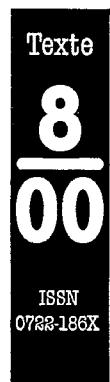


UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT
- Bodenschutz -

Forschungsbericht 295 73 005/16
UBA-FB 000004



Wirkungen ausgewählter Schadstoffe auf Bodenorganismen

von

**Dr. Peter Dreher
Dr. Kerstin Hund
Dr. Heinz Rüdel**

Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie,
Schmallenberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei
Vorauszahlung von DM 15,-- (7,67 Euro)
durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 5.1
Prof. Dr. Dr. Konstantin Terytze

Berlin, April 2000

Berichtskennblatt (deutsch)

Berichtsnummer 1 UBA-FB 000004	2.	3.
4. Titel des Berichts Wirkungen ausgewählter Schadstoffe auf Bodenorganismen		
5 Autor(en), Name(n), Vorname(n) Dreher, Peter; Hund, Kerstin, Rüdel, Heinz	8 Abschlußdatum September 1999	9. Veröffentlichungsdatum
6 Durchführende Institution (Name, Anschrift) Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie Auf dem Aberg 1 D-57392 Schmallenberg	10 UFOPLAN - Nr. 295 73 005/16	11 Seitenzahl 74
7 Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1 D-14193 Berlin	12 Literaturangaben 28	13 Tabellen und Diagramme 46
15. Zusätzliche Angaben	14 Abbildungen	
16. Kurzfassung Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand darin festzustellen, ob die im wesentlichen auf der Grundlage des Schutzes der menschlichen Gesundheit abgeleiteten Prüfwerte nach Bundes-Bodenschutzgesetz auch den Schutz der Lebensraumfunktion für Bodenorganismen mit einschließen. Um dies abzuklären, wurden mit ausgewählten Böden, deren Belastung im Bereich der Prüfwerte (Park- und Freizeitanlagen bzw. Ackerbau und Nutzgarten) eingestellt wurde, gezielte ökotoxikologische Tests durchgeführt. Die Untersuchungen wurden mit den Schadstoffen Arsen, Cadmium und Benzo(a)pyren durchgeführt. Die Bodenbelastung mit annähernd einer Kontaminante wurde erreicht, indem zwei unbelastete Böden unterschiedlicher Charakteristik mit stark belasteten Bodenproben vermischt wurden. Bei den stark belasteten Bodenproben handelte es sich um Altlastböden, die weitgehend eine Monobelastung des jeweiligen Schadstoffs aufwiesen. Die für die ökotoxikologischen Tests ausgewählten Testorganismen decken verschiedene trophische Ebenen ab: Mikroorganismen (originäre Population), Nitrifikation, Basalatmung, substratinduzierte Atmung; Nematoden (zugesetzte Organismen), Reproduktionsrate; Regenwurm (zugesetzte Organismen), Reproduktionsrate, Pflanzen, Keimrate, Biomasseproduktion. Für Cadmium und Arsen ergaben sich vergleichbare Ergebnisse von belasteten Böden und Kontrollböden für Pflanzen, Nematoden und Mikroorganismen, so daß mit den bisher abgeleiteten Prüfwerten auf dem Schutzniveau der Park- und Freizeitanlagen bzw. Ackerbau und Nutzgarten auch die Lebensraumfunktion ausreichend gesichert zu sein scheint. Bei leichten Böden könnte im Bereich der Prüfwerte eine Einschränkung der Lebensraumfunktion für Regenwürmer gegeben sein. Aufgrund des hohen Anteils an kontaminiertem Boden in den Mischungen mit Benzo(a)pyren ist eine nochmalige Überprüfung speziell im Hinblick auf Wirkungen auf die Mikroflora und <i>Eisenia fetida</i> wünschenswert.		
17 Schlagwörter Bodenschutz, Prüfwerte, Arsen, Cadmium, Benzo(a)pyren, Mikroorganismen, Nitrifikation, Basal-/substratinduzierte Atmung, Nematoden, Regenwurm, Reproduktion, Pflanzen, Keimhemmung, Biomasseproduktion		
18. Preis	19.	20.

Berichtskennblatt (englisch) / Report information sheet

1 Report No UBA-FB 000004	2.	3.
4 Report Title Effects of selected contaminants on soil organisms		
5 Author(s), Family Name(s), First Name(s) Dreher, Peter; Hund, Kerstin; Rüdel, Heinz		8. Report Date September 1999
		9. Publication Date
6 Performing Organisation (Name, Adress) Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie Auf dem Aberg 1 D-57392 Schmallenberg		10 UFOPLAN – Ref.No 295 73 005/16
		11 No of pages 74
7 Sponsoring Agency (Name, Adress) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1 D-14193 Berlin		12 No of References 28
		13. No of tables, Diagrams 46
		14 No of Figures
15. Supplementary Notes		
16 Abstract The objective of the research project was to achieve clarification on whether the trigger values according to the Federal Soil Protection Act, which originally had been established for the protection of human health, are also suitable to ensure the protection of ecological soil functions, e.g. habitat functions for soil organisms. For this purpose ecotoxicological tests were carried out with soils for which contaminations were adjusted to the trigger values (recreation areas or fields and kitchen garden). Investigations were conducted with arsenic, cadmium and benzo(a)pyren. The contamination of the soils with the contaminants was achieved by preparing samples containing mixtures of two uncontaminated soils of different characteristics with strongly contaminated soil samples. The contaminated soil samples were obtained from sites characterized by showing only one major contaminant. The test organisms selected for the ecotoxicological tests cover different trophic levels: microorganisms (original population), nitrification, basal respiration, substrate-induced respiration; nematodes (added organisms), reproduction rate; earthworms (added organisms), reproduction rate; plants, germ inhibition and biomass production. For cadmium and arsenic comparable test results for contaminated and control soils were obtained in the concentration range of the trigger values for recreation areas or fields and kitchen with repect to the experiments with plants, nematodes and microorganisms. In sandy soils the habitat function for earthworms may be affected. Due to the high portion of contaminated soil in the soil mixtures with benzo(a)pyren the interpretation of the test results is in some cases uncertain. A further check considering effects to the microflora and <i>Eisenia fetida</i> would be desirable.		
17 Keywords soil protection, trigger values, arsenic, cadmium, benzo(a)pyren, microorganisms, nitrification, basal respiration, substrate-induced respiration, nematodes, earthworms, reproduction, plants, germ inhibition, biomass production		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungen.....	7
2	Hintergrund und Einleitung	8
3	Zielsetzung	14
4	Vorgehensweise.....	14
5	Material und Methoden	17
5.1	Bodenauswahl und -charakterisierung	17
5.1.1	Identifizierung geeigneter Böden.....	17
5.1.2	Voruntersuchung der Böden (Screening).....	20
5.1.3	Charakterisierung der ausgewählten Testböden.....	20
5.1.4	Bodenlagerung und -vorbereitung.....	20
5.1.5	Bodenmischung	21
5.2	Analytische Methoden	23
5.2.1	Bestimmung der Wasserhaltekapazität von Böden	23
5.2.2	Bestimmung der Trockenmasse	24
5.2.3	Königswasserauszug (DIN ISO 11466).....	24
5.2.4	Ammoniumnitratlösungsextraktion (DIN 19730)	24
5.2.5	Bestimmung der Schwermetalle (DIN 38406/DEV E22).....	24
5.2.6	Bestimmung von Cadmium	25
5.2.7	Quecksilberbestimmung (EN1483/DEV E12).....	25
5.2.8	Bestimmung von Chlor-Pestiziden und polychlorierten Biphenylen (PCB).....	25
5.2.9	Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK)	26
5.2.10	Bestimmung von Mineralölkohlenwasserstoffen.....	26
5.2.11	Bestimmung der leicht freisetzbaren Cyanide.....	26
5.2.12	Bestimmung des Phenolindex nach Destillation	26
5.2.13	Bestimmung des Phosphorgehalts im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug	27
5.2.14	Bestimmung von Ammonium	27
5.2.15	Bestimmung von Nitrat und Nitrit	27
5.3	Biologische Untersuchungen	28
5.3.1	Pflanzentest	28
5.3.2	Nematotentest	28
5.3.3	Regenwurmreproduktionstest	29
5.3.4	Mikroorganismen.....	30
6	Ergebnisse	31
6.1	Ergebnisse der chemisch-analytischen Untersuchungen.....	31
6.1.1	Ergebnisse des Screenings	31
6.1.2	Charakterisierung der ausgewählten Böden	33
6.1.3	Überprüfung der eingestellten Bodengehalte	36
6.2	Ergebnisse der biologischen Untersuchungen	42
6.2.1	Schadstoff: Cadmium.....	43
6.2.2	Schadstoff: Arsen.....	52
6.2.3	Schadstoff: Benzo(a)pyren.....	60
7	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	70
8	Zusammenfassung	75
9	Literatur.....	77
10	Danksagung	78

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für die direkte orale und inhalative Aufnahme schwer bzw. nicht flüchtiger Schadstoffe auf Kinderspielflächen, in Wohngebieten, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegebieten (in mg/kg Trockenmasse, Königswasseraufschluß).	9
Tabelle 2:	Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für Böden für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität, angegeben als Ammoniumnitrat-Extrakt oder als Königswasser-Extrakt in mg/kg Trockenmasse.	10
Tabelle 3:	Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für den Schadstoffübergang Boden-Pflanze auf Ackerbauflächen im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Ammoniumnitrat-Extrakt	10
Tabelle 4:	Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundesbodenschutzgesetzes (in µg/l)	11
Tabelle 5:	Maßnahmenwert nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für Böden für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität, angegeben als Ammoniumnitrat-Extrakt oder als Königswasser-Extrakt in mg/kg Trockenmasse.	11
Tabelle 6:	Maßnahmenwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für den Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Arsen und Schwermetalle im Königswasser-Extrakt)	12
Tabelle 7:	Vorsorgewerte für Böden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes; hier: Vorsorgewerte für Metalle in Böden (in mg/kg Trockenmasse, Königswasseraufschluß).	12
Tabelle 8:	Vorsorgewerte für Böden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes; hier: Vorsorgewerte für organische Stoffe in Böden (in mg/kg Trockenmasse).	12
Tabelle 9:	Beurteilungswerte der Schadstoffe, die im Hinblick auf den Schutz der Lebensraumfunktion überprüft werden sollten.	15
Tabelle 10:	Testsysteme, Testparameter und Meßzeitpunkte, die im Rahmen des Projektes eingesetzt werden sollten.	16
Tabelle 11:	Charakterisierung der Böden "IUCT" und "Borstel". Repräsentative Daten für Bodenchargen aus dem Jahr 1998. Bestimmungen durch LUFA Speyer und Fraunhofer IUCT.	18
Tabelle 12:	Charakterisierung der belasteten Böden	19
Tabelle 13:	Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Cadmium-belasteten Böden, die in den biologischen Prüfungen eingesetzt wurden. Der Gehalt an Cadmium im Boden B2-Cd betrug 1750 mg/kg. Die Gehalte beziehen sich auf den Königswasserauszug (bis auf AN). Die aktuelle Feuchte der Böden bei der Mischung ist in % TM angegeben.	22
Tabelle 14:	Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Arsen-belasteten Böden, die in den biologischen Prüfungen eingesetzt wurden. Der Gehalt an Arsen im Boden B8-As betrug 20400 mg/kg. Alle Gehalte beziehen sich auf den Königswasserauszug. Die aktuelle Feuchte der Böden bei der Mischung ist in % TM angegeben.	22
Tabelle 15:	Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Benzo(a)pyren-belasteten Böden, die in den biologischen Prüfungen eingesetzt wurden. Der Gehalt an Benzo(a)pyren im Boden B3-PAK betrug 44 mg/kg. Alle Gehalte beziehen sich auf den Gehalt im Toluolextrakt. Die aktuelle Feuchte der Böden bei der Mischung ist in % TM angegeben.	23
Tabelle 16:	Ergebnisse der Voruntersuchungen (Screening): Haupt- und Nebenkontaminanten.	32
Tabelle 17:	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen: Haupt- und Nebenkontaminanten.	33
Tabelle 18:	Ergebnisse der PAK-Untersuchungen: Gehalte der 16 PAK nach EPA.	34

Tabelle 19: Ergebnisse der PAK-Untersuchungen: Gehalte der 16 PAK nach EPA, berechnet als toxische Equivalente (TE-Werte nach Entwurf BBodSchV, 1998; im endgültigen Entwurf der BBodSchV nicht mehr vorgesehen).	35
Tabelle 20: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen: Nährstoffgehalte.	35
Tabelle 22: Untersuchungsergebnisse der Arsen-Mischböden (analytische Überprüfung der Nominalgehalte). (Basis: Trockenmasse; Pseudo-Gesamtgehalte im Königswasserauszug).	36
Tabelle 22: Untersuchungsergebnisse der Cadmium-Mischböden (analytische Überprüfung der Nominalgehalte). (Basis: Trockenmasse; Pseudo-Gesamtgehalte im Königswasserauszug; AN: Extrakt mit Ammoniumnitratlösung).	37
Tabelle 24: Untersuchungsergebnisse der PAK-Mischböden (analytische Überprüfung der Nominalgehalte). (Basis: Trockenmasse; Pseudo-Gesamtgehalte im Königswasserauszug).	37
Tabelle 24: Gehalte an Nebenkontaminanten in den Mischböden im Vergleich zu Vorsorge- und Prüfwerten (Cadmium-Boden und berechnete Gehalte in den Mischungen). Fett: Werte oberhalb der Vorsorge- bzw. Prüfwerte.	39
Tabelle 25: Gehalte an Nebenkontaminanten in den Mischböden im Vergleich zu Vorsorge- und Prüfwerten (Benzo(a)pyren-Boden und berechnete Gehalte in den Mischungen). Fett: Werte oberhalb der Vorsorge- bzw. Prüfwerte.	40
Tabelle 26: Gehalte an Nebenkontaminanten in den Mischböden im Vergleich zu Vorsorge- und Prüfwerten (Arsen-Boden und berechnete Gehalte in den Mischungen). Fett: Werte oberhalb der Vorsorge- bzw. Prüfwerte.	41
Tabelle 27: Pflanzentest mit <i>Avena sativa</i> ; Schadstoff: Cadmium; Borstel-Boden.	44
Tabelle 28: Pflanzentest mit <i>Brassica rapa</i> ; Schadstoff: Cadmium; Borstel-Boden.	45
Tabelle 29: Pflanzentest mit <i>Avena sativa</i> ; Schadstoff: Cadmium; IUCT-Boden.	46
Tabelle 30: Pflanzentest mit <i>Brassica rapa</i> ; Schadstoff: Cadmium; IUCT-Boden.	47
Tabelle 31: Wirkung auf Mikroorganismen, Regenwürmer und Nematoden; Schadstoff: Cadmium.	49
Tabelle 32: Wirkung auf Mikroorganismen; Schadstoff: Cadmium; Inkubationsdauer der Bodenmischung bis zum Testansatz 56 Tage.	50
Tabelle 33: Pflanzentest mit <i>Avena sativa</i> ; Schadstoff: Arsen; Borstel-Boden.	53
Tabelle 34: Pflanzentest mit <i>Brassica rapa</i> ; Schadstoff: Arsen; Borstel-Boden.	54
Tabelle 35: Pflanzentest mit <i>Avena sativa</i> ; Schadstoff: Arsen; IUCT-Boden.	55
Tabelle 36: Pflanzentest mit <i>Brassica rapa</i> ; Schadstoff: Arsen; IUCT-Boden.	56
Tabelle 37: Wirkung auf Mikroorganismen, Regenwürmer und Nematoden; Schadstoff: Arsen	57
Tabelle 38: Wirkung auf Mikroorganismen; Schadstoff: Arsen, Inkubationsdauer der Bodenmischung bis zum Testansatz 56 Tage.	58
Tabelle 39: Pflanzentest mit <i>Avena sativa</i> ; Schadstoff: Benzo(a)pyren; Borstel-Boden.	61
Tabelle 40: Pflanzentest mit <i>Brassica rapa</i> ; Schadstoff: Benzo(a)pyren; Borstel-Boden.	62
Tabelle 41: Pflanzentest mit <i>Avena sativa</i> ; Schadstoff: Benzo(a)pyren; IUCT-Boden.	63
Tabelle 42: Pflanzentest mit <i>Brassica rapa</i> ; Schadstoff: Benzo(a)pyren; IUCT-Boden.	64
Tabelle 43: Wirkung auf Mikroorganismen, Regenwürmer und Nematoden; Schadstoff: Benzo(a)pyren.	65
Tabelle 44: Wirkung auf Mikroorganismen; Schadstoff: Benzo(a)pyren; Inkubationsdauer der Bodenmischung bis zum Testansatz 56 Tage.	66
Tabelle 45: Gegenüberstellung von gemessener und rechnerisch ermittelter (worst case) substratinduzierter mikrobieller Atmungsaktivität; Schadstoff: Benzo(a)pyren.	68
Tabelle 46: Qualitative Darstellung der Wirkung in den angewandten Testsystemen im Bereich der Prüfwerte.	74

