

Sachstandsbericht

Landesamt für Umwelt und Geologie

Die Schwermetallgehalte der Böden des Freiburger Raumes für die Bewertung der Gefährdungspfade Boden \Rightarrow Mensch, Boden \Rightarrow Nutzpflanze und Boden \Rightarrow Grundwasser nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)

Stand 01.06.2001

Bearbeiter: G. Rank; K. Kardel; H. Weidensdorfer
Referat Bodenkartierung/Geochemie

Inhaltsverzeichnis:		Seite
1	Vorwort	5
2	Recherche und Prüfung der vorliegenden Datenbestände zu stofflichen Untersuchungen im Raum Freiberg	5
2.1	Recherchierte Datenbestände	5
2.2	Prüfung auf Vergleichbarkeit der Datenbestände	6
2.3	Validierter Datenbestand zur Beurteilung der Böden nach BBodSchV	8
3	Statistische Bearbeitung und Kartendarstellungen	8
4	Auswertung des Datenbestandes hinsichtlich der Überschreitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für die einzelnen Wirkungspfade nach BBodSchV	11
4.1	Wirkungspfad Boden⇒Mensch, direkte Aufnahme von Schadstoffen	11
4.2	Wirkungspfad Boden⇒Nutzpflanze, Schadstoffübergang im Hinblick auf die Pflanzenqualität und Wachstumsbeeinträchtigungen	12
4.3	Wirkungspfad Boden⇒Grundwasser	13
5	Zur Spurenelementverteilung auf Forststandorten	13
6	Spurenelementgehalte auf Halden	15
7	Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise	15
8	Literatur	16

Tabellenverzeichnis (Anhang)

- Tab. 1: Datenbestände „Stoffliche Untersuchungen der Böden im Raum Freiberg“
Tab. 2: Beurteilung der Wirkungspfade nach BBodSchV (1999), Prüf- und Maßnahmenwerte

Abbildungsverzeichnis (Anlagenband)

- Abb. 1: Vereinfachte Geologische Karte
Abb. 2: Erzgänge und Hüttenstandorte
Abb. 3: Karte der Bodennutzung
Abb. 4: Räumliche Verteilung Analysendaten mineralischer Oberboden
Abb. 5: pH-Wert in der organischen Auflage, Oh-Horizont
Abb. 6: pH-Wert im mineralischen Oberboden
Abb. 7: pH-Wert im Unterboden
Abb. 8: Arsen in der organischen Auflage, Oh-Horizont
Abb. 9: Arsen im mineralischen Oberboden
Abb. 10: Arsen im mineralischen Oberboden (Isolinienkarte, Prüfwerte Pfad Boden⇒Mensch)
Abb. 11: Arsen im Unterboden
Abb. 12: Arsen im Unterboden, Zuordnung nach LAGA-TR
Abb. 13: Arsen im mineralischen Oberboden, Nutzungsart Grünland
Abb. 14: Arsen im mineralischen Oberboden, Nutzungsart Ackerbau, Nutzgarten
Abb. 15: Mobile Arsen-Gehalte (NH₄NO₃-Extraktion) im mineralischen Oberboden
Abb. 16: Eluierbare Arsen-Gehalte (DEV S4) im Unterboden
Abb. 17: Zuordnung der eluierbaren Arsen-Gehalte (DEV S4) nach LAGA-TR, Unterboden
Abb. 18: Cadmium in der organischen Auflage
Abb. 19: Cadmium im mineralischen Oberboden
Abb. 20: Cadmium im mineralischen Oberboden (Isolinienkarte, Prüfwerte Pfad Boden⇒Mensch, Boden⇒Pflanze⇒Mensch)
Abb. 21: Cadmium im Unterboden
Abb. 22: Cadmium im Unterboden, Zuordnung nach LAGA-TR
Abb. 23: Mobile Cadmium-Gehalte (NH₄NO₃-Extraktion) im mineralischen Oberboden
Abb. 24: Mobile Cadmium-Gehalte (NH₄NO₃-Extraktion) im mineralischen Oberboden, Nutzungsart Ackerbau, Nutzgarten
Abb. 25: Eluierbare Cadmium-Gehalte (DEV S4) im mineralischen Unterboden
Abb. 26: Zuordnung der eluierbaren Cadmium-Gehalte (DEV S4) nach LAGA-TR, Unterboden
Abb. 27: Blei in der organischen Auflage
Abb. 28: Blei im mineralischen Oberboden
Abb. 29: Blei im mineralischen Oberboden (Isolinienkarte, Prüfwerte Pfad Boden⇒Mensch)
Abb. 30: Blei im Unterboden
Abb. 31: Blei im Unterboden, Zuordnung nach LAGA-TR
Abb. 32: Mobile Blei-Gehalte (NH₄NO₃-Extraktion) im mineralischen Oberboden
Abb. 33: Mobile Blei-Gehalte (NH₄NO₃-Extraktion) im mineralischen Oberboden, Nutzungsarten Ackerbau, Nutzgarten
Abb. 34: Eluierbare Blei-Gehalte (DEV S4) im mineralischen Unterboden
Abb. 35: Zuordnung der eluierbaren Blei-Gehalte (DEV S4) nach LAGA-TR, Unterboden
Abb. 36: Thallium in der organischen Auflage
Abb. 37: Thallium im mineralischen Oberboden
Abb. 38: Thallium im Unterboden
Abb. 39: Mobile Thallium-Gehalte (NH₄NO₃-Extraktion) im mineralischen Oberboden
Abb. 40: Kupfer in der organischen Auflage
Abb. 41: Kupfer im mineralischen Oberboden

- Abb. 42: Kupfer im Unterboden
- Abb. 43: Zink in der organischen Auflage
- Abb. 44: Zink im mineralischen Oberboden
- Abb. 45: Zink im Unterboden
- Abb. 46: Halden, Arsen im Oberboden
- Abb. 47: Halden, Cadmium im Oberboden
- Abb. 48: Halden, Blei im Oberboden
- Abb. 49: Halden, Zink im Oberboden

1 Vorwort

Aufgrund der hohen geogenen und anthropogenen Schwermetallbelastung im Raum Freiberg erfolgten in der Vergangenheit zahlreiche stoffliche Untersuchungen der Böden, die in der Probenahme, dem Probenaufschluss und der Analysenmethode dem jeweiligen Untersuchungszweck angepasst waren und folglich z. T. stark voneinander abweichen.

Nach Inkrafttreten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BMU, 1999) werden vom Gesetzgeber für die unterschiedlichen Wirkungspfade Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt, die auf einer standardisierten Datenerhebung basieren. Mit dem Sachstandsbericht (RANK et al., 1999) wurden alle dem LfUG vorliegenden Datenbestände auf die qualitativen Vorgaben der BBodSchV geprüft und z. T. durch Umrechnung der Altdaten validierte Datensätze erzeugt, die eine erste Beurteilung der Bodenanalysen zur Überschreitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für den Schadstoffübergang Boden \Rightarrow Mensch, Boden \Rightarrow Nutzpflanze und Boden \Rightarrow Grundwasser nach BBodSchV ermöglichten.

Zur Verbesserung der Datenlage wurde durch das LfUG im Jahr 2001 ein zweites Sondermessnetz abgeschlossen (600 Standorte mit 1256 Proben), welches vor allem in den Randbereichen, zusätzliche Informationen zum Übergang belasteter Bereich – unbelasteter Bereich erbringen sollte. Zum anderen wurden im Raum Hilbersdorf, Halsbrücke und Kleinwaltersdorf Verdichtungen auf 250 x 250 m vorgenommen, um über methodische Arbeiten Aussagen zur einer optimalen Probendichte zu erhalten (nicht Gegenstand des Sachstandsberichts).

Durch Einarbeitung der Altdaten der Dissertation KLINGER (1994) und der Nachuntersuchung von Proben der Dipl.-Arbeit BROSIG (1987) im Nordteil des Untersuchungsgebietes, konnte somit der validierte Datenbestand gegenüber dem Sachstandsbericht von 1999 fast verdoppelt werden.

Zusätzlich zu den „Leitparametern“ As, Cd, Pb wurden die Kartendarstellungen um die Elemente Cu und Zn sowie um die Darstellung der Elementverteilung in der organischen Auflage (Oh-Horizont) und im „Unterboden“ erweitert.

