standorte mit den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999)**

Die Ergebnisse für Zinkgehalte im Oberboden sind denen vom Cadmium vergleichbar. Auffallend sind auch hier die im Vergleich zu den Hintergrundwerten niedrigen Zinkgehalte im Oberboden über Karbonatstandorten.

### 3.2.3 Schwermetallgehalte im mineralischen Oberboden (0 - 10 cm) der nordrhein-westfälischen BZE-Standorte

Für das vorliegende Projekt wurden die Mineralbodengehalte der untersuchten Schwermetalle an 25 BZE-Standorten zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei ausschließlich um Standorte im Staatswald. An 22 dieser Standorte stimmen die Angaben zur Geologie mit den Bodenausgangsgesteinen nach BÜK überein. Auf Grund der geringen Anzahl können keine repräsentativen Aussagen auf der Basis der Bodenausgangsgesteine getroffen werden. Zusätzlich zu den geforderten Tiefenstufen in der BZE (0 - 10, 0 - 30 usw.) wurden in Nordrhein-Westfalen die Tiefenstufen 0 - 5 und 5 - 10 cm separat beprobt. Hieraus ergeben sich Hinweise auf die Herkunft der Schwermetalle im Boden. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse für die vorliegenden Daten zusammengefasst.

**Tabelle 8: Mediane und 90-Perzentilwerte der Schwermetallgehalte im Oberboden nordrhein-westfälischer BZE-Standorte**

	Tiefenstufe 0 - 5 cm		Tiefenstufe 5 - 10 cm	
	50-P	90-P	50-P	90-P
Pb (mg/kg)	103	190	48	93
Cu (mg/kg)	13	23	11	19
Zn (mg/kg)	51	108	46	107
Cd (mg/kg)	0.355	1.262	0.296	0.647

Bei allen Schwermetallen zeigt sich ein Tiefengradient der Schwermetallverteilung. Besonders deutlich ist dies für Blei. Aus den vorliegenden Daten wurden 2 Standorte mit möglichst unterschiedlichen Standortfaktoren ausgewählt. An diesen Standorten soll gezeigt werden, dass die anthropogenen Anteile der Schwermetallgehalte auch bei vergleichsweise geringem Immissionseinfluss die geogenen deutlich überlagern. Das in Tabelle 9 dargestellte Profil gehört zu einem Kieferstandort auf armen pleistozänem Sand. Um die Vergleichbarkeit mit den übrigen Probestandorten aus Nordrhein-Westfalen herzustellen wurden die Tiefenstufen 0 - 1 cm und 1 - 5 cm zur

Tiefenstufe 0 - 5 cm gemittelt. Aufgrund der geringen Dichteunterschiede der beiden obersten Tiefenstufen wurde anstelle eines gewichteten Mittels das arithmetische Mittel verwendet. Der Vergleich mit Tabelle 8 zeigt, dass die Schwermetallgehalte im Oberboden dieses Standortes (Pb 49, Cu 5 Zn 23, Cd 0,251 mg/kg) deutlich unterhalb der Medianwerte für diese Tiefenstufe (Pb 103, Cu 13, Zn 51, Cd 0,355 mg/kg) liegen. Dieser Standort unterliegt somit einem vergleichsweise geringem Immissionseinfluss. Bei Blei und Kupfer zeigt sich deutlich die akkumulierende Wirkung der organischen Substanz. Trotz sehr niedriger pH-Werte finden sich die höchsten Gehalte dieser beiden Schwermetalle in der Humusauflage (Pb 113, Cu 15 mg/kg) und den oberen 5 cm des Mineralbodens (Pb 82, Cu 8 mg/kg). Bei Zink und Cadmium finden sich die höchsten Gehalte ebenfalls in der Humusauflage und der obersten Mineralbodenschicht.

Die Verteilung der Schwermetallgehalte ist bemerkenswert unter Berücksichtigung von Grenz-pH-Werten für die Mobilisierung von Schwermetallen (Tabelle 11). Trotzdem die BZE nur eine Momentaufnahme darstellt und die Grenz-pH-Werte aus Mineralbodenuntersuchungen abgeleitet wurden, sollte unter den herrschenden bodenchemischen Bedingungen keine Akkumulation von Schwermetallen in der Humusauflage und den oberen Bodenschichten möglich sein. Das eine pH-Wert-abhängige Tiefenverlagerung stattfindet lässt sich am Anstieg der Schwermetallgehalte von Kupfer, Zink und Cadmium in den Tiefenstufen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm belegen. Besonders deutlich sind die Konzentrationsanstiege im Bereich des pH 7,4.

**Tabelle 9: Tiefenverteilung der Schwermetallgehalte eines Bodenprofils (Kiefer auf armen Sanden) bis in eine Tiefe von 90 cm**

Tiefenstufe (cm)		Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	pH(KCl)
Humusauflage		113	15	63	0.625	2.9
0	1	82	8	35	0.413	
1	5	15	2	11	0.092	
<i>0 - 5 gemittelt</i>		49	5	23	0.251	2.8
5	10	8	1	89	0.077	3
10	30	4	1	9	0.050	3.6
30	60	5	2	22	0.059	4
60	90	6	4	22	0.100	7.4

Das in der folgenden Tabelle dargestellte Bodenprofil zeigt auf Grund der Schwermetallgehalte im Oberboden eine deutliche Immissionsbelastung an. Die Gehalte in der Tiefenstufe 0 - 5 cm liegen alle oberhalb der entsprechenden 90-Perzentilwerte. Es handelt sich hier um einen Fichtenstandort auf Lehm über Tongestein. Blei wird auch auf diesem Standort sehr stark in den organisch geprägten Bodenschichten akkumuliert. Beim Kupfer ist diese Tendenz nur sehr schwach ausgeprägt. Cadmium ist entgegen des in der Literatur beschriebenen Einflusses des pH-Wertes ebenfalls in den organisch geprägten Bodenschichten akkumuliert. Beim Zink scheint hier die Bindung an Tonminerale zu überwiegen. Dies deckt sich mit Literaturaussagen (HORNBERG, V., BRÜMMER, G. W., 1993).



**Tabelle 10: Tiefenverteilung der Schwermetallgehalte eines Bodenprofils (Fichte auf Tongestein) bis in eine Tiefe von 90 cm**

Tiefenstufe (cm)		Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	pH(KCl)
Humusauflage		212	20	127	1,442	3,6
0	1	253	26	93	1.012	
1	5	303	24	124	1.821	
0 - 5 gemittelt		278	25	109	1.417	3,4
5	10	35	20	145	0.407	4,1
10	30	32	21	142	0.275	4,1
30	60	24	28	124	0.183	4,0
60	90	30	28	121	0.170	4,0

**Tabelle 11: Grenz-pH-Werte für die Mobilisierung von Schwermetallen im Boden**

	Grenz-pH-Werte nach SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL (1998)	Grenz-pH-Werte nach HORNBURG, V., BRÜMMER, G. W. (1993)
beginnende Mobilisierung von Cd	< 6.5	< 6.5
beginnende Mobilisierung von Zn	< 6.0	< 5.3
beginnende Mobilisierung von Cu	< 4.5	< 4.5
beginnende Mobilisierung von Pb	< 4.0	< 3.5