1 Abkürzungen

AN	Ammoniumnitrat
BaP	Benzo(a)pyren
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BG	Bestimmungsgrenze
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung im Rahmen des BBodSchG
CKW	chlorierte Kohlenwasserstoffe
DDT	4,4'-Dichlordiphenyltrichlorethan
EC50	Konzentration, bei der 50 % der Versuchsorganismen einen bestimmten Effekt zeigen; Angabe als Konzentration (z.B. in mg/L)
EPA	Environmental Protection Agency (Umweltbehörde der USA)
HCB	Hexachlorbenzol
HCH	Hexachlorcyclohexan
ICP-OES	optisches Emissionsspektrometer mit Anregung durch ein induktiv gekoppeltes Plasma (inductively coupled plasma - optical emission spectrometer)
KW	Königswasser
LABO	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LC50	letale Konzentration für 50 % der Versuchsorganismen; Angabe als Konzentration (z.B. in mg/kg)
LOEC	niedrigste experimentell bestimmte Konzentration, bei der noch Wirkungen einer Substanz beobachtet wurde (lowest observed effect concentration)
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
NOEC	experimentell bestimmte Konzentration, bei der keine Wirkung einer Substanz beobachtet wurde (no observed effect concentration)
PAK	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	polychlorierte Biphenyle
TE	toxische Equivalente
TM	Trockenmasse
WHKmax	maximale Wasserhaltekapazität

2 Hintergrund und Einleitung

Zweck des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG) vom 17. März 1998 ist es, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern und wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen.

In § 8 "Werte und Anforderungen" wird ausgeführt: *"Die Bundesregierung wird ermächtigt, durch Rechtsverordnung Vorschriften zu erlassen."* Hierbei sind insbesondere festzulegen:

Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt (Prüfwerte),

sowie

Werte für Einwirkungen oder Belastungen, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind (Maßnahmenwerte).

In Tabelle 1 bis Tabelle 6 sind die in der Bodenschutzverordnung (BBodSchV) festgelegten Prüf- und Maßnahmenwerte (Anhang 2 der Verordnung) mit Ausnahme der Werte für Dioxine und Furane für unterschiedliche Nutzungen aufgeführt.

Tabelle 1: Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für die direkte orale und inhalative Aufnahme schwer bzw. nicht flüchtiger Schadstoffe auf Kinderspielflächen, in Wohngebieten, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegebieten (in mg/kg Trockenmasse, Königswasseraufschluß).

Prüfwerte [mg/kg TM]				
Stoff	Kinderspiel- flächen	Wohn- Gebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbegebiete
Arsen	25	50	125	140
Blei	200	400	1000	2000
Cadmium	10 *)	20	50	60
Cyanide	50	50	50	100
Chrom	200	400	1000	1000
Nickel	70	140	350	900
Quecksilber	10	20	50	80
Aldrin	2	4	10	-
Benzo(a)pyren	2	4	10	12
DDT	40	80	200	-
Hexachlorbenzol	4	8	20	200
Hexachlorcyclohexan (HCH-Gemisch oder β - HCH)	5	10	25	400
Pentachlorphenol	50	100	250	250
Polychlorierte Biphenyle (Summe von 6 PCBs)	0,4	0,8	2	40

TM, Trockenmasse

*) In Haus- und Kleingärten, die sowohl als Aufenthaltsbereiche für Kinder als auch für den Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden, ist für Cadmium der Wert von 2,0 mg/kg TM als Prüfwert anzuwenden.

Tabelle 2: Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für Böden für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität, angegeben als Ammoniumnitrat-Extrakt oder als Königswasser-Extrakt in mg/kg Trockenmasse.

Stoff	Methode	Prüfwert [mg/kg TM]
Arsen	Königswasseraufschluß	200 *)
Cadmium	Ammoniumnitratextrakt	---
Blei	Ammoniumnitratextrakt	0,1
Quecksilber	Königswasseraufschluß	5
Thallium	Ammoniumnitratextrakt	0,1
Benzo(a)pyren	---	1

TM, Trockenmasse; *) bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg TM.

Tabelle 3: Prüfwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für den Schadstoffübergang Boden-Pflanze auf Ackerbauflächen im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Ammoniumnitrat-Extrakt

Stoff	Ackerbau
	Prüfwert [mg/kg]
Arsen	0,4
Kupfer	1
Nickel	1,5
Zink	2

Tabelle 4: Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundesbodenschutzgesetzes (in µg/l)

Anorganische Stoffe	Prüfwert [µg/l]
Antimon	10
Arsen	10
Blei	25
Cadmium	5
Chrom, gesamt	50
Chromat	8
Kobalt	50
Kupfer	50
Molybdän	50
Nickel	50
Quecksilber	1
Selen	10
Zink	500
Zinn	40
Cyanid, gesamt	50
Cyanid, leicht freisetzbar	10
Fluorid	750
Organische Stoffe	
Mineralölkohlenwasserstoffe	200
BTEX	20
Benzol	1
LHKW	10
Aldrin	0,1
DDT	0,1
Phenole	20
PCB, gesamt	0,05
PAK, gesamt	0,20
Naphthalin	2

Tabelle 5: Maßnahmenwert nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für Böden für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität, angegeben als Ammoniumnitrat-Extrakt oder als Königswasser-Extrakt in mg/kg Trockenmasse.

Stoff	Methode	Maßnahmenwert [mg/kg]
Cadmium	Ammoniumnitrat-Extrakt	0,04 / 0,1 *)

*) auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cadmium-anreicherender Gemüsearten gilt als Maßnahmenwert 0,04 mg/kg Trockenmasse; ansonsten gilt als Maßnahmenwert 0,1 mg/kg Trockenmasse

Tabelle 6: Maßnahmenwerte nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 2 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für den Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Arsen und Schwermetalle im Königswasser-Extrakt)

Stoff	Maßnahmenwert [mg/kg]
Arsen	50
Blei	1200
Cadmium	20
Kupfer	1300 *)
Nickel	1900
Quecksilber	2
Thallium	15
Polychlorierte Biphenyle (Summe von 6 PCBs)	0,2

*) Bei Grünlandnutzung durch Schafe gilt als Maßnahmenwert 200 mg/kg Trockenmasse

Prüfwerte sind deutlich von Vorsorgewerten zu unterscheiden. Vorsorgewerte sind Bodenwerte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten in der Regel davon auszugehen ist, daß die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht. Im Zusammenhang mit Anforderungen der Vorsorge können auch Werte über die maximal zulässige Zusatzbelastung des Bodens festgelegt werden (vorliegende Werte siehe Tabelle 7 und Tabelle 8).

Tabelle 7: Vorsorgewerte für Böden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes; hier: Vorsorgewerte für Metalle in Böden (in mg/kg Trockenmasse, Königswasseraufschluß).

Böden	Cadmium	Blei	Chrom	Kupfer	Quecksilber	Nickel	Zink
Bodenart Ton	1,5	100	100	60	1	70	200
Bodenart Lehm	1	70	60	40	0,5	50	150
Bodenart Sand	0,4	40	30	20	0,1	15	60
Festgesteins-Böden mit naturbedingt hohen Hintergrundgehalten	unbedenklich, soweit keine Freisetzung oder zusätzliche Einträge der Schadstoffe erfolgen.						

Tabelle 8: Vorsorgewerte für Böden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes; hier: Vorsorgewerte für organische Stoffe in Böden (in mg/kg Trockenmasse).

Böden	Polychlorierte Biphenyle (6 PCB)	Benzo(a)pyren	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (16 EPA-PAK)
Humusgehalt > 8 %	0,1	1	10
Humusgehalt ≤ 8 %	0,05	0,3	3

Die Handlungsschwelle, die durch Vorsorgewerte gekennzeichnet werden soll, ist die Besorgnis des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung. Die Besorgnis ist nach den Maßstäben des Bundes-Bodenschutzgesetzes dann gegeben, wenn wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkungen (der Nutzung oder Maßnahme) nachteilige Auswirkungen auf die Bodenfunktionen zu erwarten sind. Es müssen hierzu tatsächliche Anhaltspunkte der Besorgnis gegeben sein, wie z.B. aus Ergebnissen von Bodenuntersuchungen. Bei Stoffen, deren bodengefährdendes Potential unbestritten ist und auch nicht maßgeblich durch standortspezifische Gegebenheiten abgemildert wird, ist bereits die Betrachtung des Stoffpotentials (z.B. hinsichtlich Toxizität, Zerstörung des Bodengefüges) ausschlaggebend.

Die Gefahrenabwehr erfolgt nach den Maßstäben des Bundes-Bodenschutzgesetzes nutzungs- und schutzgutbezogen, was zur entsprechenden Differenzierung der Werte hinsichtlich bestimmter Nutzungen, z.B. Wohngebiete, Acker und Grünlandflächen, führt. Dagegen ist bei den Vorsorgewerten ein derartiger Nutzungsbezug nicht vorgesehen, da mit ihnen die vielfältige Nutzbarkeit der Böden sichergestellt werden soll. Dies schließt eine Bezugnahme auf abgegrenzte Nutzungen aus. Vorsorgewerte werden nach natürlichen Bodeneigenschaften (Sand, Lehm/Schluff, Ton), nicht jedoch nach Nutzungen im oben genannten engen Sinne differenziert.

3 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Untersuchung der Frage, ob die im wesentlichen auf der Grundlage des Schutzes der menschlichen Gesundheit abgeleiteten Prüfwerte auch den Schutz der Lebensraumfunktion für Bodenorganismen mit einschließen. Um dies abzuklären sollten mit ausgewählten Böden, deren Belastung im Bereich relevanter Prüfwerte (Park- und Freizeitanlagen bzw. Ackerbau und Nutzgarten) einzustellen war, geeignete ökotoxikologische Tests durchgeführt werden. Als Kontaminanten wurden Arsen, Cadmium und Benzo(a)pyren eingesetzt.

4 Vorgehensweise

Für die Überprüfung, ob die zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgelegten Prüfwerte für die Schadstoffe Arsen, Cadmium und Benzo(a)pyren gleichzeitig ausreichen, auch die Lebensraumfunktion von Boden in ausreichender Weise zu schützen, wurde wie folgt vorgegangen:

Gehalte im Bereich der Prüfwerte wurden in Böden eingestellt, indem in die zu untersuchenden Böden möglichst geringe Mengen kontaminiert Böden eingearbeitet werden. Die kontaminierten Böden sollten möglichst eine Monobelastung aufweisen.

Geeignete, möglichst monobelastete Böden, sollten durch telefonische Recherchen bei Behörden, Entsorgungs- und Sanierungsunternehmen identifiziert werden. Falls keine Analysen zu den potentiell geeigneten Böden vorlägen, sollte für ca. 5 - 10 Böden eine umfassende analytische Charakterisierung auf Schwermetallgehalte im Königswasserauszug, Gehalte an PCB, PAK, HCH, DDT und anderen Chlor-Pestiziden und MKW durchgeführt werden. Auf Basis dieser Daten sollte je ein Boden mit einer (weitgehenden) Monobelastung mit Arsen, Cadmium bzw. Benzo(a)pyren ausgewählt werden.

Von den als geeignet erscheinenden Böden sollte eine für die biologischen Untersuchungen ausreichende Menge homogenisiert, gesiebt und einer weiteren analytischen Charakterisierung unterzogen werden, um sowohl Haupt- als auch Nebenkontaminanten zu bestimmen.

Auf Basis der Analysenergebnisse sollten die belasteten Böden zur Einstellung von Gehalten im Bereich der Prüfwerte im geeigneten Verhältnis mit unbelasteten Böden vermischt werden. Als unbelastete Böden sollten z.B. ein sandiger sowie ein lehmiger Boden eingesetzt werden. Im Gegensatz zur direkten Dotierung eines unbelasteten Bodens mit Schadstoffen sollte so eine möglichst realitätsnahe Kontamination erreicht werden (gealtertes Material).

Sollten die Untersuchungsergebnisse der schadstoffhaltigen Mischböden und der entsprechenden Kontrollböden vergleichbare Testergebnisse zeigen, so kann davon ausgegangen werden, daß die Lebensraumfunktion im Bereich der festgelegten Prüfwerte ebenfalls geschützt ist.

Da die zu untersuchenden Stoffe persistent (Arsen, Cadmium) bzw. relativ persistent (Benzo(a)pyren) sind, erschien es möglich, die Untersuchungen durchzuführen, ohne daß ein relevanter Abbau zu erwarten ist.

Bei den Untersuchungen sollten die in Tabelle 9 aufgeführten Prüfwerte der Schadstoffe eingestellt werden. Außerdem sollte jeweils ein deutlich höherer Gehalt eingesetzt werden, bei dem dann vermutlich Effekte zu beobachten sein würden (Positivkontrolle).

Tabelle 9: Beurteilungswerte der Schadstoffe, die im Hinblick auf den Schutz der Lebensraumfunktion überprüft werden sollten.

Schadstoff	Nutzung	Beurteilungswert	
Cadmium	Park- und Freizeitanlagen	Prüfwert für die direkte Aufnahme von Schadstoffen	50 mg/kg TM (Königswasserauszug)
Cadmium	Ackerbau, Nutzgarten	Maßnahmenwert für den Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität	40 µg/kg (Ammoniumnitrat-lösungsextrakt)
Arsen	Wohngebiete	Prüfwert für die direkte Aufnahme von Schadstoffen	50 mg/kg TM (Königswasserauszug)
Arsen	Ackerbau, Nutzgarten	Prüfwert für den Schadstoff-übergang Boden-Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität	200 mg/kg TM (Königswasserauszug)
Benzo(a)pyren	Park- und Freizeitanlagen	Prüfwert für die direkte Aufnahme von Schadstoffen	10 mg/kg TM

TM, Trockenmasse.