Die wirkungspfad- und nutzungsbezogene Auswertung der Daten und ihre Darstellung in Karten ermöglichen sowohl eine flächenhafte als auch standortbezogene Bewertung der Schutzgüter (49 Einzelkarten, Anlagenband). Für Vollzugsmaßnahmen ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Untersuchungsdichte nach Validierung des Datenbestandes 2 bis 4 Proben/km² beträgt und aufgrund unterschiedlich starker geogener und anthropogener Beeinflussungen die Schadstoffe im Boden sehr heterogen verteilt sein können. Dies ist vor allem dann zu berücksichtigen, wenn durch Vollzugspflichten Gebietsfestlegungen nach § 12 Abs. 10 BBodSchV erfolgen bzw. Bodenplanungsgebiete gem. § 9 SächsABG festgelegt werden sollen. Bei einer Einzelfallprüfung ist durch eine Neuuntersuchung zu prüfen, ob unter den jeweiligen Standortbedingungen für die maßgebliche Nutzung und die Schutzgüter eine Gefahr besteht.

2 Recherche und Prüfung der vorliegenden Datenbestände zu stofflichen Untersuchungen im Raum Freiberg

2.1 Recherchierte Datenbestände

Daten zum Stoffbestand der Freiburger Böden werden bereits seit mehreren Jahrzehnten erhoben. Insbesondere seit Ende der 60er Jahre (RÖSLER et al., 1969), aber vor allem im Zeitraum der politischen Wende, wurden durch verschiedene Institutionen und Arbeitsgruppen flächendeckende Untersuchungen vorgenommen. Aufgrund der unterschiedlichen Zielrichtungen (Landwirtschaft, Forschung, Umwelthygiene, Prospektion von Lagerstätten u. a.) kamen stark voneinander abweichende Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysenmethoden zum Einsatz. Da die ermittelten Analyseergebnisse nur im Rahmen der Einzelprojekte bewertet wurden, stellte sich die Frage der Vergleichbarkeit der Daten zu anderen Erhebungen nicht in diesem Maße wie sie heute bei der Zusammenführung und Auswertung von Analysen in Datenbanken bestehen.

Derzeit liegen dem LfUG Datenbestände aus 24 (größeren) Projekten und zahlreichen Einzelerhebungen vor, wovon nach Prüfung 19 in den vorliegenden Sachstandsbericht eingingen (vgl. Tab. 1).

2.2 Prüfung auf Vergleichbarkeit der Datenbestände

Durch die BBodSchV werden zahlreiche Anforderungen an die Qualität und Dokumentation der Probenahme- und Analysenbedingungen gestellt, so u. a.:

- Nutzungsorientierte bzw. horizontbezogene Beprobungstiefe (vgl. Tab. 2)
- Zu untersuchende Kornfraktion (i. d. R. <2 mm)
- Probenaufschluss; Gesamtgehalte - Königswasser, mobile Gehalte - NH_4NO_3 -Extraktion, Eluate mit Filtrationsschritt
- Analysenmethoden, AAS, ICP-AES, ICP-MS.

Nutzungsorientierte bzw. horizontbezogene Beprobung

Die Datenbestände weisen grundsätzlich zwei unterschiedliche Beprobungskriterien auf – eine tiefenstufenbezogene (0 bis 20 und 0 bis 30 cm) und eine horizontbezogene (mineralischer Oberboden: Ap, Ah; Unterboden usw.). Für die Zusammenführung der Daten bildeten diese Unterschiede kein Ausschlusskriterium, da durch beide Probenahmestrategien der nutzungsspezifische Bereich, i. W. mineralischer Oberboden (0 bis 30 cm), hinreichend genau abgebildet wird.

In einigen Projekten erfolgte keine oder nur eine unzureichende Dokumentation der Nutzungsart zum Zeitpunkt der Probenahme (AUERMANN et al., 1990). Diesen Proben wurde durch Verschneidung der Lagepunkte mit der Nutzungskarte (Abb. 3) DV-technisch die jeweilige Nutzung (Stand 1992) zugewiesen.

Kornfraktion

Die untersuchten Kornfraktionen sind in den einzelnen Datenbeständen sehr unterschiedlich, wobei das Korngrößenspektrum von der Gesamtprobe bis zur Fraktion <63 μm reicht. Zur Bewertung der Analyseergebnisse kommt der Kornfraktion, neben dem Aufschlussverfahren der Probe, die größte Bedeutung zu.

Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass die Schwermetallgehalte zur feineren Fraktion hin zunehmen. Durch höhere Quarzgehalte in den vorliegenden Verwitterungsböden kommt es bei höheren Anteilen der Fraktion >63 μm zu Verdünnungseffekten, wenn die Fraktion <2 mm untersucht wird (KLUGE et al., 1992). In einem FuE-Vorhaben des LfUG konnte an Proben des Freiburger Raumes nachgewiesen werden, dass bei den Elementen As, Cd und Pb in den Fraktionen 20 bis 63 μm (Grobschluff) und <20 μm (Mittelschluff bis Ton) gegenüber den Sandfraktionen in Gebieten mit zusätzlichen anthropogenen Belastungen deutlich höhere Gehalte vorliegen (HERTWIG, 1999).

Nach BBodSchV sind für die Pfade Boden \Rightarrow Mensch (oral, dermal) und Boden \Rightarrow Nutzpflanze die Gesamtgehalte am Feinboden (<2 mm) zu bestimmen. Aufgrund der beschriebenen Anreicherungen in der Schluff-Tonfraktion musste deshalb der umfangreiche Datenbestand der TU Bergakademie Freiberg (VOLAND et al., 1990) bei der Bewertung der Vergleichbarkeit der Analysen ausgeschlossen werden. Im Umkehrschluss bleiben auch die Datenbestände unberücksichtigt, wo die Spurenelemente an der Gesamtprobe analysiert wurden (i. W. Daten der pedogeochemischen Prospektion). Hier kann davon ausgegangen werden, dass es durch Aufmahlung von Grobböden (Kies, Grus) zu einem Verdünnungseffekt der Schwermetallgehalte kommt, weil im Skelettanteil gesteinsbildende Minerale (Quarz, Feldspat, Glimmer) dominieren, die relativ niedrige Schwermetallgehalte besitzen.

Die Bestimmung der mobilen Elementanteile (NH_4NO_3 -Extraktion) erfolgte ausschließlich am Feinboden nach DIN 19730.

Die Analyse im wässrigen Auszug für den Wirkungspfad Boden \Rightarrow Grundwasser wurde an der Gesamtprobe (Unterboden) entsprechend dem Deutschen Einheitsverfahren (DEV S4) durchgeführt.

Aufschluss der Bodenproben

Nach der BBodSchV ist das System der Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte, analog zur Klärschlammverordnung, auf die Bestimmung der Elementgehalte am Königswasser (KW)-extrahierbaren Anteil aufgebaut. Die Untersuchungen im Rahmen der bodenkundlichen Landesaufnahme u. a. Projekten basieren auf einem sog. Totalaufschluss, ein Säureaufschluss aus HF/HClO₄/HNO₃. In der Regel liegen die Totalgehalte über den KW-extrahierbaren Gehalten. Im Rahmen eines UBA-Forschungsvorhabens konnte durch UTERMANN et al. (1999) an länderübergreifenden Datensätzen nachgewiesen werden, dass zwischen dem Total- und KW-Aufschluss enge bis sehr enge Zusammenhänge existieren. Für den analytischen Vergleich zwischen Total- und KW-extrahierbaren Gehalten liegen substrat- und elementspezifische, lineare Regressionsfunktionen zur Umrechnung in beide Richtungen vor.

In einem FuE-Vorhaben des LfUG wurden analoge Untersuchungen für den Freiburger Raum durch HERTWIG (1999) durchgeführt, die zu folgenden Regressionsgleichungen führten:

$$As_{KW} = 0,16 + 0,99 As_{tot}$$

$$Cd_{KW} = -0,05 + 1,0 Cd_{tot}$$

$$Pb_{KW} = -12,94 + 1,01 Pb_{tot}$$

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei As und Cd zwischen beiden Aufschlussverfahren nur geringfügige Unterschiede bestehen, die im konkret vorliegenden Gehaltsniveau vernachlässigbar sind. Bei Blei ist der Gehaltsunterschied jedoch etwas größer, so dass die Pb-Totalgehalte der Datenbestände nach der o. g. Regressionsgleichung in KW-Gehalte umgerechnet wurden.

Bei einigen Großprojekten wurde zum Probenaufschluss 1,5 N-siedende Salpetersäure (HNO₃) benutzt. Methodische Untersuchungen von GRÜN et al. (1990) ergaben, dass für Pb und Cd ca. 90 bis 100 % der KW-extrahierbaren Gehalte erreicht wurden (As nicht untersucht). Damit können die mit dem HNO₃-Aufschluss und dem KW-Aufschluss ermittelten Analyseergebnisse (mit einer gewissen Vereinfachung) gleichgestellt werden.