### 3.3 Zuordnung der BZE-Punktinformationen zu ausgewählten pedoregionalen Einheiten und vergleichende Bewertung der aktuellen Schwermetallgehalte in den Humusauflagen von Waldböden mit vorliegenden Hintergrundwerten

#### 3.3.1 Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte mit den auf Grundlage der BAG 1000 regionalisierten Schwermetallgehalten in den Humusauflagen deutscher Wälder

Basierend auf den Informationen zu den Bodenausgangsgesteinen wurden den BZE-Standorten die entsprechenden Hintergrundwerte zugeordnet (Anlage, Karten 11, 14, 17 und 20). Es wurden alle BZE-Standorte dargestellt, für die stimmige Aussagen zum Bodenausgangsgestein vorlagen. Die farbige Darstellung orientiert sich an der entsprechenden Klassifizierung in den Karten zu den länderübergreifenden Hintergrundwerten (UTERMANN, et al., 1999). Die Einteilung der Hintergrundwerte in 6 Farbstufen (Klassen) beinhaltet keine Bewertung. Sie dient lediglich der Unterteilung der Hintergrundwerteskalen in äquidistante Abschnitte.

In einem zweiten Schritt wurden für die Schwermetallgehalte in den Humusauflagen getrennt nach Bodenausgangsgesteinen 90-Perzentilwerte errechnet und entsprechend den Hintergrundwerten klassifiziert und dargestellt (Karten 12, 15, 18 und 21). Als problematisch erwies sich hierbei die Farbskalierung, da bei höheren Humusgehalten auf der Farbskala für die länderübergreifenden Hintergrundwerte (grün nach rot) keine Steigerung möglich war. In diesen Fällen wurden die Farbskalen für die Humusgehalten angepasst. Beim Vergleich der Karten ist daher zu berücksichtigen, dass gleiche Farben nicht notwendigerweise gleiche Gehalte symbolisieren. Bei den Karten zu den Schwermetallgehalten in den Humusauflagen wurden zusätzlich die Bodenausgangsgesteine dargestellt, für die aufgrund fehlender

Profildaten keine Hintergrundwerte berechnet wurden. Diese Darstellungsweise wurde gewählt, um die BZE-Daten möglichst umfassend zu nutzen.

Die Unterschiede zwischen den regionalisierten Hintergrundwerten für Schwermetalle im Mineralboden und den 90-Perzentilen der Schwermetallgehalte in der Humusaufgabe werden durch die Karten 13, 16, 19 und 22 visualisiert. Diese Karten stellen die prozentualen Verhältnisse der Schwermetallgehalte in den Humusaufgaben zu den Hintergrundwerten über den entsprechenden Bodenausgangsgesteinen dar.

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Vergleiche zwischen Hintergrundwerten und den 90-Perzentilwerten der Schwermetallgehalte in den Humusaufgaben differenziert nach Bodenausgangsgesteinen zusammengefasst. Die für Hintergrundwerte durchgeführte Unterteilung des Bodenausgangsgesteins "Sande" in "Sande (Nordwest)" und "Sande (Nordost)" wurde bei der hier betrachteten Landnutzungsform Wald nicht beibehalten. Mit Ausnahme des Zinks liegen die Hintergrundwerte dieser beiden Bodenausgangsgesteine des norddeutschen Tieflandes dicht beieinander. Die Werte von Sande (NW) und Sande (NO) wurden nicht gemittelt. Zum Vergleich mit den 90-Perzentilwerten der Schwermetallgehalte in den Humusaufgaben wurde der jeweils höhere Hintergrundwert herangezogen.

**Tabelle 12: Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte\* (HGW) für Blei im Oberboden und der Bleigehalte in den Humusaufgaben deutscher Wälder (HUM)**

BAG	Klasse 1		Klasse 2		Klasse 3		Klasse 4		Klasse 5		Klasse 6		90-Perzentilwerte				HUM/ HGW
	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	N	HUM	N	
(mg/kg)													(mg/kg)			(%)	
TUS							n.b.	> 200 - 250							249	34	
SAN			> 50 - 75							> 250 - 300			59	131	293	241	497
G/S											n.b.	> 300			911	28	
GLM Nord											n.b.	> 300			857	87	
GLM Süd		> 50 - 100	> 50 - 75										55	20	98	40	178
LÖS							> 100 - 125	> 200 - 250					107	107	203	120	190
KST			>100 - 150	> 75 - 100									91	65	133	168	146
TST											> 150	> 300	184	98	343	274	186
SST				> 75 - 100	> 150 - 200								100	83	170	272	170
BMM					> 150 - 200	> 100 - 125							110	24	161	22	146
SMM							> 200 - 250	> 125 - 150					143	132	242	153	169

\*UTERMANN, et al., 1999

Beim Blei zeigt sich eine deutliche atmogene Prägung der Gehalte in der Humusaufgabe. Die 90-Perzentilwerte der Gehalte in den Humusaufgaben sind gegenüber den Hintergrundwerten über alle Bodenausgangsgesteine hinweg deutlich erhöht. Die Humusaufgaben über Sandstandorten zeigen die extremsten Unterschiede zwischen Humusaufgabe und Oberboden. Der 90-Perzentilwert der Bleigehalte in den Humusaufgaben ist ca. fünffach höher als die Hintergrundwerte für den mineralischen Oberboden. Für die außergewöhnlich hohen Gehalte in

Humusauflagen über Geschiebemergeln/ -lehmen mit sandigen Deckschichten (G/S) und den nördlichen Geschiebemergeln/ -lehmen liegen keine Vergleichswerte vor.

**Tabelle 13: Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte\* (HGW) für Cadmium im Oberboden und der Cadmiumgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM)**

BAG	Klasse 1		Klasse 2		Klasse 3		Klasse 4		Klasse 5		Klasse 6		90-Perzentilwerte			HUM/ HGW	
	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	N	HUM		N
(mg/kg)													(mg/kg)			(%)	
TUS									n.b.	> 1,4 - 2,0					1.6	34	
SAN			> 0,4 - 0,6					> 1,2 - 1,4					0.6	131	1.3	241	212
G/S							n.b.	> 1,2 - 1,4							1.3	28	
GLM Nord											n.b.	> 2,0			2.5	77	
GLM Süd		> 0,6 - 0,8	> 0,4 - 0,6										0.5	20	0.6	40	120
LÖS				> 0,8 - 1,0	> 0,6 - 0,8								0.7	107	0.9	120	133
KST										> 1,4 - 2,0	> 1,2		1.4	65	1.3	168	92
TST					> 0,6 - 0,8	> 1,0 - 1,2							0.8	98	1.1	274	133
SST		> 0,6 - 0,8	> 0,4 - 0,6										0.6	83	0.8	272	133
BMM						> 1,0 - 1,2			> 1,0 - 1,2				1.1	24	1.1	22	95
SMM		> 0,6 - 0,8					> 0,8 - 1,0						0.9	132	0.8	153	89

\*UTERMANN, et al., 1999

Die 90-Perzentilwerte der Cadmiumgehalte in den Humusauflagen liegen überwiegend im Bereich der Hintergrundwerte. Die Werte in Humusauflagen über Sandstandorten sind doppelt so hoch wie die Hintergrundwerte. Sehr hoch liegt auch der 90-Perzentilwert in Humusauflagen über dem Bodenausgangsgestein GLM Nord.