Der Auswahl der Testorganismen lagen folgende Überlegungen zugrunde:

- Abdeckung verschiedener trophischer Ebenen
- Testung in verschiedenen Böden erprobt (keine Beschränkung auf Substrate im Rahmen der Chemikalienprüfung)
- breite Akzeptanz der Organismenauswahl
- bevorzugte Anwendung von genormten Verfahren (genormte Verfahren für Chemikalienprüfungen vorliegend, für Bodentestung in Bearbeitung)
- Bevorzugung von Testverfahren mit eingesetzten Bodenorganismen, da die verschiedenen Schadstoffgehalte im Boden durch die Mischung von hoch belasteten Altlastenböden mit unbelasteten Böden eingestellt wurden (Ausnahme: Mikroorganismen).

Genormte Verfahren liegen für die Mikroorganismen (Atmung ISO 14240-1; Dehydrogenase, DIN 19733-1, -2, BBA VI 1-1, Stickstoffmineralsierung: DIN ISO 14238, BBA VI 1-1), Regenwürmer (Akut- und Reprotoxtest; ISO 11268-1 bzw. -2) und den Pflanzentest (ISO 11269-2) vor. Ein Verfahren speziell zur Nitrifikation, basierend auf der Methodik von Berg und Rosswall (1985), befindet sich derzeit in der Normung.

Im Hinblick auf das Nahrungsnetz im Boden sollte jedoch mindestens noch eine Organismen- gruppe, die zwischen Mikroorganismen und Regenwürmern steht, in die Untersuchung mit ein- bezogen werden. Gewählt wurden im Rahmen dieses Vorhabens die Nematoden, für die ein Bodentest entwickelt wurde, der zur Zeit auch im Rahmen eines von der Deutschen Bundes- stiftung Umwelt geförderten Vorhabens in einem Laborvergleichstest validiert wird.

In Tabelle 10 sind die Testsysteme, Testparameter und Meßzeitpunkte aufgeführt, die zur Vali- dierung der Prüfwerte angewandt werden sollten.

Tabelle 10: Testsysteme, Testparameter und Meßzeitpunkte, die im Rahmen des Projektes eingesetzt werden sollten.

Organismus	Untersuchungsparameter	Untersuchungspunkte *)
Mikroorganismen	originäre Population: Nitrifikation, Basalatmung, substratinduzierte Atmung	0 + 8 Wochen
Nematoden	zugesetzte Organismen: Reproduktion	0 Wochen Organismenzusatz, nach 1 Woche Bestimmung der Reproduktionsrate
Regenwurm	zugesetzte Organismen: Reproduktion	0 Wochen Organismenzusatz, nach 8 Wochen Erfassung der Reproduktionsrate
Pflanzen	Keimung und Biomasseproduktion	0 Wochen Pflanzenzusatz, 2 Wochen, nachdem 50 % Keimrate erzielt wurde, Bestimmung der Biomasse- bildung

*) Zeit 0 = Versuchsstart.

5 Material und Methoden

5.1 Bodenauswahl und -charakterisierung

5.1.1 Identifizierung geeigneter Böden

Zunächst wurden zahlreiche Stellen (Landes- und kommunale Umweltämter, Landesentwicklungsgesellschaften, Entsorgungs- und Sanierungsunternehmen) telefonisch und/oder schriftlich kontaktiert, um eine Übersicht über geeignete Altlasten zu gewinnen. Aufgrund der von diesen Stellen erhaltenen Informationen, wurden ca. 10 Böden für Voruntersuchungen (Screening) ausgewählt, um ihre potentielle Eignung zu überprüfen.

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Mischungen kontaminiert und belasteter Böden mit definierten Gehalten der jeweiligen Schadstoffe wurden Böden ausgewählt, die möglichst nur Hintergrund-belastet sind. Als Testböden für die biologischen Untersuchungen wurden zwei Böden ausgewählt, die auch schon in anderen Projekten des Fraunhofer IUCT eingesetzt wurden, so daß ihre grundsätzliche Eignung gewährleistet war.

5.1.1.1 Unbelastete Böden

Bei den unbelasteten Böden (Kontrollböden) handelt es sich zum Einen um einen leichten Sandboden aus Borstel (Niedersachsen, bei Neustadt am Rübenberg). Außerdem wurde Boden vom Institutsgelände des Fraunhofer IUCT in Schmallenberg-Grafschaft verwendet. Hierbei handelt es sich um einen lehmigen Boden. Die Daten zur Bodencharakterisierung sind in Tabelle 11 zusammengefaßt.

Tabelle 11: Charakterisierung der Böden "IUCT" und "Borstel". Repräsentative Daten für Boden-charge aus dem Jahr 1998. Bestimmungen durch LUFA Speyer und Fraunhofer IUCT.

Parameter	Borstel-Boden (schwach schluffiger Sand)	IUCT-Boden (mittel sandiger Lehm)
Korngrößenverteilung (in %)		
Sand (63 µm – 2 mm)	75	41
Schluff (2 µm – 63 µm)	20	37
Ton (< 2 µm)	5	22
Organischer C-Gehalt (in %)	1,0	1,6
Humus (1,724 * C org.; in %)	1,7	2,7
Stickstoff (% N)	0,07	0,18
Verhältnis C / N	14	9
pH H ₂ O	6,0	7,4
pH CaCl ₂	5,0	6,8
Maximale Wasserhaltekapazität (in ml H ₂ O pro kg Trockenmasse)	237 ± 12*	540 ± 8*

* Mittelwert ± Standardabweichung der hier eingesetzten Bodencharge (n = 4).

Die Probennahme erfolgte für den Borstel-Boden im Oktober 1998 durch Mitarbeiter des Fraunhofer- IUCT. Es handelt sich bei der Beprobungsfläche um eine landwirtschaftliche Fläche (Acker). Beprobt wurde der Pflughorizont bis zu einer Tiefe von 20 – 30 cm. Der Boden wurde dann auf dem Institutsgelände des Fraunhofer IUCT in Schmallenberg-Grafschaft im Freiland abgedeckt gelagert.

5.1.1.2 Belastete Böden

Die Charakterisierung der zunächst in die Untersuchungen einbezogenen belasteten Böden ist aus Tabelle 12 ersichtlich.

Tabelle 12: Charakterisierung der belasteten Böden

Boden- bezeichnung	Probenahme	Kontaminanten	Art der Altlast	Lagerung
As-Altlast: B1-As	Fraunhofer IUCT, am 8.9.98	neben As auch Pb, Hg, Th und Dioxine	ehem. Industriegelände, 1929 eingeebnet, heute Wohngebiet, damals chemische Produktions- stätte für Dünger, Soda, Schwefel- und Salzsäure, Pyritrösterei ebenfalls auf Gelände; Bodenmate- rial wurde Containern entnommen; das Material ist repräsentativ für das ganze Gelände	auf 1 cm gesiebt im Kühlcontainer bei ca. 4°C (ca. 60 kg)
Cd-Altlast: B2-Cd	extern, Lieferung am 29.9.98	200 - 4000 mg/kg Cd, sonst keine Daten	Auensediment im Abstrombereich eines Leucht- stoffwerkes	im Kühlcontainer bei ca. 4°C, unbehandelt
PAK-Altlast: B3-PAK	Fraunhofer IUCT, am 1.10.98	10 - 1000 ppm PAK, sonst keine Daten	Kokereigelände	Lagerung: im Kühlcon- tainer bei ca. 4°C, un- behandelt
PAK-Altlast: B4-PAK	Fraunhofer IUCT, 40. Kalenderwoche 1998	PAK in unbekanntem Gehalt, sonst keine Daten	Schießplatz	im Kühlcontainer bei ca. 4°C, unbehandelt
PAK-Altlast: B5-PAK	extern, 41. Kalenderwoche 1998	PAK zwischen 800 und 3200 mg/kg, As, Hg, Zn in geringem Gehalt, sonst keine Daten	Gaswerk	im Kühlcontainer bei ca. 4°C, unbehandelt
As-Altlast: B6-As	extern, 41. Kalenderwoche 1998	As zwischen 200 und 2000 mg/kg, relativ hohe Gehalte an Pb und Zn, sonst keine Daten	Industriebrache, ehemals Papierwerk	im Kühlcontainer bei ca. 4°C, unbehandelt
As-Altlast: B7-As1 bzw. B7-As2	Fraunhofer IUCT, 42. Kalenderwoche 1998; zwei Proben	As bis max. 20.000 mg, sonst keine Daten	Farb- und Gaswerk	im Kühlcontainer bei ca. 4°C, unbehandelt
As-Altlast: B8-As	extern, 50. Kalender- woche 1998	hohe As-Belastung, keine Daten	Fuchsins-Fabrik	im Kühlcontainer bei ca. 4°C, unbehandelt

5.1.2 Voruntersuchung der Böden (Screening)

Die acht potentiell geeigneten Böden wurden dann einem Screening auf folgende Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen unterzogen:

- Schwermetalle im Königswasserauszug (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg),
- PAK gesamt, Benzo(a)pyren,
- PCB,
- Chlorpestizide (HCB, HCH, DDT und Abbauprodukte),
- Mineralölkohlenwasserstoffe.

Für das Screening wurden Teilproben verwendet, die von den angesprochenen Stellen zur Verfügung gestellt wurden. In einigen Fällen wurden auch eigene Beprobungen durchgeführt.

5.1.3 Charakterisierung der ausgewählten Testböden

Die hinsichtlich einer (weitgehenden) Mono-Belastung mit Arsen, Cadmium bzw. Benzo(a)pyren ausgewählten Böden wurden analytisch charakterisiert. Hierzu wurde zunächst eine für die Untersuchung ausreichende Probenmenge angefordert bzw. vor Ort genommen. Das Material wurde homogenisiert und auf ≤ 4 mm abgesiebt. Aufgrund der zum Teil sehr bindigen Struktur der Böden war diese Maschenweite aus pragmatischen Gründen gewählt worden. Signifikante Unterschiede zu ≤ 2 mm gesiebten Proben konnten nicht festgestellt werden.

Durch die Untersuchung der homogenisierten Charge sollten die genauen Gehalte der Schadstoffe als Grundlage für die Berechnung der Mischungsverhältnisse bestimmt werden. Außerdem sollte sichergestellt werden, daß der zu untersuchende Kontaminant tatsächlich die Hauptbelastung des jeweiligen Bodens darstellt. Allerdings ließ sich nicht vermeiden, daß weitere Kontaminanten ebenfalls in den belasteten Boden vorlagen (Mischkontamination).

Für die Kontrollböden wurden jeweils ca. 200 - 250 kg benötigt. Von den belasteten Böden wurden insgesamt jeweils ca. 3 - 15 kg benötigt (je nach Kontaminationshöhe und daraus abzuleitendem Mischungsverhältnis).

5.1.4 Bodenlagerung und -vorbereitung

Die unbelasteten Böden wurden ca. 2 Monate vor Versuchsbeginn der biologischen Prüfungen aus dem Freiland entnommen. Der Boden „Borstel“ war zuvor abgedeckt auf dem Institutsgelände gelagert worden. Die eigentliche Probennahme in Borstel war im Oktober 1998 erfolgt.

Die Altlast-Böden wurden im Kühlcontainer bei 4°C gelagert. Die feldfrische Bodenfeuchte wurde zunächst nicht verändert. Ein Austrocknen des Bodens war zu verhindern, da dadurch die biologische Aktivität verändert worden wäre.

Alle Böden wurden vor dem Einsatz in den Prüfungen gesiebt (≤ 4 mm; Begründung für die Korngröße s. 5.1.3). Die für die Prüfungen notwendige Bodenfeuchte wurde kurz vor Versuchsbeginn eingestellt. Vor Beginn der Prüfungen wurden die Böden dann einige Tage bei Raumtemperatur gehalten, um eine Adaption der biologischen Aktivität an die Temperatur im Test zu ermöglichen.

5.1.5 Bodenmischung

Die gemäß Prüfwert und die mehrfach darüber belasteten Böden wurden durch Zumischen von belastetem Bodenmaterial zu den ausgewählten, unbelasteten Böden hergestellt, die auch als Kontrollböden dienten. Als Zumischmaterial wurden Böden verwendet, die möglichst einseitig mit PAK/Benzo(a)pyren, Cd oder As belastet waren. Die Belastung sollte zudem relativ hoch sein, damit nur möglichst geringe Massenanteile für die Aufstockung zugemischt werden mußten und die Gesamtcharakteristik der Testböden möglichst wenig verändert wurde.

Belastete Böden und Kontrollböden wurden in dem Mengenverhältnis eingewogen, das nach Vermischen den gewünschten Endgehalt bezogen auf die Trockenmasse (TM) ergab. Die zu mischenden Böden wurden jeweils separat auf ca. 60 % WHKmax eingestellt und anschließend gründlich vermischt. Für die resultierende Bodenmischung wurde jeweils der aktuelle Wassergehalt und die maximale Wasserhaltekapazität bestimmt. Anschließend wurden die Böden durch entsprechende Zugabe von Wasser auf eine Feuchte von 60 % WHKmax eingestellt, die sich für biologische Prüfungen bewährt hat.

Die für alle Replikate und Prüfungen notwendige Bodenmenge für einen Schadstoff/eine Gehaltsstufe wurde jeweils in einem Ansatz hergestellt. Alle so hergestellten Mischungen wurden schließlich auf den erreichten Endgehalt des zu untersuchenden Schadstoffs untersucht (Überprüfung des Nominalgehaltes).

Die verwendeten Mischungsverhältnisse sind in Tabelle 13 bis Tabelle 15 zusammengestellt. Die angegebenen Gehalte beziehen sich für Arsen und Cadmium auf den Königswasserauszug. Eine Ausnahme stellt der Cadmium-Gehalt dar, der auf Basis der Cd-Gehalte im Ammoniumnitratlösungsextrakt eingestellt wurde (Maßnahmenwert für den Schadstoffübergang Boden – Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität). Für Benzo(a)pyren bezieht sich die Gehaltsangabe auf den mit Toluol extrahierbaren Gehalt.

Tabelle 13: Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Cadmium-belasteten Böden, die in den biologischen Prüfungen eingesetzt wurden. Der Gehalt an Cadmium im Boden B2-Cd betrug 1750 mg/kg. Die Gehalte beziehen sich auf den Königswasserauszug (bis auf AN). Die aktuelle Feuchte der Böden bei der Mischung ist in % TM angegeben.

Bezeichnung	Sollgehalt im Mischboden [mg/kg]	Unbelasteter Boden TM (%)	Boden B2-Cd TM (%)	Anteil B2-Cd im Mischboden
IUCT-Boden				
Cd-IUCT-0	0 (Kontrolle)	82	-	0
Cd-IUCT-15	15	82	59	1 in 113
Cd-IUCT-50	50	82	59	1 in 34
Cd-IUCT-300	300	82	59	1 in 5,7
Cd-AN-IUCT-40	40 µg/kg AN*	82	59	1 in 250
Borstel-Boden				
Cd-Borstel-0	0 (Kontrolle)	92	-	0
Cd-Borstel-15	15	92	59	1 in 113
Cd-Borstel-50	50	92	59	1 in 34
Cd-Borstel-300	300	92	59	1 in 5,7
Cd-AN-Borstel-40	40 µg/kg AN*	92	59	1 in 250

AN, Ammoniumnitratlösungsextrakt; TM, Trockenmasse;

* Gehalt bezogen auf den Ammoniumnitratlösungsextrakt nach DIN 19730.

Tabelle 14: Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Arsen-belasteten Böden, die in den biologischen Prüfungen eingesetzt wurden. Der Gehalt an Arsen im Boden B8-As betrug 20400 mg/kg. Alle Gehalte beziehen sich auf den Königswasserauszug. Die aktuelle Feuchte der Böden bei der Mischung ist in % TM angegeben.