Zur Bewertung des Wirkungspfades Boden⇒Nutzpflanze sind nach BBodSchV für die Elemente Pb, Cd und Tl die mobilen Elementanteile anzuwenden. Größere Datenerhebungen fanden dazu erst in jüngster Zeit statt, die alle nach DIN 19730 durchgeführt wurden und den gestellten Anforderungen entsprechen.

Der Wirkungspfad Boden⇒Grundwasser (Schwermetalle) ist nach BBodSchV nach Gehalten im Bodensättigungsextrakt zu bewerten. Liegen solche Untersuchungen nicht vor, ist eine Ableitung von Konzentrationen im Bodenwasser aus ammoniumnitratextrahierbaren Gehalten oder Eluatgehalten nach DIN V 19735 möglich. Da im Rahmen der Sondermessnetze des LfUG Eluatanalysen nach DIN 38414-4 (Deutsches Einheitsverfahren S4) für Unterbodenproben erhoben wurden, ist eine Bewertung des Wirkungspfades Boden⇒Grundwasser grundsätzlich möglich. Dabei ist zu beachten, dass die Prüfwerte der BBodSchV für den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone (Ort der Beurteilung) gelten. Der Ort der Probenahme stimmt nicht notwendigerweise mit dem Ort der Beurteilung für das Grundwasser überein.

Analysenmethoden

Aufgrund der Entwicklung der Analysetechnik nach 1990 ist zu konstatieren, dass die in der BBodSchV vorgeschriebenen Verfahren AAS, ICP-AES und ICP-MS in den Einzelprojekten angewendet wurden. Als kritisch zu betrachten sind die älteren Analysen, welche mittels Atomemissions-spektralanalyse (AES) ermittelt wurden. Dies betrifft vor allem die Datenbestände der geochemischen Prospektion und die Pb-Gehalte von VOLAND et al., 1999. Letztere wurden von KLUGE et al. (1992) sehr kritisch bewertet. Da die Probenahmepunkte von 124 Proben mit denen von AUERMANN et al. (1990) von den Koordinaten her identisch sind, konnten statistische Untersuchungen zur Vergleichbarkeit dieser beiden Großprojekte durchgeführt werden. Die für diese Proben berechneten Korrelationskoeffizienten liegen sowohl für Pb als auch für Cd < 0,7, was darauf hindeutet, dass die unterschiedlichen Messverfahren (und Korngrößen) doch unterschiedliche Einflüsse dokumentieren. Für Pb wird dabei auf analysenbedingte Zufallsfehler der AES hingewiesen, die u. a. durch die organische Substanz verursacht werden und sich in „zu niedrigen“ Pb-Gehalten widerspiegeln. Dies veranlasste KLUGE et al. (1992) dazu, die Daten der TU Bergakademie Freiberg teilweise bei der Betrachtung der

Schwermetallbelastungen auszuschließen und an den gemeinsamen Probenahmepunkten mit AUERMANN et al. (1990) deren Ergebnisse zu bevorzugen.

Die Daten der TU Bergakademie Freiberg blieben aufgrund der untersuchten Kornfraktion (<63 µm) und der analysenverfahrensbedingten Fehlerquellen bei Pb unberücksichtigt.

Aus analogen Gründen trifft dies auch für die Prospektionsdaten zu (Gesamtprobe, AES).

2.3 Validierter Datenbestand zur Beurteilung der Böden nach BBodSchV

Von den recherchierten Datenbeständen, zuzüglich zahlreicher Einzelproben, mussten aufgrund der beschriebenen Abweichungen von den Anforderungen der BBodSchV fünf für die weiteren Bewertungen zur Schwermetallbelastung der Böden im Untersuchungsgebiet ausgeschlossen werden (vgl. Sachstandsbericht RANK et al., 1999). Damit liegen z. Z. für das gesamte Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 4) auf ca. 520 km² parameterbezogen folgende Stichprobenzahlen vor:

Sachstandsbericht 2001	Probenzahl Oberboden	Probenzahl Unterboden
Untersuchter Parameter		
Arsen	1659	1238
Cadmium	1874	1199
Blei	1919	1239
Kupfer	1536	1124
Zink	1812	1135
Thallium	1162	1152
NH ₄ O ₃ -Extraktionen	1082	
Eluate DEV S4		1015

Der so validierte Datenbestand bildete die Grundlage für sämtliche Kartendarstellungen und die Bewertung der Gefährdungspfade nach BBodSchV.

3 Statistische Bearbeitung und Kartendarstellungen

Die Kartendarstellungen (Rasterkarten) erfolgten mit Hilfe des Geographischen Informationssystems (GIS) ArcInfo einschließlich des GRID-Moduls. Mittels Inversdistanzwichtung (IDW) erfolgte eine Interpolation auf eine Rastergröße von 250 x 250 m. Der Interpolationsradius beträgt 1 600 m, wobei max. 9 Nachbarpunkte, die am nächsten gelegen sind, in die Berechnung eingingen. Die Klasseneinteilung erfolgte anhand der Berechnungen der Percentile 15, 25, 50 (Median), 75, 90, 95, 97 und 99 % (mittels Standardsoftware SPSS), wie sie z. B. zur Bestimmung der Hintergrundwerte von Böden (P50, P90) und zur Abtrennung von anomalen Elementgehalten (P97, P99) angewendet werden.

Für den ausgewählten Datenbestand ergeben sich für das Untersuchungsgebiet die in nachfolgenden Tabellen für organische Auflagen, Ober- und Unterböden aufgeführten Percentile (unabhängig von Substrat und Nutzung):

Element 1)	Oberboden *) s. u.							
	P15	P25	P50	P75	P90	P95	P97	P99

As	24	32	55	122	277	560	931	2296
Cd	0,41	0,54	0,95	1,9	4,1	6,6	8,8	15
Pb	66	88	169	347	765	1233	1785	3764
Cu	12	15	21	32	56	88	126	280
Zn	76	94	145	229	428	668	1032	1785
Tl	0,26	0,35	0,50	0,69	0,95	1,2	1,4	2,2
As_{mob}		<5	16	42	194	455	849	2646
Cd_{mob}	11	18	48	137	280	487	844	2205
Pb_{mob}	17	32	122	851	20950	52720	101530	332500
Tl_{mob}	<5	5	10	18	31	48	66	157

Element 1)	Unterboden							
	P15	P25	P50	P75	P90	P95	P97	P99
As	11	15	24	48	129	240	492	1111
Cd	0,10	0,15	0,30	0,60	1,4	2,5	3,3	7,7
Pb	22	29	55	122	338	622	918	2419
Cu	8,3	11	15	24	42	64	89	200
Zn	51	63	97	156	264	381	469	813
Tl	0,22	0,25	0,42	0,62	0,87	1,1	1,3	1,8
As_{elu}	0,50	0,90	2,3	5,7	16	37	69	248
Cd_{elu}	<0,1	0,17	0,25	0,53	1,4	2,3	3,6	10
Pb_{elu}	3	6,4	14	33	69	158	258	594

1) Gesamtgehalte mg/kg; mobile Gehalte (mob) µg/kg; Eluat-Gehalte (elu) µg/l

Zur besseren Konturierung von Flächen mit vermuteten Bodenbelastungen wurde für den Gefährdungspfad Boden⇒Mensch eine Isoliniendarstellung gewählt (ArcView, Zellgröße 500 x 500 m), deren Isokonzentratenabstände den nutzungsbezogenen Prüfwerten der BBodSchV entsprechen.

Für den Gefährdungspfad Boden⇒Nutzpflanze wurde eine Einzelpunktdarstellung jener Proben gewählt, die je nach Nutzungsart (Acker - Nutzgarten; Grünland) die Prüf- und Maßnahmenwerte überschreiten. Aufgrund des kleinräumigen Wechsels der Nutzungsart erschien eine Isoliniendarstellung nicht sinnvoll, da sonst über Nutzungsänderungen hätte hinweg interpoliert werden müssen, was letztendlich zu einer stark geglätteten Isolinie und relativ ungenauen Abgrenzungen geführt hätte.

Zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden⇒Grundwasser (Unterbodenhorizonte) kam ebenfalls eine Einzelpunktdarstellung zur Anwendung. Eine Differenzierung der Gehalte erfolgte über den Bezug zu den Z-Werten in den LAGA-Technische Regeln (TR). Auf die Unterschiede zwischen Geltungsbereich der Prüfwerte und dem Ort der Beurteilung sei nochmals hingewiesen.