**Tabelle 14: Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte\* (HGW) für Kupfer im Oberboden und der Kupfergehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM)**

BAG	Klasse 1		Klasse 2		Klasse 3		Klasse 4		Klasse 5		Klasse 6		90-Perzentilwerte				HUM/ HGW	
	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	N	HUM	N		
	(mg/kg)												(mg/kg)		(%)			
TUS							n.b.	> 40 - 50							49	34		
SAN	<= 20												> 60	13	131	67	241	515
G/S											n.b.	> 60			74	28		
GLM Nord									n.b.	> 50 - 60					54	87		
GLM Süd	<= 20	> 20 - 30											21	20	16	40	76	
LÖS		> 20 - 30	> 20 - 30										21	107	29	120	138	
KST		> 20 - 30	> 20 - 30										30	65	24	167	80	
TST					> 30 - 40	> 40 - 50							48	98	40	274	83	
SST	<= 20		> 20 - 30										16	83	26	272	163	
BMM					> 30 - 40				> 50 - 60				57	24	35	22	61	
SMM		> 20 - 30			> 30 - 40								29	132	31	153	107	

\*UTERMANN, et al., 1999

Im Gegensatz zu den Bleigehalten in den Humusauflagen scheinen die Kupfergehalte in den Humusauflagen nur bedingt von großräumigen atmosphärischen Einträgen überdeckt zu sein. Wiederum sind es die Sandstandorte, die durch extrem hohe 90-Perzentilwerte der Kupfergehalte in den Humusauflagen auffallen. Auch die benachbarten Bodenausgangsgesteine G/S und GLM Nord weisen hohe 90-Perzentilwerte bei den Kupfergehalten in den Humusauflagen auf.

**Tabelle 15: Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte\* (HGW) für Zink im Oberboden und der Zinkgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder (HUM)**

BAG	Klasse 1		Klasse 2		Klasse 3		Klasse 4		Klasse 5		Klasse 6		90-Perzentilwerte				HUM/ HGW
	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	HUM	HGW	N	HUM	N	
	(mg/kg)												(mg/kg)		(%)		
TUS									n.b.	> 175 - 200					191	34	
SAN			> 35 - 70							> 175 - 200			48	131	193	241	402
G/S									n.b.	> 175 - 200					194	28	
GLM Nord											n.b.	> 200			269	87	
GLM Süd					> 70 - 105	> 70 - 105							87	20	74	40	85
LÖS					> 70 - 105			> 105 - 175					81	107	126	120	156
KST							> 105 - 175	> 105 - 175					175	65	146	168	83
TST							> 105 - 175	> 105 - 175					155	98	149	274	96
SST					> 70 - 105			> 105 - 175					77	83	110	272	143
BMM								> 105 - 175	> 175 - 200				180	24	158	22	88
SMM							> 105 - 175	> 105 - 175					117	132	114	153	97

\*UTERMANN, et al., 1999

Die Verhältnisse von 90-Perzentilwerten der Zinkgehalte in den Humusauflagen zu den entsprechenden Hintergrundwerten sind denen beim Cadmium vergleichbar. Die Humusauflagen der Sandstandorte zeigen gegenüber den Hintergrundwerten vierfach erhöhte 90-Perzentilwerte. Auch die Standorte über benachbarten Bodenausgangsgesteinen G/S und GLM Nord zeigen ähnlich hohe Zinkgehalte. Die Humusauflagen im Bereich der anderen Bodenausgangsgesteine weisen Zinkgehalte im Bereich der entsprechenden Hintergrundwerte auf. Wie Cadmium weist auch Zink eine relativ hohe Mobilität auf. Darüber hinaus ist die Affinität des Zinks gegenüber organischer Substanz deutlich geringer als die des Cadmiums.

Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird es nicht als sinnvoll erachtet, die Schwermetallgehalte der Humusauflagen auf der Basis geologischer bzw. pedologischer Kriterien zu regionalisieren. Der Vergleich der räumlichen Verteilung der Gehalte in den Humusauflagen (Anlage, Karten 5 - 8) mit den Hintergrundwerten im Oberboden (UTERMANN, et al., 1999) zeigt deutliche Unterschiede. Da auch für die Berechnung der Hintergrundwerte unter Wald die deutlich organisch geprägten A-Horizonte bis in eine Tiefe von 10 cm analysiert wurden (reicht der erste A-Horizont tiefer, wird er komplett beprobt), stellt sich die Frage nach den Ursachen für die z.T. erheblichen Abweichungen. Neben der Frage der pH-Wert-abhängigen Mobilität der Schwermetalle spielt hier vermutlich die unterschiedliche Zusammensetzung der organischen Substanz eine herausragende Rolle. Im Folgenden soll am Beispiel bayerischer und nordrhein-westfälischer BZE-Standorte auf die Zusammenhänge zwischen Humusauflage und Oberboden eingegangen werden.

### **3.3.2 Schwermetallgehalte in den Humusauflagen und im mineralischen Oberboden (0 - 30 cm) der bayerischen BZE-Standorte**

Im Rahmen der bayerischen Waldbodeninventur (GULDER, KÖLBEL, 1993) wurden neben den Schwermetallgehalten in den Humusauflagen auch die Schwermetallgehalte in den ersten beiden Mineralbodentiefenstufen ermittelt. Ein großer Teil des Wurzelraumes ist somit weitgehend erfasst, wodurch Aussagen zum Ursprung der Schwermetalle und zur Verteilung im ökologisch vordergründig zu betrachtenden Bodenkompartment ermöglicht wurden. Tabelle 16 stellt die Einordnung der Schwermetallgehalte bayerischer Humusauflagen in das Probenkollektiv der bundesweiten BZE-Auswertung dar.

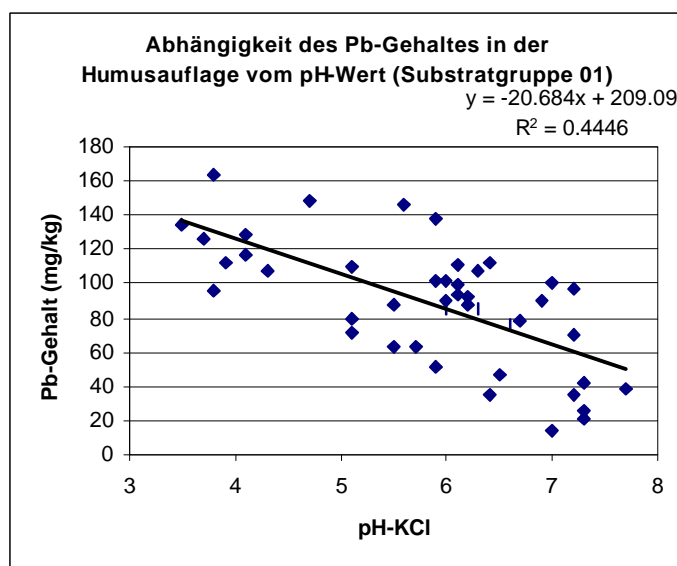
Der um den Faktor 2 geringere 90-Perzentilwert der Pb-Gehalte weist Bayern als eine Region mit im Durchschnitt relativ geringer Immissionsbelastung aus. Dies ist auch aus der Karte zur Verteilung der Schwermetallgehalte in der Humusauflage (Anlage, Karten 1-4) zu entnehmen. Die Gehalte von Zink und Kupfer liegen ebenfalls deutlich unter dem Bundesdurchschnitt. Beim Cadmium liegen die Gehalte im Bundestrend.