Bezeichnung	Sollgehalt im Mischboden [mg/kg]	Unbelasteter Boden TM (%)	Boden B8-As TM (%)	Anteil B8-As im Mischboden
IUCT-Boden				
As-IUCT-0	0 (Kontrolle)	82	-	0
As-IUCT-50	50	82	83	1 in 400
As-IUCT-200	200	82	83	1 in 100
As-IUCT-1000	1000	82	83	1 in 20
Borstel-Boden				
As-Borstel-0	0 (Kontrolle)	92	-	0
As-Borstel-50	50	92	83	1 in 400
As-Borstel-200	200	92	83	1 in 100
As-Borstel-1000	1000	92	83	1 in 20

TM, Trockenmasse.

Tabelle 15: Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Benzo(a)pyren-belasteten Böden, die in den biologischen Prüfungen eingesetzt wurden. Der Gehalt an Benzo(a)pyren im Boden B3-PAK betrug 44 mg/kg. Alle Gehalte beziehen sich auf den Gehalt im Toluol-extrakt. Die aktuelle Feuchte der Böden bei der Mischung ist in % TM angegeben

Bezeichnung	Sollgehalt im Mischboden [mg/kg]	Unbelasteter Boden TM (%)	Boden B3-PAK TM (%)	Anteil B3-PAK im Mischboden
IUCT-Boden				
PAK-IUCT-0	0 (Kontrolle)	82	-	0
PAK-IUCT-10	10	82	96	1 in 4.4
PAK-IUCT-20	20	82	96	1 in 2.2
Borstel-Boden				
PAK-Borstel-0	0 (Kontrolle)	92	-	0
PAK-Borstel-10	10	92	96	1 in 4.4
PAK-Borstel-20	20	92	96	1 in 2.2

TM, Trockenmasse.

5.2 Analytische Methoden

In der Bodenschutzverordnung sind Verfahren aufgeführt, nach denen die in der Verordnung genannten Schadstoffe zu analysieren sind. In den meisten Fällen handelt es sich um genormte Verfahren. Die Durchführung der Analysen innerhalb dieses Projekts erfolgte weitgehend entsprechend dieser Vorgaben. Bei den im folgenden angegebenen Verfahren wird hier nur kurz das jeweilige Meßprinzip genannt. Die detaillierte Methodenbeschreibung ist in der entsprechenden Vorschrift (vorwiegend DIN-Normen) zu finden. Nur in Fällen, wo keine Norm vorgegeben war oder wo von der Norm abgewichen werden mußte, ist eine ausführlichere Beschreibung gegeben.

5.2.1 Bestimmung der Wasserhaltekapazität von Böden

Unter der maximalen Wasserhaltekapazität (WHKmax) eines Bodens ist die Wassermenge zu verstehen, die eine definierte Menge an Boden bis zur kapillaren Sättigung aufnehmen kann. Um die WHKmax zu bestimmen wurde der zu untersuchende Boden 24 Stunden mit Wasser gesättigt. Der Boden wurde dazu in einen Stechzylinder aus Edelstahl (Durchmesser 5 cm) eingewogen, wobei die untere Öffnung durch Gaze verschlossen war, und in ein Wasserbad gegeben. Nach 24 Stunden wurde der Zylinder mit dem gesättigten Boden auf ein Sandbad gestellt und in regelmäßigen Abständen gewogen, bis ein konstantes Gewicht erreicht war. Parallel zu dieser Bestimmung erfolgte mit einer weiteren Teilprobe des feldfrischen Bodens eine Trockenmassebestimmung. Aus diesen Werten wurde die maximale Wasserhaltekapazität berechnet. Der aktuelle Wassergehalt ausgedrückt in % WHK ergibt sich aus dem Feuchtgewicht bei der Bodenwaage und der Boden-Trockenmasse.

5.2.2 Bestimmung der Trockenmasse

Die Bestimmung der Trockenmasse erfolgte durch Trocknung einer eingewogenen Teilprobe für mindestens 12 Stunden bei 105°C im Trockenschrank. Die jeweils eingesetzte Probenmenge betrug ca. 20 g (feucht). Nach Abkühlung im Exsikkator erfolgte die Rückwaage und die Berechnung der Trockenmasse. Aus der Einwaage ergab sich die aktuelle Feuchte des zu untersuchenden Bodens.

5.2.3 Königswasserauszug (DIN ISO 11466)

Eine Teilprobe der auf < 4 mm gesiebten Bodenprobe wurde getrocknet, auf eine Korngröße $\leq 0,1$ mm gemahlen, gemäß DIN ISO 11466 über Nacht mit Königswasser (Salzsäure/Salpetersäure 3:1) behandelt und dann 2 Stunden unter Sieden extrahiert. Eingewogen wurden jeweils ca. 3 g Boden. Die Auszugslösung wurde filtriert und mit Wasser auf 100 ml aufgefüllt.

Im Königswasserauszug werden für die hier relevanten Elemente mindestens ca. 90 % der in der Bodenmatrix vorhandenen Anteile in Lösung gebracht (Pseudo-Gesamtgehalte).

5.2.4 Ammoniumnitratlösungsextraktion (DIN 19730)

Die Bodenproben wurden zur Bestimmung der potentiell verfügbaren Kontaminanten mit Ammoniumnitratlösung gemäß DIN 19730 extrahiert. Dazu wurden 20 g des Bodens mit 50 ml 1 M NH_4NO_3 -Lösung 2 Stunden geschüttelt. Danach wurde der Überstand durch ein 0,45 μM -Membranfilter filtriert und analysiert.

5.2.5 Bestimmung der Schwermetalle (DIN 38406/DEV E22)

Die Messung der Schwermetalle im Königswasserauszug nach DIN ISO 11466 bzw. im Ammoniumnitratlösungsextrakt nach DIN 19730 wurde mit einem Optischen Emissionsspektrometer mit Anregung durch ein induktiv gekoppeltes Plasma (ICP-OES, Varian Liberty II) durchgeführt. Bestimmt wurden Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Gesamt-Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zink (Zn). Für die Screening-Untersuchungen wurde auch Quecksilber (Hg) auf diese Weise bestimmt. Für die Auswertung wurden geräteintern jeweils eine Mittelwertbildung aus drei bis fünf Messungen durchgeführt. Als Ergebnis angegeben ist jeweils der Mittelwert aller Messungen. Die Berechnung der Gehalte erfolgte unter Nutzung der geräteinternen Algorithmen. Nur für Cu und Zn wurde teilweise eine nachträgliche manuelle Auswertung durchgeführt, da die Gehalte nur im unteren Bereich der Kalibrierkurve lagen.

Die Meßwerte wurden auf Bodengehalte umgerechnet und sind in mg/kg angegeben. Bezugsgröße ist die Trockenmasse des Bodens.

5.2.6 Bestimmung von Cadmium

In Königswasserauszügen der unbelasteten Böden wurde der Cadmiumgehalt mittels Graphitrohr-AAS bestimmt. Es wurde ein UNICAM 939QZ mit Deuteriumlampen-Untergrundkorrektur verwendet. Nach 3-Punkt-Kalibrierung und Blindwertüberprüfung erfolgte die Messung der Proben. Das Probenvolumen betrug 10 µl. Als Matrixmodifier wurde Ammoniumnitratlösung eingesetzt. Die Atomisierung im Graphitrohr erfolgte bei 1300°C.

5.2.7 Quecksilberbestimmung (EN1483/DEV E12)

Die Bestimmung von Quecksilber in den drei für die biologischen Prüfungen ausgewählten Altlast-Böden sowie der unbelasteten Böden erfolgte im Königswasserauszug (nach DIN ISO 11466; siehe 5.2.3). Die Hg-Bestimmung analog EN1483 E12 wurde nach Reduktion mit Natriumborhydrid mit einem Perkin-Elmer Fließinjektionssystem FIMS 400 (FIMS, fluid injection mercury system) durchgeführt. Die Messung erfolgte durch Atomabsorptionsspektrometrie in einer eingebauten Langweg-Quarzküvette (Hg-Niederdrucklampe).

5.2.8 Bestimmung von Chlor-Pestiziden und polychlorierten Biphenylen (PCB)

Die für die Bestimmung von Chlor-Pestiziden und polychlorierten Biphenylen (PCB) eingesetzte Methode wurde am Fraunhofer IUCT entwickelt und ist in Form einer Standardarbeitsanweisung dokumentiert. Die Vergleichbarkeit mit den in der BBodSchV genannten Verfahren wurde im Rahmen von Ringversuchen überprüft. Zur Aufarbeitung wurden je 20,0 g Boden genau abgewogen, mit 10 g Na₂SO₄ gemischt und in eine Soxhlet-Extraktionshülse gefüllt. Der Boden wurde mit 3 g Na₂SO₄ überschichtet und im automatischen Soxhlet-Extraktor (Fa. Soxtec) mit 85 ml Toluol extrahiert. Die Heißextraktion dauerte 1 Stunde. Danach schloß sich eine Spülphase (Extraktion mit Kondensat) von 2 Stunden an. Das Toluol wurde teilweise abdestilliert. Der verbliebene Rest wurde auf 20 ml aufgefüllt und mit 10 ml Standard versetzt. Nach dem Einengen am Rotationsverdampfer auf 0,5 ml wurde der Extrakt über eine ca. 30 cm lange AgNO₃/Kieselgel-Säule gereinigt (Cleanup). Das Säuleneluat (Lösungsmittel Hexan/Toluol 8:2) wurde auf 1 ml eingeengt und an einem Hewlett-Packard Gaschromatographen HP 5890 Typ II mit massenselektivem Detektor MSD HP 5972 analysiert (GC/MS-Bestimmung). Als interner Standard wurde PCB 209 in einer Endkonzentration von 398 ng/ml verwendet. Die Berechnung erfolgte nach der internen Standard-Methode im Eichbereich von 20 - 600 ng/ml. Folgende Verbindungen wurden auf diese Weise erfaßt: Hexachlorbenzol (HCB), beta-HCH (Hexachlorbenzol), gamma-HCH (Lindan), 4,4'-DDT (4,4'-Dichlordiphenyltrichlorethan), DDT-Abbauprodukte (2,4'-DDE; 4,4'-DDE; 2,4'-DDD; 4,4'-DDD und 2,4'-DDT). Bei den PCB wurden 6 Einzelverbindungen bestimmt: PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153, PCB 180.

5.2.9 Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK)

Die Bestimmung der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) erfolgte analog zum Merkblatt Nr. 1 des LUA NRW (1994) mit Toluol-Extraktion, gaschromatographischer Trennung und massenselektiver Detektion (empfohlene Methode nach BBodSchV). Zur Aufarbeitung wurden je 20,0 g Boden genau abgewogen, mit 10 g Na₂SO₄ gemischt und in eine Soxhlet-Extraktionshülse gefüllt. Der Boden wurde mit 3 g Na₂SO₄ überschichtet und im automatischen Soxhlet-Extraktor (Fa. Soxtec) mit 85 ml Toluol extrahiert. Die Heißextraktion dauerte 1 Stunde. Danach schloß sich eine Spülphase (Extraktion mit Kondensat) von 2 Stunden an. Das Toluol wurde teilweise abdestilliert. Der verbliebene Rest wurde auf 20 ml aufgefüllt. Hiervon wurde dann 1,0 ml über eine ca. 30 cm lange AgNO₃/Kieselgel-Säule gereinigt (Cleanup). Das Säuleneluat wurde mit Standard versetzt, am Rotationsverdampfer auf 1 ml eingeengt und an einem Hewlett-Packard Gaschromatographen HP 5890 Typ II mit massenselektivem Detektor MSD HP 5972 analysiert (GC/MS-Bestimmung). Als interne Standards wurden 4 deuterierte PAK in einer Endkonzentration von 2 µg/ml verwendet. Die Berechnung erfolgte nach der internen Standard-Methode im Eichbereich von 0,25 - 7,5 ng/µl.

5.2.10 Bestimmung von Mineralölkohlenwasserstoffen

Aus dem Boden extrahierte Mineralölkohlenwasserstoffe wurden in Anlehnung an DIN 38409/DEV H18 bestimmt. Die Extraktion wurde mit 1,1,2-Trichlortrifluorethan durchgeführt. Nach Reinigung des Extrakts von polaren Komponenten über eine Aluminiumoxidsäule erfolgte die Bestimmung infrarotspektrometrisch (Messung der Extinktion der Kohlenwasserstoffbanden).

5.2.11 Bestimmung der leicht freisetzbaren Cyanide

Leicht freisetzbaren Cyanide wurden nach DIN 38405/DEV D14 bestimmt. Die Zersetzung der Cyanidverbindungen erfolgte bei Raumtemperatur in einer auf pH 4 gepufferten Lösung. Cyanwasserstoff wurde ausgetrieben und in Natronlauge adsorbiert. Die photometrische Bestimmung erfolgte nach Zugabe von Chloramin T und Reaktion mit Barbitursäure-Pyridin-Reagenz.

Die Bestimmung erfolgte nur für die Böden, die für die biologischen Prüfungen eingesetzt wurden.

5.2.12 Bestimmung des Phenolindex nach Destillation

Zur Bestimmung des Phenolindexes wurden wässrige Extrakte der Böden hergestellt, die dann nach DIN 38409/DEV H16-3 untersucht wurden. Eingesetzt wurden je 10 g der Böden. Die Extraktion erfolgte mit 100 mL Wasser nach Zugabe von 0,1 g Kupfersulfat zur Stabilisierung. Vor der Destillation wurden 10 ml Pufferlösung pH 4 zugegeben. Die Bestimmung der wasserdampf-

flüchtigen Phenole erfolgte durch Kopplung mit 4-Aminoantipyrin und anschließender photometrischer Quantifizierung.

Die Bestimmung erfolgte nur für die Böden, die für die biologischen Prüfungen eingesetzt wurden.

5.2.13 Bestimmung des Phosphorgehalts im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug

Phosphat (berechnet als P_2O_5) im auf pH 4.1-gepufferten Calcium-Acetat-Lactat-Auszug (CAL-Auszug) wurde gemäß VDLUFA-Methode A6.2.1.1 photometrisch bestimmt. Alternativ erfolgte die Bestimmung ionenchromatographisch nach DIN 38405/DEV D19.

Die Bestimmung erfolgte nur für die Böden, die für die biologischen Prüfungen eingesetzt wurden.

5.2.14 Bestimmung von Ammonium

Zur Bestimmung der Ammonium-Ionen nach DIN 38406/DEV E5-1 wurde eine Umsetzung mit Hypochlorit-Ionen (aus Dichlorisocyanursäure) und Salicylat-Ionen bei alkalischem pH und in Anwesenheit von Dinatriumpentacyanonitrosylferrat durchgeführt. Die Quantifizierung erfolgte durch photometrische Messung des entstehenden blauen Farbstoffs. Die Angabe erfolgt als Ammonium-Stickstoff (mg/L NH_4-N).

Die Bestimmung erfolgte nur für die Böden, die für die biologischen Prüfungen eingesetzt wurden.

5.2.15 Bestimmung von Nitrat und Nitrit

Zum Nachweis der Nitrat-Ionen nach DIN 38405/DEV D9-2 wurden diese in schwefel- und phosphorsaurer Lösung mit 2,6-Dimethylphenol zu 4-Nitro-2,6-Dimethylphenol umgesetzt. Die Bestimmung erfolgte dann photometrisch. Die Angabe erfolgt als Nitrat-Stickstoff (mg/L NO_3-N).