Sämtliche Kartendarstellungen erfolgen im Maßstab 1:50 000, was aus fachlicher Sicht der Datendichte, 4 Proben/km², entspricht. Es handelt sich dabei um eine Darstellung **der regionalen Verteilung** von Schadstoffen in Böden. Eine Darstellung in größeren Maßstäben (1: 25 000 und größer), ohne eine entsprechende Erhöhung der Informationsdichte, ist aus unserer Sicht nicht zulässig. Die Datendichte reicht nicht aus, um Flurstücken einen Elementgehalt zuweisen zu können.

*) Gegenüber dem Sachstandsbericht von 1999 ergeben sich generell niedrigere Prozentgehalte. Die Ursache liegt i. W. in der Erweiterung des Untersuchungsgebietes in den Randbereichen, die deutlich niedrigere Elementgehalte aufweisen. Die Auenböden der Freiburger Mulde, des Münzbaches, der Bobritzsch und der Striegis wurden aufgrund der eigenen Spurenelementdynamik der Auen getrennt betrachtet. Rechentechnisch wurde der Auenbereich als Barriere behandelt und bei den Rasterkarten nicht in die Interpolation der „Nichtauenböden“ einbezogen. Da die Probenahmedichte in den Auen nicht ausreicht um die Gehalte flächen-

haft darstellen zu können, wurden die Auenabschnitte anhand der ermittelten Mediangehalte der Auenproben (P50) entsprechend der Gehaltsskala eingefärbt. Aufgrund der extrem starken Gehaltsschwankungen dieser Böden sind diese Werte als „Richtwerte“ für ein anzutreffendes Gehaltsniveau zu betrachten:

Mittlere Elementgehalte in den Auenböden (Mediangehalte, P50)

Oberböden

Aue	As	As _{mob}	Cd	Cd _{mob}	Pb	Pb _{mob}	Tl	Tl _{mob}	Cu	Zn
Freib. Mulde bis Weißenborn	60	24	1,9	300	170	800	1,0	24	35	220
Freib. Mulde ab Weißenborn	800	30	5,5	400	2700	11000	1,7	22	200	1000
Striegis ab Langenau	230	18	2,8	90	550	180	0,7	30	50	430
Münzbach	800	40	10	30	2000	250	0,9	13	300	1600
Bobritzsch	80	20	1,3	300	220	4000	0,5	12	24	210

Unterböden

Aue	As	As _{elu}	Cd	Cd _{elu}	Pb	Pb _{elu}	Tl	Cu	Zn
Freib. Mulde bis Weißenborn	60	n.b	1,0	n.b	140	n.b	1,0	20	150
Freib. Mulde ab Weißenborn	220	n.b	2,5	n.b	1500	n.b	1,2	120	500
Striegis ab Langenau	320	24	2,0	0,5	470	40	0,7	40	380
Münzbach	900	25	7	0,6	850	60	0,5	400	800
Bobritzsch	40	5	0,8	1,0	120	35	0,3	15	140

Elemente als Gesamtgehalte in mg/kg

mobile Anteile (mob) in µg/kg

Eluate (elu) in µg/l

n. b. – nicht bestimmt

4 Auswertung des Datenbestandes hinsichtlich der Überschreitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für die einzelnen Wirkungspfade

4.1 Wirkungspfad Boden⇒Mensch, direkte Aufnahme von Schadstoffen

Für den Pfad Boden⇒Mensch (orale, dermale Aufnahme) wurden nutzungsbezogene Prüfwerte auf der Grundlage der KW-Gehalte der Feinbodenfraktion festgelegt (Tab. 1). Mit dem vorliegenden Datensatz zu den Oberböden kann dieser Wirkungspfad für eine Beurteilung nur bedingt abgedeckt werden, da die Untersuchungsstrategie der meisten Projekte i. W. auf die Ermittlung der regionalen Elementverteilung ausgerichtet waren und Siedlungsflächen nur in untergeordnetem Maße erfassten. Anhand der Isolinienkarten lassen sich für die Leitparameter As, Cd, und Pb jedoch Flächen konturieren, wo die Prüfwerte für den Pfad Boden⇒Mensch überschritten werden (Abb. 10, 20, 29).

Kinderspielflächen

Die Prüfwerte für Pb (200 mg/kg) und vor allem für As (25 mg/kg) werden in großen Teilen des Untersuchungsgebietes überschritten (Brand-Erbisdorf - Freiberg - Halsbrücke, Hilbersdorf, Weißenborn, Niederbobritzsch u. a.). Spezialuntersuchungen durch KRETSCHMER (1993) auf 25 Kinderspielflächen ergaben bei As 21, Cd 2 und bei Pb 18 Überschreitungen. Weitere Prüfwertüberschreitungen kommen bei Cd hinzu, wenn die Haus- und Kleingärten in die Betrachtung einbezogen werden, die auch als Aufenthaltsbereiche für Kinder genutzt werden (Prüfwert 2 mg/kg Cd). Dabei ist zu beachten, dass die Kleingartenuntersuchungen nur im ehemaligen Landkreis Freiberg durchgeführt wurden (KRONE-MANN et al., 1993). Aus Analogieschlüssen ist auch mit Prüfwertüberschreitungen in Kleingärten von Brand-Erbisdorf zu rechnen, insbesondere in Bereichen mit intensivem Altbergbau.

Wohngebiete

Die flächenhaft größten Prüfwertüberschreitungen treten bei As (>50 mg/kg) auf und umfassen nahezu das gesamte Altbergbaugebiet von Brand-Erbisdorf – Freiberg – Halsbrücke einschließlich der Gebiete mit erhöhten Hüttenimmissionen (z. B. Bobritzsch). Bei Überschreitungen von Blei (>400 mg/kg) betrifft es vor allem die Ortslagen Brand-Erbisdorf - Freiberg (Mitte, Ost) - Hilbersdorf - Conradsdorf - Halsbrücke. Prüfwertüberschreitungen bei Cd (>20 mg/kg) wurden nicht angetroffen.

Park- und Freizeitanlagen

Prüfwertüberschreitungen bei As (>125 mg/kg) sind vor allem in den Ortslagen Brand-Erbisdorf - Freiberg (Mitte, Ost) - Hilbersdorf - Conradsdorf - Halsbrücke festzustellen, welche die Zentren der Buntmetallvererzungen sowie die Immissionszentren der Schwermetalleinträge über den Luftpfad widerspiegeln. Bei Blei werden die Prüfwerte (>1000 mg/kg) im Auenbereich des Münzbaches, der Freiburger Mulde ab Weißenborn und lokal in den Bergbauzentren überschritten.

Industrie/Gewerbe

Der Prüfwert für Industrie und Gewerbe beträgt für As 140 mg/kg und wird in den Ortslagen Brand-Erbisdorf - Freiberg (Mitte, Ost) - Hilbersdorf - Conradsdorf - Halsbrücke großflächig überschritten. Prüfwertüberschreitungen bei Blei (>2000 mg/kg) können vor allem in den Auenböden der Freiburger Mulde (ab Weißenborn), in der Münzbachau sowie an Altlaststandorten (Halden, Hütten, Erzwärschen) auftreten.

4.2 Wirkungspfad Boden⇒Nutzpflanze, Schadstoffübergang im Hinblick auf die Pflanzenqualität und Wachstumsbeeinträchtigungen

Ackerbau, Gartenbau und Nutzgärten

Während für die Beurteilung des Schadstoffübergangs Boden⇒Nutzpflanze für As die Gesamtgehalte des Königswasserauszugs am geeignetsten erscheinen, sind nach BBodSchV (§ 4, Anhang 1,2) für Cd und Pb die mobilen Gehalte nach NH_4NO_3 -Extraktion anzuwenden.

Bei den As-Gesamtgehalten wird der Prüfwert von 200 mg/kg vor allem auf den Acker- und Nutzgartenstandorten in Freiberg (Mitte, Osten), Conradsdorf und Hilbersdorf, selten in größerer (Nordost-) Entfernung der zentralen Bergbaustandorte und Hüttenanlagen angetroffen (z. B. Naundorf; vgl. Abb. 13).

Da der Gesetzgeber einen zweiten As-Prüfwert für Böden mit zeitweise reduzierenden Bedingungen vorschreibt (50 mg/kg), wurden in Abb. 8 auch jene Standorte vermerkt, wo dieser Prüfwert überschritten wird, ohne konkret feststellen zu können, ob am jeweiligen Standort tatsächlich teilweise reduzierende Verhältnisse vorliegen. Danach können Prüfwertüberschreitungen im gesamten Raum Brand-Erbisdorf - Freiberg - Halsbrücke und in den Auenböden auftreten. In hohem Maße sind auch die Flächen zwischen der Freiburger Mulde und der Bobritzsch sowie Ackerstandorte bis unmittelbar am Westrand des Tharandter Waldes betroffen.