**Tabelle 16: Schwermetallgehalte in den Humusauflagen der bayerischen BZE-Punkte und im BZE-Gesamtkollektiv**

		Perzentile						
		Min.	10	25	50	75	90	Max.
Cadmium								
BZE-Gesamt	0	0,269	0,390	0,532	0,800	1,172	17,161	
BZE-Bayern	NWG	NWG	0,300	0,400	0,600	1,000	2,700	
Kupfer								
BZE-Gesamt	0	9	12	17	24	37	633	
BZE-Bayern	6	11	12	15	18	24	261	
Blei								
BZE-Gesamt	0	38	61	94	145	261	4211	
BZE-Bayern	14	51	66	84	108	136	1220	
Zink								
BZE-Gesamt	0	48	60	74	107	152	2875	
BZE-Bayern	18	50	59	68	86	114	240	

NWG: Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze

Blei kann als Leitelement für die Beschreibung der Belastungen durch atmosphärische Schwermetalleinträge dienen. Dies beruht in erster Linie auf der geringen Mobilität des Bleis auch bei extrem niedrigen pH-Werten (SCHINNER, SONNLEITNER, 1997). Die Schwermetalle Kupfer, Zink und Cadmium unterliegen stärker den standörtlich bodenchemischen Einflüssen. Neben der herausragenden Bedeutung des pH-Wertes spielen in der Humusauflage vor allem die Art und Menge der organischen Substanz eine wesentliche Rolle für das Lösungsverhalten der Metalle. Die Funktion des Bleis als Leitelement der Deposition wird im neutralen bis alkalischen Bereich durch die Bildung löslicher organischer Komplexe eingeschränkt (KAHLE, BRECKLE, 1992).



**Abbildung 8: Beziehung zwischen Pb-Gehalt und pH-KCl in der Humusauflage (Karbonatstandorte)**

Die Auswertung der bayerischen BZE-Daten für Humusauflagen erbrachte mit Ausnahme der kalkfreien Lockersedimente (Substratgruppe 3) für alle Substratgruppen signifikant negative Korrelationen zwischen pH-(KCl)-Werten und

Pb-Gehalten. Besonders ausgeprägt ist diese Beziehung bei Karbonatstandorten (Abbildung 8). Kupfer zeigt ein ähnliches Lösungsverhalten.

Die Cadmiumgehalte in den Humusauflagen bewegen sich häufig im Bereich der Nachweisgrenze, wodurch die Ergebnisse schwer zu interpretieren sind. Aus diesem Grund wird für die Betrachtung der mobileren Schwermetalle (Zn, Cd) das Zink herangezogen. Die Mobilität der Schwermetalle Zink und Cadmium wird in erster Linie durch den pH-Wert bestimmt. Die Gehalte in den Humusauflagen weisen eine deutliche positive Korrelation mit den pH-Werten auf (Cd = 0,48, Zn = 0,55).

### **Tiefengradient**

Vergleichende Untersuchungen immissionsbelasteter Flächen im Vergleich mit unbelasteten Flächen zeigten charakteristische Tiefenverteilungsmuster (SETZNAGEL, R., TRIMBACHER, C., VOGEL, W.R., 1990). Immissionsbelastete Standorte wiesen sehr hohe Schwermetallgehalte in der Humusauflage auf. Die Gehalte fielen zur Tiefenstufe 0 - 10 cm stark und in den folgenden Tiefenstufen (10 - 20 cm, 20 - 30 cm) nur noch gering ab. Bei Referenzstandorten ohne direkten Immissionseinfluss nahmen die Gehalte an Schwermetallen von unten nach oben hin geringfügig ab. Die Gehalte der Humusauflagen lagen im Bereich der obersten Mineralbodentiefenstufe. Zur Beurteilung des Immissionseinflusses an bayerischen BZE-Standorten wurden die Daten zur Tiefenverteilung der Schwermetallgehalte untersucht. Zur Verdeutlichung der Beziehungen zwischen den Schwermetallgehalten in den betrachteten Tiefenstufen werden in Tabelle 17 die Korrelationskoeffizienten und Verhältniszahlen dargestellt. Die Verhältniszahlen wurden wie folgt berechnet. Es wurden für jeden Standort zunächst die Verhältnisse (Auflage/Tiefenstufe 0-10 cm, Auflage/Tiefenstufe 10-30 cm, Tiefenstufe 0-10 cm/Tiefenstufe 10-30 cm) berechnet. Anschließend wurde für die 3 erhaltenen Standortverhältniszahlen über alle Standorte je eine mittlere Verhältniszahl (arithmetisches Mittel) gebildet.

**Tabelle 17: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Schwermetallgehalten in der Humusauflage und den ersten Mineralbodentiefenstufen ( T10 = 0 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm)**

<b>Blei</b>	Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	0,38	0,17
T10		1	0,81
T30			1
	Mittlere Verhältniszahlen		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	3,1	5,2
T10		1	1,7
T30			1

**Tabelle 17: Fortsetzung**

<b>Kupfer</b>	Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	0,13	-
T10		1	0,70
T30			1
	Mittlere Verhältniszahlen		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	2,1	2,1
T10		1	1,0
T30			1

<b>Zink</b>	Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	0,64	0,46
T10		1	0,88
T30			1
	Mittlere Verhältniszahlen		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	1,7	1,7
T10		1	1,0
T30			1

<b>Cadmium</b>	Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	0,73	0,63
T10		1	0,89
T30			1
	Mittlere Verhältniszahlen		
	Humusauflage	T10	T30
Humusauflage	1	6,1	6,8
T10		1	1,4
T30			1

Alle untersuchten Schwermetallen weisen in den Auflagen die höchsten Gehalte auf. Die Verhältnisse zwischen den Schwermetallgehalten in der Humusauflage und der ersten Mineralbodentiefenstufe (0-10 cm) liegen zwischen 1,7 (Zn) und 6,1 (Cd). Die Verhältniszahlen zwischen den Schwermetallgehalten in der Humusauflage und der zweiten Mineralbodentiefenstufe (10-30) sind mit Ausnahme von Blei nur unwesentlich höher. Zwischen den beiden genannten Mineralbodentiefenstufen finden sich Verhältniszahlen zwischen 1 (Cu) und 1,7 (Pb). Auch die im länderübergreifenden Vergleich niedrigen Schwermetallgehalte in den Humusauflagen bayerischer BZE-Standorte erweisen sich unter Berücksichtigung des Oberbodens als deutlich immissionsgeprägt.