Nitrit wurde nach DIN EN 26777/DEV D10 bestimmt, indem es in Gegenwart von Orthophosphorsäure mit 4-Aminosulfonamid zu einem Diazoniumsalz umgesetzt wurde, das mit gleichzeitig zugesetztem N-(1-Naphtyl)-1,2-diaminoethan-Dihydrochlorid zu einem rosa Farbstoff reagierte. Die eigentliche Messung erfolgte photometrisch. Die Angabe erfolgt als Nitrit-Stickstoff (mg/L NO_2-N).

Die Bestimmung erfolgte nur für die Böden, die für die biologischen Prüfungen eingesetzt wurden.

5.3 Biologische Untersuchungen

5.3.1 Pflanzentest

Die Prüfung erfolgte auf Grundlage der Prüfrichtlinie OECD 208 (1984).

Als Testgefäß dienten Kunststofftöpfe mit einem Durchmesser von 9 cm, die am Boden mit einem Loch versehen waren, durch das ein Glasfaserdocht geführt wurde, dessen oberes Ende sich an der Oberfläche des Testsubstrates befand, während das andere Ende in ein Vorratsgefäß mit Wasser eingetaucht war. Für jeden Bodengehalt wurden separate Wassergefäße aufgestellt.

Von jedem Boden wurden 280 g pro Testgefäß eingefüllt. Es wurde jeweils in vier Parallelen gearbeitet (Ausnahme: Mischung Borstel-Boden / Cadmium drei Parallelen).

Als Saatgut wurde verwendet:

Avena sativa (Hafer)

Bezugsquelle: Saatgutzücherei Nückel, Schmallenberg

Tausendkorngewicht: 54,42 g

Keimfähigkeit: 94 %;

Brassica rapa (Stoppelrübe)

Bezugsquelle: Saatguthandel Hennecke & Co, Schmallenberg

Tausendkorngewicht: 45,92 g

Keimfähigkeit: 92 %.

In jedes befüllte Testgefäß wurden 10 gleich große Samen eingebracht und im Klimaschrank bei 20 °C, ca. 8000 lux und einem Tag/Nachtrhythmus von 16 / 8 h inkubiert. Es erfolgte eine tägliche Kontrolle der Pflanzen. Mit Auflaufen von 50 % der in das unbelastete Substrat eingebrachten Samen (Borstel-Boden bzw. IUCT-Boden) wurde der Testbeginn (Tag 1) festgesetzt. Nach 14 Tagen erfolgte die Bestimmung der Frischmasse der oberirdischen Teile, indem die Sprosse direkt an der Substratoberfläche abgeschnitten wurden.

5.3.2 Nematodentest

Der Nematodentest erfolgte in Anlehnung an die Methodik von Niemann und Debus (1996) mit *Panagrellus redivivus* als Testorganismus. Zum Abtöten der originären Nematodenfauna wurden jeweils 150 g Boden (Frischgewicht) mit flüssigem Stickstoff in einer 250 ml PE-Flasche überschichtet. Nach dem Abdampfen des N₂ wurde das Gefäß verschlossen, kräftig geschüttelt, und 3 d bei 21 °C inkubiert. Dieser Vorgang wurde noch zweimal wiederholt. Im Anschluß daran wurde der Boden mit steriles Wasser aufgeschlämmt (ca. 100 % der maximalen Wasserhaltekapazität), 4 g Frischhefe zugegeben und 1 h auf einem Überkopfschüttler geschüttelt. Jeweils 20 g der Suspension wurden in drei Parallelen in Petrischalen (Ø 5,5 cm) gegossen und pro Schale 80.000 Nematoden aus einer Stammkultur als Suspension zugegeben.

Für die Extraktion der Nematoden aus der Stammkultur wurde in einen Baermantrichter ein feinmaschiges Sieb gelegt und der Trichter nach Verschluß der Öffnung mittels Schlauch und Schlauchklemme bis zum Sieb mit Leitungswasser gefüllt. Auf das Sieb wurde ein Milchfilter gelegt, der Inhalt einer Kulturplatte mit der Oberseite nach unten auf den Filter gegeben und Leitungswasser zugegeben, bis die Milchfilterscheibe vollständig bedeckt war. Durch aktive Bewegung wanderten die Nematoden durch den Filter in das Wasser und sanken aufgrund ihrer höheren Dichte zum Schlauchende. Nach 3 h Laufzeit wurde in der abgenommenen Suspension die Nematodenanzahl bestimmt.

Nach dem Abdampfen der Flüssigkeit bei Raumtemperatur unter einer Sterilbank wurden die Schalen mit Deckeln verschlossen und für 7 Tage bei 21 °C im Dunkeln inkubiert.

Zur Testauflösung wurden die Nematoden über Nacht mittels Baermantrichter extrahiert, drei Aliquots ausgezählt und die Gesamtzahl an Nematoden sowie der Vermehrungsfaktor berechnet.

5.3.3 Regenwurmreproduktionstest

Als Testorganismen wurden mindestens zwei Monate alte Regenwürmer der Spezies *Eisenia fetida* mit einem Clitellum und einer Frischmasse von 300 - 600 mg verwendet. Im Test betrug der Gewichtsunterschied zwischen allen Würmern eines Ansatzes (zu beurteilender Boden und Kontrolle) an Tag 0 nicht mehr als 100 mg, der Altersunterschied nicht mehr als 4 Wochen.

Als Kontrollböden wurde das Originalregenwurmtestsubstrat (OECD-Erde) nach ISO-Vorschrift (ISO 11268-2) verwendet.

Alle Ansätze wurden als Dreifach-Parallelen durchgeführt. Der Boden wurde auf 60 % seiner maximalen Wasserhaltekapazität eingestellt, der pH-Wert gemessen und die Menge an Boden bestimmt, die benötigt wurde, um eine Füllhöhe in den Gefäßen von 5-6 cm zu erhalten (Glaschalen mit einer Oberfläche von ca. 200 cm²). Die Gesamtmenge an Boden wurde mit feuchtem Dung vermischt, so daß in den Gefäßen eine Menge von 5 g trockenem Dung pro 500 g Bodentrockenmasse vorlag. Anschließend wurden die Proben locker in die Gefäße gefüllt (Füllhöhe ca. 5 - 6 cm), zusätzlich in jeden Behälter 5 g trockenes Futter auf die Bodenoberfläche gegeben und mit 5 - 6 ml Trinkwasser befeuchtet.

Pro Gefäß wurden 10 Regenwürmer auf das Bodenmaterial gegeben, die Behälter mit Glasscheiben luftdurchlässig abgedeckt und inkubiert (20 ± 2 °C; Beleuchtungsstärke: 400 - 800 Lux; Tag/Nacht-Rhythmus von 16 h : 8 h). Einmal pro Woche wurde der Wassergehalt kontrolliert, der Wasserverlust ausgeglichen und die Würmer nach Bedarf mit befeuchtetem Dung gefüttert.

Nach 28 Tagen wurde die Anzahl der adulten Würmer, deren Frischgewicht sowie der Wassergehalt und der pH-Wert des Bodens bestimmt. Die adulten Würmer wurden entfernt und nach weiteren 4 Wochen unter den gleichen Inkubationsbedingungen die Anzahl der Nachkommen sowie der pH-Wert und der Wassergehalt bestimmt.

5.3.4 Mikroorganismen

Um mögliche Adaptationseffekte der originären Mikroflora zu erfassen, wurden die mikrobiologischen Untersuchungen sowohl an Tag 0 als auch nach 8 Wochen durchgeführt. Während der 8wöchigen Inkubationszeit wurde der Boden bei 22 ± 2 °C gelagert, wobei Sauerstoffzufuhr gewährleistet war. Wöchentlich wurde der Wasserverlust über Wägung ermittelt und durch Wasserzugabe ausgeglichen.

Potentielle Ammoniumoxidation

Die Bestimmung der potentiellen Ammoniumoxidation erfolgte nach der Methode von Kandeler (zitiert in Schinner et al., 1993) unter Zusatz von Ammoniumsulfat. Als Maß diente die Bildung von Nitrit, dessen Weiteroxidation durch den Zusatz von Natriumchlorat gehemmt wurde. Es wurden jeweils vier Nullproben und vier Vollproben untersucht. Für die Auswertung wurden die Nullproben gemittelt und von den Vollproben subtrahiert. Aus den vier Umsatzraten wurde der Mittelwert mit Standardabweichung berechnet.

Basalatmung und substratinduzierte Atmung

Für die Erfassung der Basalatmung wurde die Respirationsrate eines Boden aliquots mit Hilfe eines Sapromaten (Voith) ermittelt. Es wurden jeweils 100 g Bodenmaterial in die Reaktionsgefäße eingewogen und bei 20 °C ca. 3 Tage inkubiert. Im Anschluß an die Bestimmung der Basalatmung wurde der Boden für die Ermittlung der substratinduzierten Atmungsaktivität mit einem Gemisch aus Glucose, Ammoniumsulfat und Kaliumdihydrogenphosphat (80 g Glucose + 13 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + 2 g KH_2PO_4 ; pro Gramm organische Substanz 0,2 g Gemisch) versetzt und der Boden erneut inkubiert. Für die Berechnung der Atmungsaktivitäten wurde nur der lineare Teil der Atmungskurve herangezogen.

Das beschriebene Verfahren wird zur Zeit im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Ökotoxikologische Testbatterien“, Teilvorhaben 4.1 „Praxiserprobung biologischer Testverfahren und Koordination“ erprobt. Im Rahmen dieses Vorhabens wird auch erprobt, inwieweit der Zeitpunkt des Auftretens des Peakmaximums nach Zugabe der Nährstoffquellen einen Anhaltspunkt auf Schadstoffeffekte gibt. Eine endgültige Bewertung kann diesbezüglich noch nicht gegeben werden, da das Vorhaben noch nicht abgeschlossen ist. In den Ergebnistabellen wird jedoch auch in diesem Vorhaben der Zeitpunkt des Peakmaximums angegeben.

6 Ergebnisse

6.1 Ergebnisse der chemisch-analytischen Untersuchungen

6.1.1 Ergebnisse des Screenings

Im ersten Untersuchungsschritt wurden die Böden, die potentiell als geeignet für den Einsatz in diesem Projekt identifiziert wurden, auf die jeweilige Hauptkomponente sowie auf wichtige andere Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen analysiert (siehe Tabelle 16).

Neben den Schwermetallgehalten im Königswasserauszug wurden PAK, PCB, Chlor-Pestizide sowie Mineralölkohlenwasserstoffe bestimmt.

Als Ergebnis der Untersuchungen ergab sich daß die folgenden Böden den Anforderungen dieses Projekts am ehesten entsprechen:

- B2-Cd Altlastboden mit hoher Cadmiumbelastung,
- B8-As Altlastboden mit hoher Arsenbelastung,
- B3-PAK Altlastboden mit hoher PAK/Benzo(a)pyrenbelastung.

Zwar weisen alle Böden zusätzliche Kontaminationen auf, doch ist deren Höhe im Verhältnis zur Hauptkontamination in den meisten Fällen zu vernachlässigen.

Die für die Versuche eingesetzten Chargen der ausgewählten Böden wurden im nächsten Schritt noch einmal untersucht.

Tabelle 16: Ergebnisse der Vorruntersuchungen (Screening): Haupt- und Nebenkontaminanten.

Para-meter	B1-As Kw / Ges. [mg/kg]	B1-As AN [mg/kg]	B2-Cd Kw / Ges. [mg/kg]	B2-Cd AN [mg/kg]	B3-PAK Kw / Ges. [mg/kg]	B3-PAK AN [mg/kg]	B4-PAK Kw / Ges. [mg/kg]	B4-PAK AN [mg/kg]	B5-PAK Kw / Ges. [mg/kg]	B5-PAK AN [mg/kg]	B6-As Kw / Ges. [mg/kg]	B6-As AN [mg/kg]	B7-As1 Kw / Ges. [mg/kg]	B7-As1 AN [mg/kg]	B8-As Kw / Ges. [mg/kg]	B8-As AN [mg/kg]	
As	150 0,6	< BG	< BG	105 145	< BG	< BG	0,09 < BG	< BG	< BG	< BG	114 < BG	< BG	< BG	< BG	25155 198		
Cd	< BG	< BG	898 6,03	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	234 10		
Cr	9 < BG	368 < BG	22 < BG	15 < BG	15 < BG	4 < BG	4 < BG	4 < BG	7 < BG	7 < BG	16 < BG	16 < BG	16 < BG	16 < BG	27 27	< BG	
Cu	21 < BG	168 0,31	156 0,3	9 0,3	9 0,3	7 0,3	7 0,3	7 0,3	0,4 < BG	0,4 < BG	104 10	104 10	104 10	104 10	57 57	0,3 0,3	
Ni	5 < BG	74 < BG	22 < BG	13 < BG	13 < BG	< 3,3 < BG	< 3,3 < BG	< 3,3 < BG	10 < BG	10 < BG	12 6	12 6	12 6	12 6	16 205	< BG 205	
Pb	202 < BG	80 < BG	380 < BG	8 8	8 8	< BG < BG	< BG < BG	< BG < BG	596 100	< BG 24	596 1294	< BG 6,7	596 6,7	< BG 38	< BG 38	88 88	< BG
Zn	32 < BG	728 < BG	1,87 < BG	276 < BG	100 < BG	24 < BG	24 < BG	24 < BG	1294 1294	6,7 6,7	1294 6,7	1294 6,7	1294 6,7	1294 6,7	1294 6,7	1294 6,7	
Hg	< BG	< BG	< BG	63 < BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
PAK / BaP	14,6 / 0,97	7,1 / 0,7	1468 / 151	2,9 / 0,3		395 / 5,6		13,8 / 1,2		13,8 / 1,2		0,1 / < BG		0,1 / < BG	10 / 0,9		
PCB	0,08 -	0,027 -	0,068 -	0,005 -		0,012 -		0,07 -		0,07 -		0,031 -		0,031 -	< BG -		
HCH	0,014 -	0,016 -	< BG -	< BG -		0,011 -		< BG -		< BG -		< BG -		< BG -	< BG -		
DDT	0,034 -	0,081 -	0,33 -	< BG -		0,093 -		0,031 -		0,031 -		< BG -		< BG -	< BG -		
MKW	< BG	30 -	31 -	< 10 -		131 -		50 -		50 -		35 -		35 -	< BG -		

KW, Königswasserauszug; Ges., Gesamtgehalt im methodenspezifischen Extrakt; AN, Ammoniumnitratlösungsextrakt; n.b., nicht bestimmt; -, keine Messung vorgesehen; BG, Bestimmungsgrenze für Metalle im KW-Auszug lag bei 17 mg/kg für Hg und bei 4 mg/kg für alle anderen Elemente; im Ammoniumnitratlösungsextrakt war die Bestimmungsgrenze 0,3 mg/kg für Hg und 0,3 mg/kg für alle anderen Elemente. Die Bestimmungsgrenze für BaP betrug 0,1 mg/kg, für HCH, DDT und PCB jeweils 0,001 mg/kg und für MKW 10 mg/kg.

6.1.2 Charakterisierung der ausgewählten Böden

Von den ausgewählten Böden wurden für die Versuche ausreichende Mengen beprobt und homogenisiert. So sollte erreicht werden, daß für alle biologischen Untersuchungen einheitliches Material eingesetzt wird. Die homogenisierten Bodenchargen wurden einer weiteren Charakterisierung unterzogen.