Im Hinblick auf Wachstumsstörungen wird nach BBodSchV ein mobiler As-Gehalt (Prüfwert) von 400 $\mu\text{g}/\text{kg}$ festgelegt. Ein derartiges Gehaltsniveau wird nur östlich von Muldenhütten, auf Ackerstandorten südlich von Hilbersdorf, erreicht (Abb. 15).

Für Cd wird für einen Schadstoffübergang Boden⇒Nutzpflanze der mobile Elementanteil herangezogen und nach BBodSchV als zweistufiger Maßnahmenwert (40 und 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$) definiert (BBodSchV, § 4, Anhang 2). Da diese Untersuchungsverfahren flächenhaft erst in jüngster Zeit durch das LfUG durchgeführt wurden, beträgt die Datendichte etwa 50 % der Untersuchungsichte für die Bestimmung der Gesamtgehalte (ca. 2 Proben/ km^2 ; vgl. Abb. 23).

Der Cd-Maßnahmenwert für Brotweizenanbau und hochanreichernde Gemüsearten (40 $\mu\text{g}/\text{kg}$) wird in zahlreichen Einzelpunkten im gesamten Bergbauggebiet Brand-Erbisdorf - Freiberg - Halsbrücke und darüber hinaus, infolge der Hüttenemissionen in östliche bis südöstliche Richtung, überschritten (Bobritzsch, Lichtenberg).

Der generell gültige Cd-Maßnahmenwert für alle Nutzpflanzen beträgt 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Überschreitungen konzentrieren sich vor allem auf die Zentralbereiche der polymetallischen Gangvererzungen zwischen Brand-Erbisdorf und Freiberg und auf den Immissionsbereich der Hüttenstäube von Halsbrücke und Muldenhütten (Abb. 24). Infolge vorherrschender westlicher Luftströmungen sind Überschreitungen der Maßnahmenwerte bis in den Raum Nieder- und Oberbobritzsch festzustellen. Durch die hohe Löslichkeit der emittierten Staubpartikel treten Überschreitungen der Cd-Maßnahmenwerte auch dort noch auf, wo die Cd-Gesamtgehalte relativ niedrig sind und unter 2 mg/kg liegen.

Unter Berücksichtigung des Cd-Prüfwertes von 2 mg/kg (Gesamtgehalt) für Haus- und Nutzgärten (Tab. 2) sind flächenhafte Überschreitungen im gesamten Freiburger - Halsbrücker Raum und in östlicher Richtung bis an die Bobritzsch festzustellen. Aufgrund der Cd-ärmeren Erzparagenesen im Brand-er Raum (vgl. Abb. 2) und einer schwächeren Beeinflussung durch Hüttenemissionen treten Cd-Gehalte >2 mg/kg in diesem Gebiet nur im Zentralteil der Vererzungen auf (Abb. 20).

Analog zum Cd wird für Pb der mobile Elementanteil für den Schadstoffübergang Boden⇒Nutzpflanze herangezogen, aber als Prüfwert (100 $\mu\text{g}/\text{kg}$) definiert (Tab. 2).

Die Ackerstandorte mit Pb_{mob} -Prüfwertüberschreitungen sind mit den Standorten der Cd_{mob} -Maßnahmenwertüberschreitung nahezu identisch. Infolge der enormen Emissionen der Muldenhütten konnten hohe mobile Pb-Gehalte bis an den Tharandter Wald (vgl. Abb. 32) bzw. bis an die Ostgrenze des Untersuchungsgebietes auf den Ackerstandorten festgestellt werden (Abb. 33).

Mobile Tl-Gehalte oberhalb des Prüfwertes von 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ wurden nur auf drei Ackerstandorten festgestellt, die sich alle in nordöstlicher Richtung der Muldenhütten in Hauptwindrichtung befinden (Abb. 39).

Grünland

Für die Nutzungsart Grünland wurden für den Schadstoffübergang Boden⇒Nutzpflanze in der BBodSchV ausschließlich Maßnahmenwerte festgeschrieben (Tab. 2).

Überschreitungen des As-Maßnahmenwertes von 50 mg/kg sind in großen Teilen des Untersuchungsgebietes festzustellen (vgl. Abb. 13), insbesondere ist der Zentralteil des Brand-Erbisdorfer - Freiberg - Halsbrücker-Bergbaureviere und darüber hinaus bis Großschirma - Großvoigtsberg betroffen. Infolge der Hüttenemissionen ist dieses Gehaltsniveau auch auf Grünlandflächen von Bobritzsch und Naundorf bis an den Ostrand des Tharandter Waldes festzustellen.

Westlich des Freiburger Bergbaureviere sind nur wenige Standorte mit Überschreitungen des As-Maßnahmenwertes anzutreffen, wie z. B. in der Striegisaue.

Der Cd-Maßnahmenwert für Grünlandflächen (20 mg/kg) dürfte wohl relativ selten übertroffen werden. Nach den hier validierten Analysendaten ist nur ein Auenstandort des Münzbaches betroffen.

Überschreitungen des Pb-Maßnahmenwertes für Grünlandstandorte (1 200 mg/kg) sowie Cu (200 mg/kg, Nutzung durch Schafe) sind im Wesentlichen auf die Auenböden des Münzbaches und der Freiburger Mulde (ab Weißenborn) sowie auf die unmittelbare Nachbarschaft der Hüttenanlagen von Freiberg und Muldenhütten beschränkt.

Der Tl-Maßnahmenwert von 15 mg/kg wurde nur auf einem Grünlandstandort überschritten.

4.3 Wirkungspfad Boden⇒Grundwasser

Der Wirkungspfad Boden⇒Grundwasser (Schwermetalle) ist nach BBodSchV nach Gehalten im Bodensättigungsextrakt zu bewerten. Liegen solche Untersuchungen nicht vor, ist eine Ableitung von Konzentrationen im Bodenwasser aus ammoniumnitratextrahierbaren Gehalten oder Eluatgehalten nach DIN V 19735 möglich. Da im Rahmen der Sondermessnetze des LfUG Eluatanalysen nach DIN 38414-4 (Deutsches Einheitsverfahren S4) für Unterbodenproben erhoben wurden, ist eine Bewertung des Wirkungspfades Boden⇒Grundwasser grundsätzlich möglich.

Bei der Bewertung dieser Eluatanalysen nach BBodSchV kommt es zu häufigen Prüfwertüberschreitungen bei As, Cd und Pb vor allem im Bereich der Gangvererzungen in Brand-Erbisdorf – Freiberg - Halsbrücke und östlich der Muldenhüttener und Halsbrücker Essen (Abb. 17, 26, 35). Dabei ist erneut darauf hinzuweisen, dass die Prüfwerte der BBodSchV für den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone (Ort der Beurteilung) gelten. Der Ort der Probenahme (hier: Unterböden) stimmt nicht notwendigerweise mit dem Ort der Beurteilung für das Grundwasser überein.

5 Zur Spurenelementverteilung auf Forststandorten

Im Rahmen der Sondermessnetze des LfUG wurden neben den o. g. Nutzungsarten auch die Waldböden (Oh-Horizonte, Ober- und Unterböden) in die Untersuchung der As- und Schwermetallgehalte einbezogen, auch wenn die BBodSchV auf diese Bodennutzungsart nicht abzielt.

Parameterbezogene Probenzahlen:

Sachstandsbericht 2001	Probenzahl Org. Auflage,
-------------------------------	-------------------------------------

Untersuchter Parameter	Oh-Horizont
Arsen	129
Cadmium	128
Blei	129
Kupfer	129
Zink	129
Thallium	118

Statistische Maßzahlen Oh-Horizonte:

Elemente in mg/kg	Organische Auflage, Oh-Horizont							
	P15	P25	P50	P75	P90	P95	P97	P99
As	27	45	90	170	340	1155	1948	5896
Cd	0,37	0,48	0,80	1,3	2,5	5,1	8,7	11
Pb	192	264	428	796	1660	3365	6100	9416
Cu	26	31	42	58	91	178	212	464
Zn	63	80	114	160	307	476	633	1408
Tl	0,23	0,30	0,44	0,62	1,0	1,3	1,5	3,0

Generell ist festzustellen, dass die Oh-Horizonte unter Forst gegenüber den Oberböden anderer Nutzungsarten z. T. deutliche höhere (massebezogene) Schwermetallanreicherungen aufweisen (As, Cu, Pb). Die Ursachen der besonders hohen Belastung der Waldböden liegen einerseits im sog. Auskämmeffekt der Wälder (Interzeptionsdeposition), zum Anderen an den lokal hohen Schwermetallemissionen der Hütten im Freiburger Raum und die verstärkte Bindung von As und Pb an die organische Substanz.