### 3.3.3 Schwermetallgehalte in den Humusauflagen und im mineralischen Oberboden (0 - 90 cm) ausgewählter BZE-Standorte in Nordrhein-Westfalen

Die 25 zur Verfügung stehenden BZE-Standorte mit Angaben zu Schwermetallgehalten im Mineralboden verteilen sich über die gesamte Fläche des Landes Nordrhein-Westfalen (Anlage, Karte 10). Repräsentative Aussagen für das Bundesland sind jedoch nicht möglich. Es können somit lediglich Trends aufgezeigt werden, die in späteren Arbeiten anhand des gesamten Datensatzes zu verifizieren sind. Zum Vergleich der nordrhein-westfälischen Daten mit den Daten der bundesweiten BZE können die Schwermetallgehalte der Humusauflagen herangezogen werden (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Schwermetallgehalte in den Humusauflagen der nordrhein-westfälischen BZE-Punkte und im BZE-Gesamtkollektiv**

		Perzentile						
	Min.	10	25	50	75	90	Max.	
Cadmium								
BZE-Gesamt	0	0,269	0,390	0,532	0,800	1,172	17,161	
BZE-NRW	0,280	0,520	0,670	0,830	1,100	1,380	3,300	
Kupfer								
BZE-Gesamt	0	9	12	17	24	37	633	
BZE-NRW	3	14	18	26	34	51	240	
Blei								
BZE-Gesamt	0	38	61	94	145	261	4211	
BZE-NRW	33	64	125	205	312	429	690	
Zink								
BZE-Gesamt	0	48	60	74	107	152	2875	
BZE-NRW	57	81	97	111	144	212	409	

Im Gegensatz zu Bayern liegen die Schwermetallgehalte in den Humusauflagen von Nordrhein-Westfalen deutlich über den bundesweiten Gehalten. Es bestätigt sich hier die Annahme, dass in Nordrhein-Westfalen aufgrund seiner wirtschaftlichen und verkehrstechnischen Infrastruktur höhere Schwermetallimmissionen zu erwarten sind.

**Tabelle 19: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Bleigegehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm)**

Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)					
Blei	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	-	-	-	-
T05		1	0.61	0.57	0.48
T10			1	0.71	0.49
T30				1	0.75
T60					1
Mittlere Verhältniszahlen					
	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	2.2	4.9	11.8	17.9
T05		1	2.5	5.8	10.2
T10			1	2.6	4.6
T30				1	1.7
T60					1

Zwischen Humusauflage und Mineralboden konnte keine Korrelation der Bleigehalte nachgewiesen werden. Das Fehlen einer signifikanten Korrelation ist hier vermutlich dem geringen Stichprobenumfang bei gleichzeitig relativ großen Unterschieden in Struktur und bodenchemischen Bedingungen zwischen Humusauflage und Mineralboden zuzuschreiben. Benachbarte Mineralbodentiefenstufen korrelieren relativ gut. Die Verhältniszahlen dokumentieren deutlich die Abnahme des Bleigehaltes mit zunehmender Tiefe.

**Tabelle 20: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Kupfergehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm)**

		Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)			
Kupfer	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	-	-	-	-
T05		1	0.89	0.63	0.53
T10			1	0.86	0.75
T30				1	0.95
T60					1
		Mittlere Verhältniszahlen			
	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	2.2	4.5	8.1	8.2
T05		1	1.8	3.3	3.4
T10			1	1.6	1.5
T30				1	0.9
T60					1

Die Kupfergehalte korrelieren ebenfalls nicht zwischen Humusauflage und Mineralboden. Benachbarte Mineralbodentiefenstufen korrelieren hingegen sehr eng miteinander. Die Verhältniszahlen dokumentieren auch beim Kupfer deutlich höhere Gehalte in der Humusauflage. Die Gehalte nehmen bis in eine Tiefe von 30 cm deutlich ab. In der Tiefenstufe 30 - 60 cm nehmen die Gehalte wieder geringfügig zu.

**Tabelle 21: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Zinkgehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm)**

		Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)			
Zink	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	-	-	-	-
T05		1	0.89	0.85	0.79
T10			1	0.97	0.9
T30				1	0.95
T60					1
		Mittlere Verhältniszahlen			
	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	2.6	3.7	4.7	4.5
T05		1	1.3	1.7	1.5
T10			1	1.2	1.1
T30				1	0.9
T60					1

Bei den Zinkgehalten sind zwischen der Humusauflage und Mineralbodentiefenstufen keine Korrelationen vorhanden. Im Mineralboden sind sehr gute Korrelationen, auch über mehrere Tiefenstufen hinweg, nachweisbar. Die

Verhältniszahlen zeigen deutlich höhere Gehalte in der Humusauflage an. Ähnlich wie beim Kupfer nehmen die Zinkgehalte in der letzten dargestellten Mineralbodentiefenstufe (30-60 cm) wieder zu.

**Tabelle 22: Korrelationen und Verhältnisse zwischen den Cadmiumgehalten in der Humusauflage und den Mineralbodentiefenstufen (T05 = 0 - 5 cm, T10 = 5 - 10 cm, T30 = 10 - 30 cm, T60 = 30 - 60 cm)**

Pearsons Korrelationskoeffizienten (nur signifikante Werte)					
Cadmium	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	0.73	0.68	-	-
T05		1	0.89	0.68	-
T10			1	0.72	-
T30				1	-
T60					1
Mittlere Verhältniszahlen					
	Humusauflage	T05	T10	T30	T60
Humusauflage	1	3.2	4.6	7.1	9.1
T05		1	1.6	2.7	3.2
T10			1	1.6	2.2
T30				1	1.4
T60					1

Im Gegensatz zu den anderen Schwermetallen zeigen die Cadmiumgehalte gute Korrelationen zwischen der Humusauflage und den ersten beiden Mineralbodentiefenstufen. Das Verhältnis zwischen Humusauflage und erster Mineralbodenschicht ist bei Cadmium größer als bei den anderen Schwermetallen. Ebenfalls fällt das Fehlen von Korrelationen zwischen den ersten und der untersten Mineralbodentiefenstufe (Tiefe 30 - 60 cm) auf. Ein Anstieg des Cadmiumgehaltes in der letzten Mineralbodentiefenstufe ist nicht zu beobachten.

### 3.3.4 Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten der Humusauflage und des Mineralbodens

Die Ergebnisse aus Bayern und Nordrhein-Westfalen verdeutlichen die Unterschiede zwischen dem Verhalten von Schwermetallen in Humusauflagen und im mineralischen Oberboden. Mit Ausnahme des Cadmiums wurden nur schwache (siehe Tabellen 17 und 19-22) bzw. keine Korrelationen zwischen den Schwermetallgehalten in Humusauflage und Mineralboden gefunden. Rückschlüsse von den bundesweit vorliegenden Humusgehalten auf die Mineralbodengehalte erscheinen vor diesem Hintergrund kaum möglich. Denkbar wäre hier die Verknüpfung der beiden Bodenkompimente über multiple Regressionsgleichungen. Die notwendigen Parameter müssen jedoch erst geklärt werden. Da in diesem Zusammenhang die Qualität der organischen Substanz eine wichtige Rolle spielt, fehlt zumindest ein wesentlicher Parameter im BZE-Datensatz. Zur Klärung dieser Fragestellung sei auf zur Zeit laufende Projekte zur Mobilität und Bioverfügbarkeit von Schwermetallen (HEIDKAMP, BGR) und zur Sorption von Schwermetallen an organische Substanzen (SONNENBERG, FH Paderborn) verwiesen.