Zunächst wurden die Haupt- und Nebenkontaminanten untersucht (Tabelle 17).

Tabelle 17: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen: Haupt- und Nebenkontaminanten.

Haupt-/ Nebenkontaminanten (bezogen auf die Trockenmasse)						
Boden	B2-Cd	B3-PAK	B8-As	IUCT	Borstel	BG*
Cyanide, leicht freisetzbar [mg/kg]#	2,1	27	4,3	n.b.	n.b.	0,5
Phenolindex nach Destillation [mg/kg]#	2,4	< 1	1,5	n.b.	n.b.	1
Benzo(a)pyren [mg/kg]	0,5	44	1,8	< 0,1	< 0,1	0,1
MKW, IR-spektroskopisch [mg/kg]#	30	31	n.b.	n.b.	n.b.	10
Summe Chlor-Pestizide [µg/kg]#	87	< 10	< 10	n.b.	n.b.	10
HCB [µg/kg]#	2	< 2	< 2			2
Summe HCH [µg/kg]#	< 2	< 2	< 2			2
4,4'-DDT [µg/kg]#	51	< 2	1			2
Summe PCB [µg/kg]#	17	195	< 10	n.b.	n.b.	10
Arsen im KW-Auszug [mg/kg]	9	36	20400	< 7	< 7	7
Blei im KW-Auszug [mg/kg]	86	133	173	35	9,5	5
Cadmium im KW-Auszug [mg/kg]	1750	28	< 3	0,5	< 0,5	0,5
Cadmium im AN-Extrakt [µg/kg]	10000	n.b.	n.b.	(18)	(8)	n.b.
Chrom im KW-Auszug [mg/kg]	618	21	27	47	6	3
Kupfer im KW-Auszug [mg/kg]	185	62	43	29	6	3
Nickel im KW-Auszug [mg/kg]	87	22	15	47	< 5	5
Quecksilber im KW-Auszug [mg/kg]	0,7	22	3,8	0,1	< 0,1	0,1
Zink im KW-Auszug [mg/kg]	588	130	103	118	21	5

* abgeschätzte Bestimmungsgrenze; # nur bei Verdacht auf Belastung untersucht;

n.b. - nicht bestimmt; KW-Auszug, Königswasserauszug nach DIN ISO 11466.

Die kontaminierten Böden weisen ein breites Spektrum an Verunreinigungen auf. Neben der jeweiligen Hauptkomponente sind auch immer andere Schadstoffe enthalten. In allen Böden sind relevante Mengen an Schwermetallen vorhanden (auch andere Schwermetalle neben den hohen Arsen- bzw. Cadmiumbelastungen). Der PAK-belastete Boden enthält auch PCB. Im Cadmium-belasteten Boden fällt die Belastung mit Chlor-Pestiziden, insbesondere DDT, auf. Der Arsen-belastete Boden enthält auch Benzo(a)pyren/PAK.

Tabelle 18 zeigt die Einzelergebnisse der PAK-Bestimmung (16 PAK nach EPA). Benzo(a)pyren stellt ca. 7 - 8 % der Gesamt-PAK-Belastung der Böden dar (in vielen Fällen wird angenommen, daß 10 % der PAK Benzo(a)pyren sind). Neben Benzo(a)pyren sind aber noch weitere toxische PAK vorhanden.

Tabelle 18: Ergebnisse der PAK-Untersuchungen: Gehalte der 16 PAK nach EPA.

Substanz	B2-Cd µg/kg TM	B3-PAK µg/kg TM	B8-As µg/kg TM
Naphthalin	261	3482	57
Acenaphthylen	33	3810	40
Acenaphthen	32	833	136
Fluoren	50	5060	142
Phenanthren	679	33304	1999
Anthracen	119	11875	572
Fluoranthen	1171	96101	4715
Pyren	917	65149	3833
Benzo(a)anthracen	548	65208	2226
Chrysene	707	55089	2059
Benzo(b)fluoranthen	795	63304	2252
Benzo(k)fluoranthen	265	23185	870
Benzo(a)pyren	482	44256	1789
Indeno(1,2,3-cd)pyren	445	28125	1243
Dibenzo(ah)anthracen	130	9464	404
Benzo(ghi)perylene	423	22440	1086
Summe 16 EPA-PAK [µg/kg TM]	7057	530685	23422
Summe 16 EPA-PAK [mg/kg TM]	7,1	530,7	23,4

Nach einer Aufstellung in einem früheren Entwurf der Bodenschutzverordnung werden auch Benzo(b)fluoranthen und Dibenzo(ah)anthracen toxische Equivalente von 1 zugeordnet (TE-Werte bezogen auf Benzo(a)pyren nach Entwurf BBodSchV, 1998; in der verabschiedeten Form der BBodSchV nicht mehr vorgesehen). In den hier untersuchten Böden liegt der relative Anteil von Benzo(b)fluoranthen bei 10 – 12 % und der von Dibenzo(ah)anthracen bei 4 – 6 %. Benzo(a)pyren ist nur als Leitkomponente anzusehen, wobei davon auszugehen ist, daß bei typischen PAK-Verunreinigungen immer ein ähnliches Verteilungsmuster auftritt. Allerdings kann es in Einzelfällen zu Abweichungen kommen (abweichendes Muster mit anderen Hauptkomponenten).

Der Vorteil der hier gewählten Art der Kontamination (Mischungen mit einem realen Altlastenboden) liegt auch darin, daß für PAK/Benzo(a)pyren die Überprüfung der Prüfwerte mit einer realitätsnahen Schadstoff-Mischung erfolgt. Ein Vergleich mit einer reinen Benzo(a)pyren-Kontamination wäre nicht sinnvoll, da Benzo(a)pyren auch in Altlasten nicht als singuläre Kontamination vorliegt, sondern in Form von PAK-Gemischen.

Tabelle 19: Ergebnisse der PAK-Untersuchungen: Gehalte der 16 PAK nach EPA, berechnet als toxische Equivalente (TE-Werte nach Entwurf BBodSchV, 1998; im endgültigen Entwurf der BBodSchV nicht mehr vorgesehen).

Substanz	TE BaP	B2-Cd µg/kg TE BaP TM	B3-PAK µg/kg TE BaP TM	B8-As µg/kg TE BaP TM
Naphthalin	0,001	< 1	3	< 1
Acenaphthylen	0,01	< 1	38	< 1
Acenaphthen	0,001	< 1	1	< 1
Fluoren	0,001	< 1	5	< 1
Phenanthren	0,001	1	33	2
Anthracen	0,01	1	119	6
Fluoranthen	0,01	12	961	47
Pyren	0,001	1	65	4
Benzo(a)anthracen	0,1	55	6521	223
Chrysene	0,01	7	551	21
Benzo(b)fluoranthen	1	795	63304	2252
Benzo(k)fluoranthen	0,1	27	2318	87
Benzo(a)pyren	1	482	44256	1789
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,1	44	2813	124
Dibenzo(ah)anthracen	1	130	9464	404
Benzo(ghi)perylene	0,01	4	224	11
Summe TE BaP (16 EPA-PAK) [µg/kg TM]		1558	130677	4969
Summe TE BaP (16 EPA-PAK) [mg/kg TM]		1,6	130,7	5,0

Neben den Haupt- und Nebenkontaminanten wurden auch Nährstoffgehalte untersucht (Tabelle 20), um eventuelle positive oder negative Effekte, die allein auf unterschiedliche Nährstoffverfügbarkeiten in den Bodenmischungen beruhen, identifizieren zu können.

Tabelle 20: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen: Nährstoffgehalte.

Nährstoffgehalte (bezogen auf die Trockenmasse)						
Boden:	B2-Cd	B3-PAK	B8-As	IUCT	Borstel	BG*
Phosphat im Calcium-Aacetat-Lactat-Auszug nach VDLUFA A6.2.1.1 (1:20) bzw. ionenchromatographie [mg/kg P ₂ O ₅]	7 (IC)	62	92 (IC)	44	79	5
Ammonium [mg/L NH ₄ -N]	< 0,1	0,4	< 0,1	0,6	1,1	0,1
Nitrat im wässrigen Eluat (1:2); photometrisch [mg/L NO ₃ -N]	154	37	17	9,1	15	5
Nitrit im wässrigen Eluat (1:2); photometrisch [mg/L NO ₂ -N]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1

* abgeschätzte Bestimmungsgrenze; IC, ionenchromatographisch.

Die Nährstoffgehalte der Böden unterscheiden sich deutlich. Insbesondere fällt der hohe Nitratgehalt des Bodens B2-Cd auf, ebenso wie der geringe Phosphatgehalt (jeweils im Verhältnis zu den unbelasteten Böden IUCT und Borstel). Dies ist u.U. bei der Interpretation der Effekte zu beachten. Allerdings werden von diesem Boden nur geringe Mengen für die Mischung eingesetzt (s.u.). Der Nitratgehalt des B3-PAK-Bodens ist ebenfalls hoch im Vergleich zu den Kontrollböden. Da für diesen Boden große Anteile für die Herstellung der Mischböden benötigt werden, ist dies ebenfalls als Ursache möglicher Effekte zu diskutieren.

6.1.3 Überprüfung der eingestellten Bodengehalte

Zur Überprüfung der Nominalgehalte der Schadstoffe in den Testansätzen wurden alle Gehaltsstufen jeweils auf die Hauptbelastungskomponente untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 bis Tabelle 23 aufgeführt. Die Abweichungen zwischen Nominalgehalten und den tatsächlichen Gehalten in den Mischungen waren gering. Abweichungen sind auf Rest-Inhomogenitäten in kontaminierten Böden zurückzuführen sowie auf die Problematik, teilweise relativ kleine Bodenmengen in einer großen Masse homogen zu verteilen (z.B. 1 : 100).

Tabelle 21: Untersuchungsergebnisse der Arsen-Mischböden (analytische Überprüfung der Nominalgehalte). (Basis: Trockenmasse; Pseudo-Gesamtgehalte im Königswasserauszug).

Bezeichnung	Soll-/Nominalgehalt	Istgehalt
As-Borstel-0	-	< 7 mg/kg Arsen
As-Borstel-50 KW	50 mg/kg Arsen	51 mg/kg Arsen
As-Borstel-200 KW	200 mg/kg Arsen	192 mg/kg Arsen
As-Borstel-1000 KW	1000 mg/kg Arsen	1050 mg/kg Arsen
As-IUCT-0	-	< 7 mg/kg Arsen
As-IUCT-50 KW	50 mg/kg Arsen	33 mg/kg Arsen
As-IUCT-200 KW	200 mg/kg Arsen	195 mg/kg Arsen
As-IUCT-1000 KW	1000 mg/kg Arsen	1060 mg/kg Arsen

Tabelle 22: Untersuchungsergebnisse der Cadmium-Mischböden (analytische Überprüfung der Nominalgehalte). (Basis: Trockenmasse; Pseudo-Gesamtgehalte im Königswasserauszug; AN: Extrakt mit Ammoniumnitratlösung).

Bezeichnung	Soll-/Nominalgehalt	Istgehalt
Cd-Borstel-0	-	< 3 mg/kg Cadmium
Cd-Borstel-0	-	(8 µg/kg Cadmium)
Cd-Borstel-15 KW	15 mg/kg Cadmium	16 mg/kg Cadmium
Cd-Borstel-50 KW	50 mg/kg Cadmium	43 mg/kg Cadmium
Cd-Borstel-300 KW	300 mg/kg Cadmium	277 mg/kg Cadmium
Cd- AN -Borstel-40	40 µg/kg Cadmium	30 µg/kg Cadmium
Cd-IUCT-0	-	< 3 mg/kg Cadmium
Cd-IUCT-0	-	(18 µg/kg Cadmium AN)
Cd-IUCT-15 KW	15 mg/kg Cadmium	17 mg/kg Cadmium
Cd-IUCT-50 KW	50 mg/kg Cadmium	49 mg/kg Cadmium
Cd-IUCT-300 KW	300 mg/kg Cadmium	310 mg/kg Cadmium
Cd- AN -IUCT-40	40 µg/kg Cadmium	51 µg/kg Cadmium

Tabelle 23: Untersuchungsergebnisse der PAK-Mischböden (analytische Überprüfung der Nominalgehalte). (Basis: Trockenmasse; Pseudo-Gesamtgehalte im Königswasserauszug).

Bezeichnung	Soll-/Nominalgehalt	Istgehalt
PAK-Borstel-0	-	< 0.1 mg/kg Benzo(a)pyren
PAK-Borstel-10	10 mg/kg Benzo(a)pyren	7,5 mg/kg Benzo(a)pyren
PAK-Borstel-20	20 mg/kg Benzo(a)pyren	20 mg/kg Benzo(a)pyren
PAK-IUCT-0	-	< 0.1 mg/kg Benzo(a)pyren
PAK-IUCT-10	10 mg/kg Benzo(a)pyren	6,1 mg/kg Benzo(a)pyren
PAK-IUCT-20	20 mg/kg Benzo(a)pyren	17 mg/kg Benzo(a)pyren

Um zu überprüfen, ob eventuelle Effekte in den biologischen Tests vielleicht durch Nebenkontaminanten hervorgerufen werden, wurde berechnet, ob die Nebenkontaminanten in den eingesetzten Verdünnungen in der Größenordnung der entsprechenden Prüfwerte liegen. Dazu wurden die eingesetzten Mischungsverhältnisse (siehe Tabelle 13 bis Tabelle 15) sowie die gemessenen Gehalte der wichtigsten Schadstoffe verwendet (Tabelle 17).

Es zeigt sich, daß in den Mischböden die Gehalte einiger Parameter im Bereich der Vorsorgewerte und teilweise auch der Prüfwerte der entsprechenden Komponenten waren (fettgedruckte Angaben in Tabelle 24 bis Tabelle 26). Dies war der Fall beim Mischboden mit dem höchsten Cadmium-Gehalt (nominal 300 mg/kg Cd; Nebenkontaminanten Chrom, Kupfer, Nickel und Zink oberhalb der Vorsorgewerte). Beide Gehalte der Benzo(a)pyren-Mischböden zeigten relevante Nebenkontaminanten (Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber oberhalb der Vorsorgewerte); Cadmium und Quecksilber überschritten in der höchsten Gehaltsstufe auch den niedrigsten

Prüfwert. Bei dem höchsten Gehalt der Arsen-Mischböden lag der Quecksilber-Gehalt etwas oberhalb des Vorsorgewertes.

Tabelle 24: Gehalte an Nebenkontaminanten in den Mischböden im Vergleich zu Vorsorge- und Prüfwerten (Cadmium-Boden und berechnete Gehalte in den Mischungen).
Fett: Werte oberhalb der Vorsorge- bzw. Prüfwerte.