Relativ niedrige Cd- und Zn-Gehalte in den organischen Auflagen (und auch im Oberboden, Unterboden) deuten darauf hin, dass infolge der fortschreitenden Versauerung (Abb. 5 bis 7) diese Elemente gelöst und in tiefere Bodenschichten, evtl. bis ins Grundwasser, transportiert und weggeführt wurden. Hohe mobile As- und Pb-Gehalte im Oberboden sowie relativ hohe Pb-Eluatgehalte im Unterboden der Forststandorte indizieren für das Schutzgut Grundwasser eine verstärkte Gefährdung.

Im Hinblick auf schädigende Wirkung der Ökosystemkomponenten nach TAYLOR (1992) verdienen die hohen Pb- und Cu-Gehalte in den Oh-Horizonten besondere Beachtung.

Vorsorgewerte für Humusaufgaben nach PRÜEB (1994) und Schwermetallkonzentrationen im Humus mit schädigenden Wirkungen auf Ökosystemkomponenten (TAYLOR, 1992)

	As	Cd	Cu	Pb	Tl	Zn
	mg/kg					
Vorsorgewert org. Auflage (PRÜEB)	10	0,7	20	130	0,4	85
Orientierungswerte (TAYLOR)						
Biochemische Aktivität		3,5-7,0	20	>500		600
Bodenatmung		3,5-7,0	20	>500		600
Stickstoffumsetzung		-	20	-		-
Mikroflora		7	20-35	>500		300 ?
Bodentiere, Invertebraten		>10	<100	150		<500
kritische Schwermetallbelastung		3,5	20	150		300

6 Spurenelementgehalte auf Halden

Im Rahmen von Wismut-Altlastenuntersuchungen wurden durch die Firmen G.E.O.S. Freiberg und beak consultants GmbH Haldenproben entnommen (0 bis 20 cm), die nachträglich auf As, Cd, Pb und Zink analysiert wurden. Am Gesamtdatenbestand von 119 Proben wurden analog zu den Bodenproben die Percentilwerte der Elementgehalte berechnet und die Analysenwerte als Punktkarten dargestellt (Abb. 46 bis 49). Da die Elementgehalte auf den Halden extrem stark schwanken können (analog den Auenböden), sind diese Daten nur eingeschränkt belastbar und sollten lediglich exemplarisch als lokal mögliche Gehaltsniveaus betrachtet werden.

7 Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise

Aufgrund der geogenen und anthropogenen Schwermetallbelastung der Böden war im letzten Jahrzehnt der Freiburger Raum wiederholt Objekt umweltgeochemischer Untersuchungen. Im Rahmen des vorliegenden Sachstandsberichtes wurden die vorliegenden Altdaten hinsichtlich ihrer Qualität für eine Verwendung im Rahmen der BBodSchV geprüft und zusammen mit den Datenerhebungen des LfUG für die Erstellung eines Kartenwerks (Maßstab 1:50 000) zur Beurteilung der Wirkungspfade Boden⇒Mensch, Boden⇒Nutzpflanze und Boden⇒Grundwasser nach BBodSchV zusammengeführt. Für das Untersuchungsgebiet von ca. 520 km² liegt somit eine parameterbezogene Untersuchungsdichte von 2 bis 4 Proben/km² für Oberbodenhorizonte vor.

Die Böden des Freiburger Raumes weisen die höchsten Pb und Cd-Gehalte im Freistaat Sachsen auf. Die Intensität der As-Belastung wird nur im Raum Ehrenfriedersdorf übertroffen.

- Wirkungspfad Boden⇒Mensch, Überschreitungen Prüfwerte Gesamtgehalte
 - As, (Cd), Pb Kinderspielflächen
 - As, Pb Wohngebiete
 - As (Pb) Park- und Freizeitanlagen, Industriegebiete
- Wirkungspfad Boden⇒Nutzpflanze, Überschreitungen Prüfwerte/Maßnahmenwerte
 - As, Gesamtgehalte, insbesondere Grünlandflächen
 - Cd, Gesamtgehalte Hausgärten/Kleingärten; mob-Gehalte Hausgärten/Acker
 - Pb, mob-Gehalte Hausgärten/Kleingärten und Acker
- Wirkungspfad Boden⇒Grundwasser, Überschreitungen Prüfwerte Bodensättigungsextrakt (abgeleitet aus Eluatn der Unterbodenhorizonte)
 - As, (Cd), Pb

Bezüglich der Datendichte wird seitens des LfUG eingeschätzt, dass der vorliegende Datenpool für eine Abgrenzung von Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten und für eine Ausweisung von Boden-

planungsgebieten ausreicht. Dies betrifft sowohl die Abgrenzung eines „Belastungsgebietes“ nach außen (zum „unbelasteten“ Bereich) als auch eine evtl. notwendige innere Gliederung des „belasteten“ Bereichs. Die vorliegende Datendichte entspricht etwa der Datendichte im Raum Goslar/Harz (SCHMOTZ, 2001), wo durch den Landkreis, als zuständige Bodenschutzbehörde, die Ausweisung eines Bodenplanungsgebietes erfolgt ist. Bei Spezialuntersuchungen (z. B. mobile Elementanteile) ist der in Freiberg vorliegende Kenntnisstand deutlich höher.

Eine Darstellung bzw. Interpretation der Ergebnisse im Maßstab 1:25 000 oder gar 1:5 000, bzw. die Zuweisung von Elementgehalten zu definierten Flurstücksgrenzen, ist mit dem vorliegenden Datenbestand nicht zulässig. Eine flächendeckende Bewertung der Schwermetallbelastung der Böden im Maßstab 1:5 000 würde eine Datendichte von ca. 400 Proben/km² erfordern, was einem Raster von 50 x 50 m entspräche. Eine derartige Verdichtung ist finanziell nicht vertretbar und auch nicht erforderlich.

Seitens des LfUG sind daher keine weiteren Erhebungen geplant. Ein Bedarf zur Fortführung der Untersuchungen besteht aus unserer Sicht nur im lokalen Rahmen, wo durch die regionalen Arbeiten Überschreitungen der Prüf- und Maßnahmenwerte angezeigt wurden. Hier sollte durch spezielle nutzungs- und schutzgutbezogene Untersuchungen (u. a. Kinderspielflächen, Wohngebiete, Flächen zur Erzeugung von Nahrungsmitteln) sukzessiv im Einzelfall der Datenbestand für das Verwaltungshandeln erweitert werden.

8 Literatur:

- AUERMAN, E.; JAKOBI, J. & KÜRTH, L. (1990): Schwermetalluntersuchungen des Bodens im Raum Freiberg. - unveröff. Ber., Bezirkshygieneinstitut Chemnitz.
- BEUGE, P. & ULIQUE, A. (1997): Stoffliche Belastung von Auenböden. - Abschlußber. FuE-Vorhaben LfUG, TU Bergakademie Freiberg.
- BROSIG, A. (1987): Geochemische Kartierung Blatt Tanneberg. – unveröff. Dipl.-Arb., Bergakademie Freiberg.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).
- FISCHER, J. (1991): Gutachten zur Bodenkontamination Gewerbegebiet Zug-Frauensteiner Straße. – unveröff. Ber., GLU GmbH Freiberg.
- GRÜN, M.; MACHELETT, B. & PODLESACK, W. (1990): Kontrolle der Schwermetallbelastung landwirtschaftlich genutzter Böden in der DDR. – VDI-Berichte, 837.
- GRÜN, M.; JAKOB, F.; KRONEMANN, H.; SCHNEIDER, J. & NOACK, M. (1991): Untersuchungen zum Schwermetalleintrag in die Nahrungskette im Landkreis Freiberg. – unveröff. Ber.; Institut für Pflanzenernährung und Ökotoxikologie, Jena.
- HERTWIG, T. (1999): Differenzierung geogener und anthropogener Stoffanteile in Bodenbelastungsgebieten. – unveröff. Ergebnisbericht, FuE-Vorhaben LfUG, beak consultants GmbH Freiberg.
- KLINGER, T. (1994): Mengen- und Spurenelemente in Waldböden über unterschiedlichen Grundgesteinen des Osterzgebirges. – unveröff. Diss., TU Dresden, Fak. f. Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften Tharandt.
- KLUGE, A.; HAUBRICH, F. & HUTTE, E. (1992): Schwermetallbelastungskarten des Kreises Freiberg. – unveröff. Bericht, TU Bergakademie Freiberg.
- KRETSCHMER, E. (1993): Toxikologisch-umweltmedizinische Bewertung von Bodenproben aus Kinderspielflächen in Kindertagesstätten. - unveröff. Ber., Gesundheitsamt Freiberg-Brand-Erbisdorf.
- KRONEMANN, H.; POHL, A. & WENDLER, F. (1993): Analyse der Schwermetallbelastung ausgewählter Kleingartenanlagen im Landkreis Freiberg. - Agrar- und Umweltanalytik GmbH Jena.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) (1994): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Rohstoffen - Technische Regeln. - Handbuch Bodenschutz 17. Lfg. XI/94, Nr. 9250, Berlin: E. Schmidt.
- METZNER, I. (1991): Zur Geochemie ausgewählter Bodenformen im Erzgebirge und Vogtland. – unveröff. Diss., Bergakademie Freiberg.
- PÄLCHEN, W. (1990): Zustandserhebung der Schwermetallbelastung von Böden im Raum Freiberg. – unveröff. Ber., GLU GmbH Freiberg.