### 3.4 Vergleich der Schwermetallgehalte in Moosen und in der Humusauflage

Die bisher dargestellten Ergebnisse belegen eine deutliche Immissionsprägung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder. Es liegt daher nahe die Humusgehalte mit dem Depositionsgeschehen zu vergleichen. Für eine erste Abschätzung standen die Daten des Moosmonitorings aus den Jahren 1990/91 und 1995/96 zur Verfügung. Bei der Auswertung der Daten sind folgende methodische Unterschiede zu beachten. Die Moosproben wurden auf Waldlichtungen gesammelt. Sie waren daher einem Freilandniederschlag ausgesetzt. Die Humusauflagen werden in der Regel durch den Bestandesniederschlag beeinflusst, der durch unterschiedliche Interzeption über erhöhte Schwermetallgehalte verfügt. Weiterhin geht man bei den Moosen von einem Akkumulationszeitraum von 3 Jahren aus. Bei Humusauflagen ergeben sich je nach Umsetzung der Humusaufgabe Akkumulationszeiträume von wenigen Jahren bis zu Jahrzehnten (im Extremfall Jahrhunderte). Der Vergleich der Moosdaten mit den Humusaufgaben kann daher nur Hinweise auf den Ursprung und auf das Verhalten von Schwermetallen in Humusaufgaben erbringen. Zur Absicherung der Ergebnisse könnten die Untersuchungen des EU-weiten Level II-Programmes dienen. Im Rahmen dieses forstlichen Monitorings werden die Schwermetalldeposition und die Schwermetallgehalte in Humusaufgabe, Mineralboden und im Sickerwasser ermittelt.

**Tabelle 23: Vergleich der Schwermetallgehalte in Humusaufgaben deutscher Waldböden (BZE) und in Moosproben des bundesweiten Moosmonitorings aus den Jahren 1990/91 und 1995/96**

Schwermetallgehalte in der Humusaufgabe im Zeitraum 1987-93 (WOLFF & RIEK, 1997)				
Angaben in mg/kg	Blei (n=1668)	Cadmium (n=1670)	Kupfer (n=1670)	Zink (n=1667)
Min	0	0	0	0
Median	94	0,532	17	74
Max	4211	17,161	633	2875
Schwermetallgehalte in Moosen im Zeitraum 1990-91 (HERPIN, MARKERT, LIETH, 1995)				
Angaben in µg/G	Blei (n=591)	Cadmium (n=475)	Kupfer (n=592)	Zink (n=580)
TS				
Min	5,1	0,13	4,12	23,7
Median	12,9	0,31	9,2	50,6
Max	80,5	0,87	25,5	163
Schwermetallgehalte in Moosen im Zeitraum 1995-96 (SIEWERS, HERPIN, 1998)				
Angaben in µg/G	Blei (n=1026)	Cadmium (n=1026)	Kupfer (n=1026)	Zink (n=1026)
TS				
Min	1,7	0,054	3,0	14,2
Median	7,7	0,29	9,4	53,7
Max	78	1,82	56,8	251

Durch die längeren Akkumulationszeiträume liegen die Mediane der Schwermetallgehalte in den Humusaufgaben über denen der Moose. Besonders deutlich wird dies beim Blei, dessen Mobilität sehr gering ist. Da die Probepunkte der BZE und des Moosmonitorings nicht identisch sind ist eine punktuelle Auswertung nicht möglich. Von größerer Bedeutung ist die Verteilung der Immissionsbelastung (Moosgehalte) und der Gehalte in den Humusaufgaben. Beim Blei lassen sich die Ergebnisse des Moosmonitorings 1990/91 und der BZE relativ gut vergleichen (Anlage, Karten 5 und 23). Regionen mit erhöhter Belastung (Nordrhein-Westfalen, östliches Deutschland) spiegeln sich auch in der regionalen Verteilung der Bleigehalte in den Humusaufgaben wider. Die sehr hohen Gehalte in den

Humusauflagen des Harz lassen gehen auf historische Einträge zurück. Auffallend sind Regionen mit erhöhten Einträgen (Saarland, Teile von Rheinland-Pfalz, westliches Baden-Württemberg), die sich in den Humusauflagen nicht niederschlagen. Es ist auf Basis der vorliegenden Daten nicht zu klären, ob die Immissionen noch nicht längerfristig stattgefunden haben und somit noch keine Akkumulation erfolgte, oder ob die Humusauflagen der genannten Gebiete auf Grund der bodenchemischen Bedingungen nicht in der Lage sind, diese zu akkumulieren. Im letzteren Fall stellten diese Gebiete Flächen mit einem erhöhten Risiko von Boden- bzw. Grundwasserkontaminationen dar.

Die für Blei getroffenen Aussagen gelten unter Berücksichtigung regionaler Variabilität ebenfalls für die anderen untersuchten Schwermetalle. Untersuchungen zu Zeitreihen sind nicht möglich, da Wiederholungsuntersuchungen für die BZE nicht vorliegen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die **Ziele** der vorliegenden Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Darstellung der räumlichen Verteilung von Schwermetallgehalten in der Humusauflage deutscher Wälder auf der Grundlage von Daten aus der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE)
- Vergleich der räumlichen Verteilung von Schwermetallgehalten in Humusauflagen von Waldböden mit den auf Grundlage der Karte der Bodenausgangsgesteine regionalisierten Hintergrundwerten für mineralische Oberböden
- Untersuchung der Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten in Humusauflage und Mineralbodenhorizonten ausgewählter Waldstandorte (BZE-Punkte aus Bayern und Nordrhein-Westfalen)
- Vergleich der länderübergreifenden Hintergrundwerte für Schwermetalle in mineralischen Oberböden für Wälder mit den Ergebnissen der BZE in Bayern und Nordrhein-Westfalen
- Vergleich der räumlichen Verteilung der Schwermetallgehalte in der Humusauflage deutscher Waldböden (BZE) mit den Ergebnissen des Moosmonitorings (Immissionsindikation) zur Kennzeichnung der Belastungssituation.

Für die Untersuchungen standen als **Datengrundlagen** zur Verfügung:

### a) bundesweite Datensätze

- Hintergrundwerte für Schwermetalle in Oberböden unter Wald (beprobte wurden in der Regel die A-Horizonte bis in eine Tiefe von 10 cm). Quelle: Bund-Länder-AG 1998
- Schwermetallgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder aus dem BZE-Datensatz. Quelle: WOLFF & RIEK, 1997.
- Schwermetallgehalte von Moosen aus dem Moosmonitoring 1990/91 und 1995/96. Quellen: HERPIN, MARKERT, LIETH, 1995, SIEWERS, HERPIN, 1998.