	Bod. B2-Cd	Mischungsverhältnisse				Vorsorge- werte		niedrigster Prüfwert
		1 : 5,7	1 : 34	1 : 113	1 : 250	Lehm (IUCT)	Sand (Borstel)	
Hauptkontaminant								
Cadmium im KW- Auszug [mg/kg]	1750	307	51,5	15,5	7,0	1	0,4	10 *)
Cadmium im AN-Extrakt [mg/kg]	10	1,8	0,3	0,09	0,04	-	-	0,04
Nebenkontaminanten								
Cyanide, leicht freisetzbar [mg/kg]	2,1	0,4	0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	50
Phenolindex nach Destillation [mg/kg]	2,4	0,4	0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Benzo(a)pyren [mg/kg]	0,5	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	0,3	1
Summe PAK [mg/kg]	7,1	1,2	0,2	0,1	< 0,1	3	3	-
MKW, IR- spektroskopisch [mg/kg]	30	5,3	0,9	0,3	0,1	-	-	-
Summe Chlor-Pestizide [mg/kg]	0,087	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
HCB [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	4
Summe HCH [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	5
4,4'-DDT [mg/kg]	0,051	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	40
Summe PCB [mg/kg]	0,017	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05	0,05	0,4
Arsen im KW-Auszug [mg/kg]	9	1,6	0,3	0,1	< 0,1	-	-	25
Blei im KW-Auszug [mg/kg]	86	15,1	2,5	0,8	0,3	70	40	200
Chrom im KW-Auszug [mg/kg]	618	109	18,2	5,5	2,5	60	30	200
Kupfer im KW-Auszug [mg/kg]	185	32,5	5,4	1,6	0,7	40	20	-
Nickel im KW-Auszug [mg/kg]	87	15,3	2,6	0,8	0,3	50	15	70
Quecksilber im KW- Auszug [mg/kg]	0,7	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,5	0,1	5
Zink im KW-Auszug [mg/kg]	588	103	17,3	5,2	2,4	150	60	-

*) in Haus- und Kleingärten, die sowohl als Aufenthaltsbereiche für Kinder als auch für den Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden, ist für Cadmium der Wert von 2,0 mg/kg TM als Prüfwert anzuwenden

Tabelle 25: Gehalte an Nebenkontaminanten in den Mischböden im Vergleich zu Vorsorge- und Prüfwerten (Benzo(a)pyren-Boden und berechnete Gehalte in den Mischungen).
Fett: Werte oberhalb der Vorsorge- bzw. Prüfwerte.

	Boden B3-PAK	Mischungs- verhältnisse		Vorsorgewerte		Niedrigster Prüfwert
		1 : 2,2	1 : 4,4	Lehm (IUCT)	Sand (Borstel)	
Hauptkontaminanten						
Benzo(a)pyren [mg/kg]	44	20,0	10,0	0,3	0,3	1
Summe PAK [mg/kg]	531	241	121	3	3	-
Nebenkontaminanten						
Cyanide, leicht freisetzbar [mg/kg]	27	12,3	6,1	-	-	50
Phenolindex nach Destillation [mg/kg]	1	0,5	0,2	-	-	-
MKW, IR- spektroskopisch [mg/kg]	31	14,1	7,0	-	-	-
Summe Chlor-Pestizide [mg/kg]	0,01	< 0,1	< 0,1	-	-	-
HCB [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	-	-	4
Summe HCH [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	-	-	5
4,4'-DDT [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	-	-	40
Summe PCB [mg/kg]	0,2	0,1	< 0,1	0,05	0,05	0,4
Arsen im KW-Auszug [mg/kg]	36	16,4	8,2			25
Blei im KW-Auszug [mg/kg]	133	60,5	30,2	70	40	200
Cadmium im KW- Auszug [mg/kg]	28	12,7	6,4	1	0,4	10
Chrom im KW-Auszug [mg/kg]	21	9,5	4,8	60	30	200
Kupfer im KW-Auszug [mg/kg]	62	28,2	14,1	40	20	-
Nickel im KW-Auszug [mg/kg]	22	10,0	5,0	50	15	70
Quecksilber im KW- Auszug [mg/kg]	22	10,0	5,0	0,5	0,1	5
Zink im KW-Auszug [mg/kg]	130	59,1	29,5	150	60	-

Tabelle 26: Gehalte an Nebenkontaminanten in den Mischböden im Vergleich zu Vorsorge- und Prüfwerten (Arsen-Boden und berechnete Gehalte in den Mischungen).

Fett: Werte oberhalb der Vorsorge- bzw. Prüfwerte.

	Boden	Mischungsverhältnisse			Vorsorgewerte		niedrigster Prüfwert
		B8-As	1 : 20	1 : 100	1 : 400	Lehm (IUCT)	Sand (Borstel)
Hauptkontaminant							
Arsen im KW-Auszug [mg/kg]	20400	1020	204	51,0	-	-	25
Nebenkontaminanten							
Cyanide, leicht freisetzbar [mg/kg]	4,3	0,2	< 0,1	< 0,1	-	-	50
Phenolindex nach Destillation [mg/kg]	1,5	0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Benzo(a)pyren [mg/kg]	1,8	0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	0,3	1
Summe PAK [mg/kg]	23,4	1,2	0,2	0,1	3	3	-
Summe Chlor-Pestizide [mg/kg]	0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
HCB [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	4
Summe HCH [mg/kg]	0,002	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	5
4,4'-DDT [mg/kg]	0,001	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	40
Summe PCB [mg/kg]	0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05	0,05	0,4
Blei im KW-Auszug [mg/kg]	173	8,7	1,7	0,4	70	40	200
Cadmium im KW-Auszug [mg/kg]	3	0,2	< 0,1	< 0,1	1	0,4	10
Chrom im KW-Auszug [mg/kg]	27	1,4	0,3	0,1	60	30	200
Kupfer im KW-Auszug [mg/kg]	43	2,2	0,4	0,1	40	20	-
Nickel im KW-Auszug [mg/kg]	15	0,8	0,2	< 0,1	50	15	70
Quecksilber im KW-Auszug [mg/kg]	3,8	0,2	< 0,1	< 0,1	0,5	0,1	5
Zink im KW-Auszug [mg/kg]	103	5,2	1,0	0,3	150	60	-

6.2 Ergebnisse der biologischen Untersuchungen

Die Ergebnisse sind aus Tabelle 27 bis Tabelle 44 ersichtlich.

Um die verschiedenen Schadstoffgehalte zu erhalten, wurden die kontaminierten Böden mit unkontaminierten verschnitten, wobei die verwendeten Böden Unterschiede in ihren chemisch-physikalischen Bodeneigenschaften aufwiesen. Bei der Interpretation der Reaktion der Organismen ist daher bei einer derartigen Vorgehensweise zu berücksichtigen, daß neben einem Schadstoffeinfluß chemisch-physikalische Bodeneigenschaften (z.B.: höhere Nährstoffgehalte) eine Rolle spielen können. Dies betrifft bei den verwendeten Testsystemen primär den Pflanzentest sowie die mikrobiologischen Untersuchungen. Bei dem Regenwurm- und dem Nematotentest werden die Organismen gefüttert, wodurch Nährstoffeffekte eine untergeordnetere Rolle spielen sollten.

Bei den beiden erstgenannten Verfahren sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- fördernde Eigenschaften in dem unkontaminierten Boden im Vergleich zu dem kontaminierten Boden
Folge: Mit steigendem Anteil an kontaminiertem Boden nimmt auch der Nährstoffgehalt ab. Detektierte Effekte können sowohl auf den Nährstoffgehalt als auch auf den Schadstoff zurückzuführen sein.
- bessere Bodeneigenschaften (z.B.: Nährstoffgehalte) in dem kontaminierten Boden im Vergleich zu dem unkontaminierten Boden
Folge: Je größer der Anteil an kontaminiertem Boden ist, desto höher ist auch der Nährstoffgehalt. Die Schadstoffwirkung, detektiert als Effekt bei den Organismen im Vergleich zu dem unbelasteten Kontrollboden, kann zumindest teilweise kompensiert bzw. überdeckt/überlagert werden.

In dem vorliegenden Projekt wurde versucht, den Anteil an kontaminiertem Boden im Vergleich zu dem unkontaminierten Boden gering zu halten. Nur bei den Untersuchungen zu Benzo(a)pyren wird mit einem Verhältnis von Altlast zu Mischung von 1 zu 2,2 bzw. von 1 zu 4,4 ein relativ hoher Anteil an „Fremdboden“ erzielt.

Als Schadstoff-bedingte Effekte werden im folgenden bezeichnet:

- Auftreten einer Dosis-Wirkungs-Beziehung (steigender Schadstoffgehalt - steigende Hemmung) bei dem Nematoden- und dem Regenwurmtest
- steigende Hemmung mit steigendem Schadstoffgehalt bei dem Pflanzentest und den mikrobiologischen Untersuchungen, wenn das Verhältnis von kontaminiertem Boden zu unkontaminiertem Boden (nur geringer Anteil an kontaminiertem Boden) keinen Einfluß infolge stark limitierter Nährstoffe im kontaminierten Boden erwarten läßt; bei einem hohen Anteil an Schadstoff-belastetem Boden ist dies gesondert zu betrachten und zu diskutieren.

6.2.1 Schadstoff: Cadmium

6.2.1.1 Pflanzentest

(Tabelle 27 bis Tabelle 30)

Ein hemmender Einfluß infolge der Schadstoffe konnte im Pflanzentest nicht festgestellt werden. Es wurde sowohl Hemmung als auch Stimulation beobachtet, die jedoch vermutlich auf natürliche Schwankungen zurückzuführen sind, da keinerlei Zusammenhang mit Schad- oder Nährstoffgehalten konstruierbar ist. Dies sei an dem Beispiel von *Avena sativa* und dem Testansatz mit IUCT-Boden näher erläutert:

Niedrigster Schadstoffgehalt (40 µg/kg Ammoniumnitratextrakt)

mit sehr geringem Bodenanteil: Stimulation

15 mg/kg: Hemmung

50 mg/kg: Hemmung, aber schwächer als bei 15 mg/kg

300 mg/kg: Stimulation

Tabelle 27: Pflanzentest mit *Avena sativa*; Schadstoff: Cadmium; Borstel-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A 40 (μ g AN/kg)	B 15	C 50	D 300
	Topf Nr.				
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1 10 2 10 3 10	10 10 10	9 10 10	9 9 9	10 9 9
Keimrate (%)	100	100	97	90	93
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1 2,447 2 2,587 3 2,623	2,477 2,623 2,570	2,019 2,217 2,501	2,030 2,106 2,234	2,435 2,065 2,275
Mittelwert (g) Standardabweichung	2,552 0,093	2,557 0,074	2,246 0,242	2,123 0,103	2,258 0,186
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)		- 0,2	12	17	12
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1 0,245 2 0,259 3 0,262	0,248 0,262 0,257	0,224 0,222 0,250	0,226 0,234 0,248	0,244 0,229 0,253
Mittelwert (g) Standardabweichung	0,255 0,009	0,256 0,007	0,232 0,016	0,236 0,011	0,242 0,012
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)		-0,2	9	8	5

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 28: Pflanzentest mit *Brassica rapa*; Schadstoff: Cadmium; Borstel-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	Topf Nr.	K 0	A 40	B 15	C 50	D 300
		(µg AN/kg)				
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1	10	10	9	9	9
	2	8	9	8	10	9
	3	9	8	8	9	8
Keimrate (%)		90	90	83	93	87
Frischgewicht pro Topf (g)	1	0,974	1,466	0,942	1,188	1,401
	2	1,057	1,350	0,746	1,048	1,598
	3	1,259	1,361	0,938	0,800	1,557
Mittelwert (g)		1,097	1,392	0,875	1,012	1,519
Standardabweichung		0,147	0,064	0,112	0,196	0,104
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)			-27	20	8	-39
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,097	0,147	0,105	0,132	0,156
	2	0,132	0,150	0,093	0,105	0,178
	3	0,140	0,170	0,117	0,089	0,195
Mittelwert (g)		0,136	0,160	0,105	0,097	0,186
Standardabweichung		0,005	0,014	0,017	0,011	0,012
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)			-18	23	29	-37

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 29: Pflanzentest mit *Avena sativa*; Schadstoff: Cadmium; IUCT-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A (μ g AN/kg)	B 15	C 50	D 300
Topf Nr.					
1	10	10	8	10	9
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	2	10	10	10	10
3	9	10	10	10	10
4	10	10	10	9	10
Keimrate (%)	98	100	95	98	98
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1	2,311	2,093	1,575	2,008
2	2,025	2,172	1,780	2,021	2,245
3	2,030	2,343	1,945	2,227	2,380
4	2,031	1,942	1,866	1,715	2,255
Mittelwert (g)		2,099	2,138	1,792	1,993
Standardabweichung		0,141	0,167	0,159	0,211
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)		- 2	15	5	- 5
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,231	0,209	0,197	0,201
2	0,203	0,217	0,178	0,202	0,225
3	0,226	0,234	0,195	0,223	0,238
4	0,203	0,194	0,187	0,191	0,226
Mittelwert (g)		0,216	0,214	0,189	0,204
Standardabweichung		0,015	0,017	0,009	0,013
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)		1	12	5	5

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 30: Pflanzentest mit *Brassica rapa*; Schadstoff: Cadmium; IUCT-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	B 40 (μ g AN/kg)	A 15	C 50	D 300
	Topf Nr.				
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1 2 3 4	6 9 9 5	8 7 8 9	9 7 9 9	9 9 8 7
Keimrate (%)		73	80	85	80
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1 2 3 4	1,023 1,236 1,165 0,895	1,119 1,009 1,163 1,233	0,944 0,915 1,248 1,023	0,657 0,999 0,682 0,593
Mittelwert (g)		1,080	1,131	1,033	0,733
Standardabweichung		0,152	0,094	0,151	0,181
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)			- 5	4	32
					- 37
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1 2 3 4	0,171 0,137 0,129 0,179	0,140 0,144 0,145 0,137	0,105 0,131 0,139 0,114	0,073 0,111 0,114 0,074
Mittelwert (g)		0,154	0,142	0,122	0,093
Standardabweichung		0,024	0,004	0,015	0,022
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)			8	21	40
					- 16

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

6.2.1.2 Nematodentest

(Tabelle 31)

Bei dem Nematodentest wurden teilweise Vermehrungsfaktoren kleiner als eins ermittelt. Diese scheinen nicht auf Mortalität hinzuweisen, sondern lassen darauf schließen, daß in diesen Proben keine vollständige Extraktion der Nematoden erfolgt ist, da keine Dosis-Wirkungs-Beziehung zu erkennen ist. So weist beispielsweise die Mischung mit Borstel-Boden in den Ansätzen im Hinblick auf den Ammoniumnitrat-Gehalt, die einen sehr geringen Anteil an kontaminiertem Boden enthielt, Reproduktionswerte größer als eins auf, in der Kontrolle dagegen kleiner als eins. Die Vermehrungswerte in den Ansätzen mit 15 mg/kg liegen wiederum niedriger als eins, in den Ansätzen mit 50 mg/kg werden dagegen höhere ermittelt. Ähnlich liegen die Verhältnisse in den Mischungen mit IUCT-Boden, auch wenn hier nie Werte größer als eins erhalten wurden.

Im Hinblick auf die Beurteilung möglicher Schadstoffeffekte wird jedoch davon ausgegangen, daß toxische Effekte sich in Form einer Dosis-Wirkungs-Beziehung dargestellt hätten, auch wenn nicht 100 % aller Nematoden extrahiert worden sind, so daß die Schlußfolgerung gezogen wird, daß ein toxischer Einfluß von Cadmium auf die Nematoden nicht vorlag.

Tabelle 31: Wirkung auf Mikroorganismen, Regenwürmer und Nematoden; Schadstoff: Cadmium.