- PRÜß, A. (1994): Einstufung mobiler Spurenelementgehalte in Böden. – Handbuch Bodenschutz; 15. Lfg. II/94, Nr. 3600, Schmidt: Berlin.
- RANK, G. (1990): Orientierende Untersuchungen zur Anwendung der Phytoremediation. - unveröff. Ber. GLU GmbH Freiberg.
- RANK, G.; KARDEL, K.; PÄLCHEN, W. & WEIDENSDÖRFER, H. (1999): Bodenatlas des Freistaates Sachsen, Teil 3 Bodenmessnetz Raster 4 km x 4 km. – Mat. z. Bodenschutz, LfUG Dresden.
- RANK, G.; KARDEL, K. & WEIDENSDÖRFER, H. (1999): Sachstandsbericht: Die Schwermetallgehalte der Böden des Freiburger Raumes für die Bewertung der Gefährdungspfade Boden-Mensch, Boden-Nutzpflanze nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. – unveröff. Ber., Sächs. Landesamt f. Umwelt u. Geologie, Dresden.
- RÖSLER, H. J.; BEUGE, P. & MÜLLER, E. (1964): Einfluss des Hüttenrauches von Freiberg und Halsbrücke auf die Spurenelementgehalte der Böden. - Bergakademie 21, H. 7, S. 386-397.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (1992): Untersuchung sächsischer Böden auf Belastungen mit Schwermetallen und organischen Rückständen. - unveröff. Bericht, LfL Leipzig.
- SCHERCHAN, O. (1980): Einfluß der Hüttenemission auf die Schwermetallbelastung der Böden. – unveröff. Diss. A., Bergakademie Freiberg.
- SCHMOTZ, W. (2001): Geplante Ausweisung eines Bodenbelastungsgebietes im Harz: - 2. Bodentage: Belastungen von Böden und Gewässer, Hannover 28./29.05.2001.
- TYLER, G. (1992): Critical Concentrations of Heavy Metals in the Mor Horizon of Swedish Forests. - SNV-Report 4078, Solna.
- 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. – Endber. FuE-Vorhaben des UBA (Proj.-Nr. 297 71 010), Bundesanstalt f. Geow. u. Rohstoffe, Hannover, 179 S.
- VOLAND, B.; SCHLENKER, U. & KLUGE, A. (1990): Geochemische Prospektion in anthropogen veränderten Landschaften. - Forsch.-Ber., TU Bergakademie Freiberg.

Tab. 1: Verwendete Datenbestände „Stoffliche Untersuchungen der Böden im Raum Freiberg“ (größere Projekte)

Lfd.-Nr.	1	2	3	4
Datenbestand/Projekt	Sondermessnetz Freiberg 1	Sondermessnetz Freiberg 2	Bodenuntersuchungen Raum Freiberg	Untersuchungen zur Schwermetallbelastung im Raum Freiberg
Autor/Institution	RANK et al., 1999, LfUG FG unveröff. Daten	RANK et al., 2001, LfUG FG unveröff. Daten	AUERMANN et. al., 1990 Hygieneinstitut Chemnitz (HIC)	RANK, 1990, GLU GmbH Freiberg
Zeitraum Datenerhebung	1998	2000	1990	1990
Untersuchungszweck	Verdichtung der Untersuchungskampagne der Lfd.-Nr. 3	Erweiterung des Untersuchungsgebietes in den Randbereichen der Belastungen, Verdichtungen im Zentrum	Umweltgeochemische Untersuchungen geogen und anthropogen beeinflusster Böden	Orientierende Untersuchungen zur Anwendung der Phytoremediation
Untersuchungsart	Raster 1 x 1 km, z. T. dichter	Randbereich Raster 1 x 1 km, 3 Teilgebiete 250 x 250m für methodische Untersuchungen	Raster 1 x 1 km (analog Lfd.-Nr 3 an 124 Standorten)	Punktproben
Probenahmepunkte Raum Freiberg	439	600	194	13
Probenzahl	954	1256	194	13
Art der Probenahme	horizontbezogen	horizontbezogen	nach Tiefenstufen, 0 bis 20 cm	nach Tiefenstufen 10 bis 30 cm
Beprobte Horizonte	Org. Auflage (Oh-Horiz.); mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“)	Org. Auflage (Oh-Horiz.); mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“)	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“)	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“)
Untersuchte Kornfraktion	<2 mm	<2 mm	Gesamtprobe zerkleinert, auf 2 mm abgeseibt	<2 mm
Elementspektrum	As, Cd, Cu, Pb, Sb, Tl, Zn As _{mob} , Cd _{mob} , Pb _{mob} , Tl _{mob} (Oberboden) As _{H2O} , Cd _{H2O} , Pb _{H2O} (Unterboden)	As, Cd, Cu, Pb, Sb, Tl, Zn As _{mob} , Cd _{mob} , Pb _{mob} , Tl _{mob} (Oberboden) As _{H2O} , Cd _{H2O} , Pb _{H2O} (Unterboden)	As, Cd, Pb, Zn	As, Cd, Cr, Cu, F, Ni, Pb, Sn, Zn As _{H2O} , Cd _{H2O} , Cr _{H2O} , Cu _{H2O} , Ni _{H2O} , Pb _{H2O} , Zn _{H2O}
Probenaufschluss, Analysenverfahren	Königswasser DIN 38414-S7, Tl HNO ₃ -Extr.; mob.-Gehalte: NH ₄ NO ₃ -Extr. DIN E 19730; H ₂ O-Gehalte DIN 38414 Teil 4, DEV S4; AAS	Königswasser DIN 38414-S7, Tl HNO ₃ -Extr.; mob.-Gehalte: NH ₄ NO ₃ -Extr. DIN E 19730; H ₂ O-Gehalte DIN 38414 Teil 4, DEV S4; AAS	HNO ₃ -Extraktion AAS	Totalgehalte, AAS, H ₂ O-Gehalte: Elution mit Wasser DIN 38414 Teil 4, DEV S4 AAS
Bewertung der Probenahme- und Analysenverfahren nach BBodSchV	Probenahme und Analytik entsprechen Anforderungen der BBodSchV	Probenahme und Analytik entsprechen Anforderungen der BBodSchV	Probenahme durch 20 Einstiche am Standort mit Bodenstecher, Sammelprobe, Analytik entspricht teilweise BBodSchV, Aufschluss gilt als „KW-äquivalent“	Cd nicht verwendbar, Umrechnung Totalgehalte Pb in Gesamtgehalte

Lfd.-Nr.	5	6	7	8
Datenbestand/Projekt	Mengen- u. Spurenelemente in Waldböden Osterzgebirge	Schwermetallbelastung ausgewählter Kleingartenanlagen Landkreis/Stadt Freiberg	Gutachten Gewerbegebiet Zug-Frauensteiner Straße	Geochemische Kartierung Blatt Tanneberg
Autor/Institution	KLINGER (Diss. Tharandt)	KRONEMANN et al., 1993, AUA GmbH Jena	FISCHER, 1991, GLU GmbH Freiberg	BROSIG 1987, Dipl.-Arb. BAF
Zeitraum Datenerhebung	1994	1992	1991	Pobehnahme 1986/Analytik 2001
Untersuchungszweck	Laterale SM-Verteilung in Bodenprofilen unter Forst (Schürfe)	Untersuchung SM-Transfer Boden-Pflanze	Untersuchung auf potentielle Bodenkontaminationen	Geochemische Prospektion in anthropogen veränderten Landschaften
Untersuchungsart	Punktproben	Mischprobe aus 10 bis 15 Einstichen/Gartenanlage	Punktproben	Punktproben
Probenahmepunkte	31	54	16	132
Probenzahl	177	54	21	264
Art der Probenahme	nach Tiefenstufen	nach Tiefenstufen 0 bis 20 cm	horizontbezogen	horizontbezogen
Beprobte Horizonte	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“), C-Horizonte	„Kulturboden“ („A-Horiz.“)	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“)	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“)
Untersuchte Kornfraktion	<2 mm	<2 mm	< 2 mm	<2 mm
Elementspektrum	As, Cd, Pb, Cu, Zn u. a.	As, Cd, Pb, Zn	As, Cd, Cu, Pb, Zn	As, Cd, Pb, TI
Probenaufschluss, Analysenverfahren	Totalgehalte	Königswasser DIN 38414-S7	Totalgehalte AAS	Königswasser DIN 38414-S7
Bewertung der Probenahme- und Analysenverfahren nach BBodSchV	Zuordnung der Proben zu Horizonten, Daten generell geeignet Umrechnung Pb-Totalgehalte in Gesamtgehalte	Probenahme und Analytik entsprechen Anforderungen der BBodSchV	Umrechnung Pb-Totalgehalte in Gesamtgehalte, Cd nicht verwendbar	Probenahme und Analytik entsprechen Anforderungen der BBodSchV