### b) regionale Datensätze

- unveröffentlichte Daten zu Schwermetallgehalten in Humusauflagen und Mineralböden von BZE-Standorten der Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen

Die wesentlichen **Ergebnisse** stellen sich wie folgt dar:

### **1. Räumliche Verteilung von Schwermetallgehalten in den Humusauflagen deutscher Wälder**

Für die Analyse der räumlichen Verteilung von Schwermetallgehalten in Humusauflagen von Waldböden (1800 BZE-Standorte) wurde zunächst untersucht, ob die Regionalisierung anhand von bodenkundlich-standörtlichen Parametern

(Substratgruppe, Hauptbodentyp, Haupthumusform, Baumart) erfolgen kann. Da sich dies als nicht sinnvoll herausstellte und auch mit Hilfe von geostatistischen Variogrammanalysen nicht für alle Schwermetalle eine Interpolationsgrundlage geschaffen werden konnte, wurden die Schwermetallgehalte der Humusauflagen von Waldböden mit Hilfe der auch beim Moosmonitoring angewendeten Inverse-Distance-Methode räumlich interpoliert.

## **2. Vergleich der Schwermetallgehalte in Humusauflagen mit Hintergrundwerten**

Grundlage der Regionalisierung der Hintergrundwerte ist die Geologie (Bodenausgangsgesteine) und die Landnutzung (Landnutzungsformen Acker, Grünland, Wald) (UTERMANN, et al., 1999). Um einen Vergleich der BZE-Daten mit den Hintergrundwerten zu ermöglichen, wurden die BZE-Standorte den Bodenausgangsgesteinen nach BAG 1000 zugeordnet. Dadurch konnten die 90-Perzentilwerte der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen mit den Hintergrundwerten auf der Basis der Bodenausgangsgesteine verglichen werden. Auf Sandstandorten des norddeutschen Tieflandes liegen sind die Verhältnisse der 90-Perzentile der Schwermetallgehalte zu den jeweiligen Hintergrundwerten am höchsten (Pb 497%, Cd 212%, Cu 515%, Zn 402%). Ausschlaggebend ist hierfür die geringe Schwermetallbindungskapazität des tonmineralarmen Oberbodens. Mit Ausnahme des Bleis kommen auf verschiedenen Bodenausgangsgesteinen auch, im Vergleich zu den Humusauflagen, höhere Hintergrundwerte vor [Cd 89% - 133% (212 %), Cu 61% - 163% (515%), Zn 85 - 156% (402%)]. Als Ursachen für diese Unterschiede kommen die unterschiedlichen bodenchemischen und bodenphysikalischen Bedingungen und deren Auswirkungen auf die Mobilität der vorhandenen Schwermetalle in Betracht.

## **3 Untersuchung der Beziehungen zwischen Schwermetallgehalten in der Humusauflage und im Mineralboden**

Angaben zu Schwermetallgehalten in Humusauflagen und Mineralböden von BZE-Standorten der Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen ermöglichten die Prüfung von Korrelationen zwischen den Schwermetallgehalten in Humusauflage und Oberboden. Überdies erlaubten sie den Vergleich der Schwermetallgehalte im mineralischen Oberboden mit den ebenfalls für diese Tiefenstufe - aber anhand eines anderen Probenkollektivs - hergeleiteten Hintergrundwerten. Repräsentative Aussagen konnten für das Bundesland Bayern abgeleitet werden.

Je nach Bodenausgangsgestein und Schwermetall differieren die Schwermetallgehalte im Oberboden und die länderübergreifenden Hintergrundwerte unterschiedlich stark. Als mögliche Ursache der Unterschiede ist die Problematik des Vergleichs regionaler Daten mit überregional abgeleiteten Hintergrundwerten zu nennen. Darüber hinaus wurde bei der Auswertung der BZE-Daten auf eine Extremwerteliminierung verzichtet. Hierdurch können sich bereits Unterschiede bei den 90-Perzentilwerten der Hintergrundwerte und der Schwermetallgehalte in der Humusauflage ergeben.

Die nach Bodenausgangsgesteinen stratifizierte Analyse der Schwermetallgehalte bayerischer BZE-Standorten ergab für alle Schwermetalle Korrelationen zwischen den Schwermetallgehalten in Humusauflagen und der obersten Tiefenstufe der Oberböden. Beim Cadmium ( $r=0,73$ ) und Zink ( $0,64$ ) fanden sich gute Korrelationen, wohingegen diese bei Blei ( $0,38$ ) und Kupfer ( $r=0,13$ ) nur gering ausgeprägt sind.

Auch in Nordrhein-Westfalen konnte für Cadmium trotz des geringen Stichprobenumfangs eine gute Korrelation festgestellt werden ( $r=0,89$ ) Basierend auf den gefundenen korrelativen Zusammenhängen wurde die Verteilung der Cadmiumgehalte in den Humusauflagen aller Standorte der einzelnen Bodenausgangsgesteine errechnet und analysiert. Dabei wurde deutlich, dass innerhalb desselben Bodenausgangsgesteins (z.B. BAG 11 - Tongesteine) deutliche Unterschiede bei der Verteilung der Cadmiumgehalten in den Humusauflagen auftreten können.

#### ***4. Vergleich der räumlichen Verteilung der Schwermetallgehalte in der Humusauflage von Waldböden mit den Ergebnissen des Moosmonitorings***

Die Gegenüberstellung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen von BZE-Standorten mit den Angaben zu Schwermetallgehalten in Moosen aus dem bundesweiten Moosmonitoring lassen weitere Rückschlüsse auf den Ursprung und das Verhalten von Schwermetallen in den Humusauflagen deutscher Wälder zu. In weiten Teilen der Bundesrepublik korrespondieren die Verteilung der Moosgehalte mit den Schwermetallgehalten in den Humusauflagen. In Regionen mit erhöhten Gehalten in den Humusauflagen sind historische Belastungen und/oder langfristige Akkumulationen zu vermuten. Besonderes Interesse ist den Regionen zuzuwenden, in denen sich erhöhte Einträge (induziert durch hohe Schwermetallgehalte in Moosen) nicht in den Humusauflagen wiederfinden. In derartigen Gebieten besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass die Einträge nicht akkumuliert wurden und stattdessen die Humusauflage rasch passierten. In derartigen Fällen können Sickerwasser- und Streufalluntersuchungen, wie sie z.B. im Rahmen des Level II-Programms durchgeführt werden, Aufschluss über den Verbleib der Einträge geben.

#### **Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf**

Die Untersuchung ergab, dass die räumliche Verteilung der Schwermetallgehalte in den Humusauflagen deutscher Wälder nicht anhand geologischer Grundlageninformationen regionalisiert werden kann. In der Zusammenschau der dargestellten Ergebnisse ist dagegen festzustellen, dass die regional erhöhten Schwermetallgehalte in den Humusauflagen von Waldböden ganz wesentlich durch regional in unterschiedlichem Ausmaß wirksame Depositionen / Immissionen bedingt sind.