Lfd.-Nr.	9	10	11	12
Datenbestand/Projekt	FuE-Vorhaben Ref. 61 GC	FuE-Vorhaben Ref. 62	Bodenmessnetz Freistaat Sachsen	Untersuchung Auenböden Raum Freiberg
Autor/Institution	Fa. beak Consultants Freiberg	TU Justus Liebig Gießen	RANK et al., 1998, LfUG FG	PÄLCHEN, 1990, GLU GmbH Freiberg
Zeitraum Datenerhebung	1998	1997/1998	1993 bis 1997	1990
Untersuchungszweck	Unterscheidung geogener und anthropogener Stoffeinträge in Böden	Verlagerung/Rückhaltevermögen von Schwermetallen	Flächendeckende stoffliche Untersuchung	Untersuchung SM-Belastung Auenböden
Untersuchungsart	Bodenprofile	Bodenprofile	Raster 4 x 4 km	Catenen
Probenahmepunkte Raum Freiberg	7	40	39	43
Probenzahl	59	160	78	99
Art der Probenahme	horizontbezogen und nach Tiefenstufen	horizontbezogen	horizontbezogen	horizontbezogen
Beprobte Horizonte	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“), „C-Horiz.“	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“)	Org. Auflage (Oh-Horiz.); mineralischer Oberboden („A-Horiz.“) Unterboden („B-Horiz.“)	mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“), „C-Horiz.“
Untersuchte Kornfraktion	<2 mm und z. T. weitere Fraktionen	<2 mm	<2 mm	<2 mm
Elementspektrum	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, Tl, Zn As _{mob} , Cd _{mob} , Pb _{mob} , Tl _{mob}	As, Cd, Pb	As, Cd, Cr, Cu, F, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn As _{mob} , Cd _{mob} , Pb _{mob} (Oberboden)	As, Cd, Ni, Pb, Sb, Tl, Zn
Probenaufschluss, Analysenverfahren	Königswasser DIN 38414-S7, AAS mob-Gehalte: NH ₄ NO ₃ -Extr. DIN E 19730	Königswasser DIN 38414-S7 AAS	Totalgehalte; Hg Königswasser DIN 38414-S7 AAS mob-Gehalte: NH ₄ NO ₃ -Extr. DIN E 19730	Totalgehalte AAS
Bewertung der Probenahme- und Analysenverfahren nach BBodSchV	Probenahme und Analytik entsprechen Anforderungen der BBodSchV	Probenahme und Analytik entsprechen Anforderungen der BBodSchV	Umrechnung Pb-Totalgehalte in Gesamtgehalte	Umrechnung Totalgehalte in Gesamtgehalte

Lfd.-Nr.	13	14	15	16
Datenbestand/Projekt	Untersuchungen zum Schwermetalleintrag in die Nahrungskette im Landkreis Freiberg	Untersuchung landwirtschaftlich genutzter Böden	Bodenkundliche Landesaufnahme	Untersuchungen Gewerbegebiete, Baugebiete
Autor/Institution	GRÜN et al., 1991 Agrar- und Umweltanalytik GmbH Jena	Sächs. Landesanst. f. Landwirtschaft, LUFA Leipzig	LfUG Freiberg, Ref. 61 BK unveröff. Daten	Verschiedene Ing.-büros unveröff. Daten
Zeitraum Datenerhebung	1990-1991	1990-1992	1990 bis 1998	1990 bis 1998
Untersuchungszweck	Untersuchung der Schwermetallbelastung landw. genutzter Böden und Agrarprodukte	Untersuchung der Schwermetallbelastung landw. genutzter Böden	Stoffliche Charakterisierung von Leitprofilen	Stoffliche Charakterisierung von Baugebieten
Untersuchungsart	schlagbezogen, Mischprobe von 20 bis 30 Einstichen/Schlag	schlagbezogen, Mischprobe von 20 bis 40 Einstichen/Schlag	Bodenprofil	Bodenprofil
Probenahmepunkte Raum Freiberg	217	132	24	67
Probenzahl	619	132	146	134
Art der Probenahme	nach Tiefenstufen 0-20 cm	nach Tiefenstufen 0 bis 20 cm	horizontbezogen	tiefenstufenbezogen
Beprobte Horizonte	„Kulturboden,, („A-Horiz.,,)	„Kulturboden,, („A-Horiz.,,)	mineralischer Oberboden („A-Horiz.,,), Unterboden („B-Horiz.,,), „C-Horiz.,,	mineralischer Oberboden („A-Horiz.,,), Unterboden („B-Horiz.,,), „C-Horiz.,,
Untersuchte Kornfraktion	<2 mm	Gesamtprobe, größere Steine ausgelesen, gemahlen, auf <0,5 mm abgeseibt	<2 mm	<2 mm
Elementspektrum	Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, As z. T.	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	As, Ba, Cd, Cr, Cu, F, Hg, Mo, Ni, Pb, Sr, Zn z. T. wechselnd	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn z. T. wechselnd
Probenaufschluss, Analysenverfahren	1,5 N HNO ₃ , ICP-AES, FAAS Hg-H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ , Kaltdampf AAS	Königswasser DIN 38414 AAS	Totalgehalte, Hg Königswasserextraktion AAS	Königswasser
Bewertung der Probenahme- und Analysenverfahren nach BBodSchV	Probenahme, Analytik entspricht i. wesentlichen Vorgaben der BBodSchV Aufschluss gilt als „KW-äquivalent“	Bodenfraktion weicht von Anforderungen BBodSchV ab	außer Cd Daten generell geeignet, Umrechnung Pb-Totalgehalte in Gesamtgehalte	Daten generell geeignet, Zuordnung der Proben zu Horizonten

Lfd.-Nr.	17	18	19
Datenbestand/Projekt	Untersuchungen von Kinderspielplätze	Untersuchung Auenböden Sachsen	Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten, UG 20a Freiberg
Autor/Institution	KRETSCHMER, 1993	BEUGE & ULIQUE, 1998	Beak Freiberg, G.E.O.S. Freiberg (Probenahme)
Zeitraum Datenerhebung	1993	1994-1998	1997/1999
Untersuchungszweck	Gefährdungsabschätzung auf Kinderspielplätzen Raum Freiberg	Stoffliche Charakterisierung Auenböden	Ergänzende SM-Untersuchungen LfUG, G.E.O.S.
Untersuchungsart	Punktprobe	Catenen	Punktproben
Probenahmepunkte Raum Freiberg	30	5	119
Probenzahl	30	21	119
Art der Probenahme	tiefenstufenbezogen	horizontbezogen	tiefenstufenbezogen (0 bis 20 cm)
Beprobte Horizonte	mineralischer Oberboden	Mineralischer Oberboden („A-Horiz.“), Unterboden („B-Horiz.“), „C-Horiz.“	Mineralischer Oberboden („A-Horiz.“),
Untersuchte Kornfraktion	<2 mm	<2 mm	<2 mm
Elementspektrum	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn As _{mob} , Cd _{mob} , Pb _{mob}	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Tl, Zn As _{mob} , Cd _{mob} , Pb _{mob} , Tl _{mob}	As, Cd, Pb
Probenaufschluss, Analysenverfahren	Totalgehalte NH ₄ NO ₃ -Extr. DIN E 19730	Königswasser NH ₄ NO ₃ -Extr. DIN E 19730	Totalgehalte, Königswasser
Bewertung der Probenahme- und Analysenverfahren nach BBodSchV	Daten generell geeignet Umrechnung Pb-Totalgehalte in Gesamtgehalte	Probenahme, Analytik entspricht Vorgaben der BBodSchV	Verwendung der Originaldaten