Die Fragestellung der Repräsentativität der Hintergrundwerte konnte, auf der vorliegenden Datengrundlage nicht hinreichend beantwortet werden. Es ergaben sich jedoch einige Ansätze für die kritische Interpretation und den weiteren Umgang mit den Hintergrundwerten. Dass die Hintergrundwerte unter Wald in den organisch geprägten A-Horizonten ermittelt wurden, lässt - angesichts der Untersuchungsergebnisse für Humusauflagen - den Schluss zu, dass die Schwermetallgehalte in dieser Tiefenstufe noch im Wesentlichen durch über den Luftpfad eingetragene Schwermetallanteile geprägt sind. Die Definition der Hintergrundwerte legt den Schwerpunkt der Schwermetallgehalte auf die geogenen Anteile, die durch ubiquitäre Einträge überlagert werden. Mit dem auf dieser Basis erarbeiteten, geologisch geprägten Regionalisierungsansatz können regional unterschiedliche anthropogene Belastungen nicht abgebildet werden. Unterschiedliche naturräumliche Gegebenheiten können auf der Ebene der Bodenausgangsgesteine ebenfalls nicht erfasst werden, spielen aber bei der Frage



der Wirksamkeit von Schwermetallgehalten (Mobilität, Lösungsverhalten, Austräge) eine wesentliche Rolle.

Bei der Regionalisierung von Schwermetallgehalten anhand von Bodenausgangsgesteinen sollten Angaben zu tieferen Mineralbodenschichten berücksichtigt werden, um den regional unterschiedlichen Einfluss der organischen Substanz bzw. der daran gebundenen anthropogenen Einträge zu reduzieren.

Der vorliegende Bericht zeigt, dass die Beurteilung von Schwermetallgehalten in Waldböden nur unter Berücksichtigung kompletter Bodenprofile sinnvolle Aussagen ermöglicht. Die chemische Zusammensetzung der organischen Substanz der Humusauflagen und der organisch geprägten Mineralbodenhorizonte spielt eine wesentliche Rolle bei der Speicherung und Freisetzung der Schwermetalle. Die mineralische Bodenphase ist durch ihre Struktur und ihre bodenchemischen Bedingungen für den Verbleib bzw. den Austrag von Schwermetallen aus einem Ökosystem verantwortlich. Zukünftige Untersuchungen zu Schwermetallgehalten und deren anthropogenen Anteilen sollten demzufolge auch das gesamte Bodenprofil berücksichtigen. Neben der Bodenfestphase sind hierbei Betrachtungen zu den mobilen Schwermetallfraktionen in der Bodenlösungsphase unerlässlich.

Neben den Fragestellungen zur Mobilität und Bioverfügbarkeit sind für die Zukunft Aussagen zur individuellen Stresstoleranz gegenüber Schwermetallen in verschiedenen Bindungsformen und der ökosystemaren Wirkungen der einzelnen Schwermetalle sowie eventueller Synergieeffekte dringend erforderlich. Die zur Zeit gängigen Orientierungs- (TYLER, 1992) und Vorsorgewerte (PRUESS, 1994) für organische Auflagen sind hierfür beispielhaft.

## 5 Literatur

ANGEHRN-BETTINAZZI, C., HERTZ, J. (1990): Schwermetallgehalte in der Streuaufgabe von Waldstandorten - Rückschlüsse auf die Immissionssituation. In: Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Böden: Einträge, Bewertung, Regelungen; VDI-Berichte 837 Teil 1.

BARITZ, R. (1996): Kohlenstoffvorräte der Waldböden Deutschlands Teil I. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung.

BMELF (1994): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) - Arbeitsanleitung . 2. Auflage. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Bonn.

BRECHTEL, H.-M. (1989): Stoffeinträge in Waldökosysteme. - Niederschlagsdeposition im Freiland und in Waldbeständen -. In: DVWK-Mitteilungen 17 Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden - Gefahr für die Gewässer? zusammengestellt von H.-M. BRECHTEL.

Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden (1998): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. 2. ergänzte und überarbeitete Auflage, in: ROSENKRANZ, et al. (Hrsg.), Kennziffer 9006; BOS Erich Schmidt-Verlag, Berlin 1998.

GULDER, H.-J., KÖLBEL, M. (1993): Waldbodeninventur in Bayern. Forstliche Forschungsberichte München Nr. 132. Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität München und Bayerische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (Hrsg.).

HARTWICH, R., BEHRENS, J. , ECKELMANN, W. HAASE, G., RICHTER; A., ROESCHMANN, G., SCHMIDT, R. (1995): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000 - Karte mit Erläuterungen, Textlegende und Leitprofilen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

HERPIN, U., MARKERT, B., LIETH, H. (1995): Monitoring der Schwermetallbelastung in der Bundesrepublik Deutschland mit Hilfe von Moosanalysen. UBA-Texte 31/95. Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin.

HORNBURG, V., BRÜMMER, G. W. (1993): Verhalten von Schwermetallen in Böden. 1. Untersuchungen zur Schwermetallmobilität., Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 156, 467 - 477.

KÖNIG, N. WOLFF, B. (1993): Abschlußbericht über die Ergebnisse und Konsequenzen der im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald durchgeführten Ringanalysen. Forschungszentrum Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 33.

KUNTZE, H., FLEIGE, H., GRUPE, M., KOCH, D., PLUQUET, E. STUMPF, A. (1995): Kennzeichnung der Empfindlichkeit der Böden gegenüber Schwermetallen unter Berücksichtigung von lithogenem Grundgehalt, pedogener An- und Abreicherung sowie anthropogener Zusatzbelastung. Mobilität von Schwermetallen

in Böden mit erhöhtem geogenen Grundgehalt und anthropogener Zusatzbelastung. UBA Texte 55/96. Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin.

MARTIN, W., AUSSENDORF, M., SUTTNER, T. (2000): Übersichtskarten von Hintergrundwerten in Bayern. Vortrag beim LABO A 2 "Informationsgrundlagen" Workshop: Flächenhafte Darstellung punktbezogener Daten über Stoffgehalte in Böden.

SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Stuttgart 1998.

SCHINNER, F., SONNLEITNER, R. (1997): Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik, Band IV Anorganische Schadstoffe, Berlin Heidelberg.

SCHMIDT, R., WOLFF, B., BARITZ, R., MONSE, M., KIWITT, I. (1998): Bodenübersichtskarte der Waldflächen der BRD - Bestimmung der Bodenvergesellschaftung und des Datenhintergrundes. Abschlußbericht, Eberswalde.

SCHULTE, A., BLUM, W. E. H. (1997): Schwermetalle in Waldökosystemen. In: MATSCHULLAT, J. TOBSCHALL, H. J., VOIGT, H.-J. (Hrsg): Geochemie und Umwelt, Berlin Heidelberg.

SETZNAGEL, R., TRIMBACHER, C., VOGEL, W.R. (1990): Schwermetalle in Waldböden, Fichtennadeln und Pilzen im Nahbereich eines Emittenten. In: Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Böden: Einträge, Bewertung, Regelungen; VDI-Berichte 837 Teil 1.

SIEWERS, U., HERPIN, U. (1998): Schwermetalleinträge in Deutschland: Moos-Monitoring 1995/96. Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Reihe D, Heft SD 2, Hannover.

UTERMANN, J., DÜWEL, O., FUCHS, M., GÄBLER, H.-E., GEHRT, E., HINDEL, R., SCHNEIDER, J. (1999): Methodische Anforderungen an die Flächenrepräsentanz von Hintergrundwerten in Oberböden. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Endbericht -. UBA-Texte 95/99 (auf CD-ROM incl. Farbabbildungen), Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin 1999.

WOLFF, B., RIEK, W. (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996 - Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987 - 1993 (BZE) Band 1 + 2. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Bonn.

# Anlage