Ansätze		TG	pH - Wert	NO ₂ -N (Nitrifikation) [ng/g TS/min]	basal	SIR (*) [µg/g/h]	Peak _{max} [h]	Mortalität [%]	Regenwurm-Reprotost Nachkommen [Anzahl pro Testgefäß]	Nematoden- anzahl Vermehrungs- faktor	
B	Cd-Borstel-0	87,2	6,4	5,6	1,91 ± 0,05	0,57 ± 0,07	4,4 ± 1,0	47,0 ± 0,0	0	229 ± 20	0,5 ± 0,14
O	Cd-Borstel-15 KW	87,0	6,5	5,6	0,58 ± 0,03	0,52 ± 0,04	5,3 ± 0,2	47,0 ± 0,0	6,7	174 ± 43	0,8 ± 0,27
D	Cd-Borstel-50 KW	86,5	6,6	5,9	0,77 ± 0,05	0,60 ± 0,05	5,9 ± 0,4	47,0 ± 0,0	0	158 ± 16	1,4 ± 0,31
E	Cd-Borstel-300 KW	82,0	6,7	6,3	1,64 ± 0,05	0,84 ± 0,07	8,3 - **)	46,0 - **)	3,3	91 ± 23	1,1 ± 0,16
N	Cd-AN-Borstel-40	87,2	6,5	5,7	0,62 ± 0,09	0,51 ± 0,06	5,5 ± 0,7	47,0 ± 0	26,7	253 ± 50	1,3 ± 0,08
1											
B	Cd-IUCT-0	75,3	5,8	5,1	1,62 ± 0,05	1,79 ± 0,14	15,4 ± 1,0	31,0 ± 0,0	6,7	259 ± 31	0,4 ± 0,16
O	Cd-IUCT-15 KW	75,9	6,0	5,2	1,75 ± 0,03	1,76 ± 0,14	13,5 ± 0,7	31,0 ± 0,0	16,7	184 ± 49	0,7 ± 0,14
D	Cd-IUCT-50 KW	75,0	6,3	5,8	2,44 ± 0,23	1,80 ± 0,15	19,1 ± 0,3	31,0 ± 0,0	3,3	207 ± 30	0,9 ± 0,21
E	Cd-IUCT-300 KW	72,5	6,5	6,1	3,11 ± 0,11	1,85 ± 0,07	21,2 ± 0,4	31,0 ± 0,0	13,3	132 ± 20	0,5 ± 0,07
N											
2	Cd-AN-IUCT-40	75,0	5,8	5,1	1,55 ± 0,03	2,03 ± 0,52	16,8 ± 0,4	31,0 ± 0,0	43,3	232 ± 14	0,7 ± 0,28

(*) = substratinduzierte Atmung

BODEN 1 = Borstel-Boden

BODEN 2 = IUCT-Boden

**) nur ein Meßwert

Tabelle 32: Wirkung auf Mikroorganismen; Schadstoff: Cadmium; Inkubationsdauer der Bodenmischung bis zum Testansatz 56 Tage.

Ansätze	TG [%]	pH - Wert	[H ₂ O] [CaCl ₂]	NO ₂ -N (Nitrifikation) [ng/g TS/min]	mikrob. Atmungsaktivität		Peak _{max} [h] II
					basal [µg/g/h]	SIR (*) [µg/g/h]	
B	Cd-Borstel-0	87,1	6,1	5,4	0,77 ± 0,12	0,29 ± 0,06	4,8 ± 0,8 52,3 ± 0,5 -
O	Cd-Borstel-15 KW	87,6	6,5	5,9	0,84 ± 0,06	0,36 ± 0,04	3,9 ± 0,3 49,0 ± 1,0 -
D	Cd-Borstel-50 KW	86,4	6,8	6,3	1,14 ± 0,08	0,38 ± 0,06	4,1 ± 0,1 49,5 ± 1,3 -
E	Cd-Borstel-300 KW	81,7	7,1	6,6	2,04 ± 0,14	0,43 ± 0,04	4,7 ± 0,3 51,3 ± 2,9 -
1	Cd-AN-Borstel-40	86,8	6,2	5,5	0,72 ± 0,15	0,58 ± 0,22	8,2 ± 0,4 n.a. (**) -
B	Cd-IUCT-0	76,2	5,7	5,1	2,38 ± 0,10	0,71 ± 0,06	11,6 ± 1,0 38,8 ± 1,0 -
O	Cd-IUCT-15 KW	73,9	5,8	5,2	2,48 ± 0,04	0,80 ± 0,05	11,5 ± 0,8 43,0 ± 1,8 -
D	Cd-IUCT-50 KW	73,9	6,5	6,2	4,68 ± 0,16	0,86 ± 0,03	10,5 ± 0,6 25,0 ± 0,8 39,5 ± 2,1 -
E	Cd-IUCT-300 KW	71,2	6,9	6,6	4,82 ± 0,38	0,95 ± 0,04	15,8 ± 0,6 28,5 ± 0,6 42,5 ± 1,3 -
2	Cd-AN-IUCT-40	75,4	5,7	5,1	2,27 ± 0,01	1,08 ± 0,02	17,5 ± 0,3 38,8 ± 1,0 -

(*) = substratinduzierte Atmung

(**) = 2 Proben Doppelpeak, 1 Probe Einfachpeak

BODEN 1 = Borstel-Boden

BODEN 2 = IUCT-Boden

6.2.1.3 Regenwurmtest

(Tabelle 31)

Im Ansatz mit dem geringsten Anteil an kontaminiertem Boden wurde eine auffallend hohe Mortalitätsrate erhalten (27 % mit Borstel-Boden; 43 % mit IUCT-Boden), die sich jedoch auf die Anzahl an Jungtieren nicht auswirkte. Da im Ansatz mit 15 mg Cd/kg, der einen höheren Anteil an kontaminiertem Boden enthielt, keine entsprechende Mortalitätsrate zu verzeichnen war, ist die Annahme, daß die Sterblichkeit auf den Cadmiumgehalt zurückzuführen ist, nicht gerechtfertigt.

Deutliche Effekte, die auch eine Abhängigkeit vom Schadstoffgehalt erkennen ließen, traten dagegen bei der Reproduktionsrate in den übrigen Ansätzen auf. So waren in der Mischung mit Borstel-Boden sowohl bei einem Gehalt von 50 mg/kg als auch von 300 mg/kg, in der Mischung mit IUCT-Boden zumindest bei 300 mg/kg statistisch signifikante Unterschiede zu erkennen ($p = 0,01$). Die Reduktion der Nachkommenanzahl betrug 31 % bzw. 60 % (Mischung mit Borstel-Boden: 50 mg/kg bzw. 300 mg/kg) und 49 % (Mischung mit IUCT-Boden: 300 mg/kg). Aufgrund des weiten Mischungsverhältnisses (1 in 34) bei dem Ansatz mit dem nominalen Cd-Gehalt von 50 mg/kg sollte eine Veränderung der Bodenstruktur durch die Mischung im Vergleich zur Kontrolle zumindest bei diesem Ansatz keinen nennenswerten Einfluß auf die Ergebnisse ausgeübt haben.

6.2.1.4 Nitrifikation, Mikrobielle Atmung

(Tabelle 31, Tabelle 32)

Ein hemmender Einfluß des Schadstoffs auf die Nitrifikation konnte nicht festgestellt werden. Nach 56 Tagen zeigten beide Ansätze (Borstel-Boden und IUCT-Boden) mit steigenden Anteilen an kontaminiertem Boden auch steigende Nitrifikationsraten. An Tag 0 war dies ebenfalls in der Mischung mit IUCT-Boden zu beobachten. Nicht ganz konsistent ist der Ansatz mit dem Boden von Borstel an Tag 0. Parallel zu dem steigenden Anteil an kontaminiertem Boden stieg auch die Nitrifikationsaktivität an. Der Kontrollansatz wies hingegen im Verhältnis zu dem Ansatz mit der geringsten Zumischung von Borstel-Boden (kontaminiert Boden zu Borstel-Boden im Verhältnis von 1 zu 250) eine vergleichsweise hohe Nitrifikationsaktivität auf. Es ist daher zu vermuten, daß der Kontrollwert ein Meßartefakt darstellt, was sich mit den Ergebnissen der Mischungen an Tag 56 decken würde.

In einem Kontrollexperiment wurde exemplarisch Cadmiumnitrat in den Nominalgehalten 15, 50 und 300 mg Cd²⁺/kg zu IUCT-Boden zugegeben. Dabei wurde eine Dosis-Wirkungs-Beziehung erhalten, die bei dem höchsten Gehalt zu einer Hemmung von 26 % führte. Es ist somit anzunehmen, daß die Stimulation der Nitrifikation nicht auf den Schadstoff, sondern, trotz der geringen zugemischten Bodenmengen, auf fördernde chemisch-physikalische Bodeneigenschaften bzw. auf einen höheren Anteil an Nitrifikanten im Cd-haltigen Boden im Vergleich zu den Kontrollböden zurückzuführen ist. Als Nährstoffe wurden Phosphat, Ammonium und Nitrat untersucht. Nur Nitrat wies im Eluat des belasteten Bodens einen deutlich höheren Gehalt (154 mg/l) auf als in Borstel-Boden (15 mg/l) und IUCT-Boden (9,1 mg/l), was als Indiz für eine höhere Nitrifikationsrate im Cd-Boden gelten könnte. Analog zur Nitrifikation wurde auch in der

mikrobiellen Atmung sowie mit und ohne Glucosezusatz eine Stimulation verzeichnet. Auffälligkeiten im Hinblick auf den Zeitpunkt des Peakmaximums bei der substratinduzierten Atmung wurden an Tag 0 nicht verzeichnet. An Tag 56 traten bei den Gehalten 50 mg/kg und 300 mg/kg (Mischung mit IUCT-Boden) zwei Peakmaxima auf, wobei der Zeitpunkt des zweiten Maximums mit dem Zeitpunkt des Peakmaximums in den anderen Proben vergleichbar war. Eine Erklärung für das erste Maximum kann nicht gegeben werden. Eine derartige Beobachtung wurde jedoch bereits bei einigen Proben gemacht (Winkel, persönl. Mitteilung).

6.2.1.5 Gesamtfazit: Cadmium

Als Prüfwerte werden für Cadmium vorgeschlagen (Bachmann et al., 1997):

Kinderspielplatz.	10 mg/kg
Wohngebiete:	20 mg/kg
Park- und Freizeitanlagen:	50 mg/kg
Ackerbau, Gartenbau, Nutzgarten:	40 µg/kg / Ammoniumnitrat-Extrakt.

Im Hinblick auf die Stellvertreterorganismen „Mikroorganismen“, „Nematoden“ und „Pflanzen“ sollte mit dem festgelegten Prüfwert von 50 mg/kg sowie 40 µg AN/kg ein ausreichender Schutz der Lebensraumfunktion gegeben sein.

Im Hinblick auf die Reproduktionsrate bei Regenwürmern waren bei dem Prüfwert von 50 mg/kg in der Mischung mit dem sandigen Boden (Borstel-Boden) statistisch signifikante Effekte nachweisbar, die sich in einer um 31 % verminderten Reproduktionsrate äußerten. In dem lehmigen Boden mit höherer Sorptionskapazität waren bei diesem Wert jedoch noch keine statistisch absicherbaren Effekte festzustellen. Aufgrund dieser Ergebnisse muß jedoch das Fazit gezogen werden, daß die Lebensraumfunktion für Regenwürmer, erfaßt über den Kompostwurm *Eisenia fetida*, in leichten Böden bei dem vorliegenden Prüfwert für Park- und Freizeitanlagen beeinträchtigt sein könnte.

6.2.2 Schadstoff: Arsen

6.2.2.1 Pflanzentest

(Tabelle 33 bis Tabelle 36)

Bei dem höchsten Schadstoffgehalt (1000 mg/kg) war bei beiden Pflanzen (*Avena sativa*, *Brassica rapa*), beiden Auswertungsparametern (Gesamtbiomasse und Biomasse pro Pflanze) und beiden Bodenmischungen (Mischung mit Borstel-Boden bzw. IUCT-Boden) eine statistisch signifikante Reduktion der Biomasseproduktion zu verzeichnen ($p = 0,05$; Ausnahme: Gesamtbiomasse von *Brassica rapa* in Borstel-Boden und IUCT-Boden: $p = 0,01$). Bei den Gehalten von 50 und 200 mg/kg konnten keine statistisch signifikanten Hemmungen im Pflanzenwachstum beobachtet werden. Da zum einen die untersuchten Hauptnährstoffe in ähnlichen Größenordnungen auftraten wie in Borstel-Boden und IUCT-Boden und zum anderen der Anteil an Schadstoffbelastetem Boden in der Mischung mit 1 zu 20 recht gering ist, so daß veränderte Bodeneigenschaften von untergeordneter Bedeutung sein sollten, erscheint es als sehr wahrscheinlich, daß die detektierte Wirkung auf Arsen bzw. die Nebenkontaminanten zurückzuführen ist. Dies würde

sich auch mit Untersuchungen von Jiang und Singh (1994) decken, in denen eine NOEC von 10 – 50 mg As/kg für Gerste und Roggen bestimmt wurde (Bachmann et al., 1997).

Tabelle 33: Pflanzentest mit *Avena sativa*; Schadstoff: Arsen; Borstel-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A 50	B 200	C 1000	
Topf Nr.					
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1 2 3 4	8 10 10 9	10 10 10 10	10 8 8 9	10 10 8 10
Keimrate (%)		93	100	88	95
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1 2 3 4	1,322 2,498 2,285 1,969	2,210 2,485 2,464 1,969	1,628 1,412 1,647 1,837	1,186 1,034 0,836 1,034
Mittelwert (g)		2,019	2,282	1,631	1,023
Standardabweichung		0,513	0,243	0,174	0,144
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *			- 13	19	49
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1 2 3 4	0,165 0,250 0,229 0,219	0,221 0,249 0,246 0,197	0,163 0,177 0,206 0,204	0,119 0,103 0,105 0,103
Mittelwert (g)		0,216	0,228	0,187	0,107
Standardabweichung		0,036	0,024	0,021	0,007
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *			- 6	13	50

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 34: Pflanzentest mit *Brassica rapa*; Schadstoff: Arsen; Borstel-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A 50	B 200	C 1000
Topf Nr.	1	9	8	10
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	2	9	10	10
	3	8	8	9
	4	9	7	10
		88	83	98
Keimrate (%)				73
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1	1,292	1,313	1,527
	2	1,369	1,574	1,761
	3	0,831	1,418	1,500
	4	0,948	1,049	1,740
Mittelwert (g)		1,110	1,339	1,632
Standardabweichung		0,261	0,221	0,138
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)			- 21	- 47
				50
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,144	0,164	0,153
	2	0,152	0,157	0,176
	3	0,104	0,177	0,167
	4	0,105	0,150	0,174
Mittelwert (g)		0,126	0,162	0,167
Standardabweichung		0,025	0,012	0,011
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)			-28	-33
				38

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 35: Pflanzentest mit *Avena sativa*; Schadstoff: Arsen; IUCT-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A 50	B 200	C 1000
Topf Nr.	1	10	10	10
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	2	10	10	10
	3	10	10	9
	4	9	10	9
Keimrate (%)		98	100	100
				95
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1	2,471	2,066	1,976
	2	1,990	1,863	1,945
	3	2,086	1,999	1,960
	4	1,857	1,632	2,092
Mittelwert (g)		2,101	1,890	1,993
Standardabweichung		0,264	0,192	0,067
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)			10	5
				27
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,247	0,207	0,198
	2	0,199	0,186	0,195
	3	0,209	0,200	0,196
	4	0,206	0,163	0,209
Mittelwert (g)		0,215	0,189	0,199
Standardabweichung		0,022	0,019	0,007
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%)			12	7
				25

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 36: Pflanzentest mit *Brassica rapa*; Schadstoff: Arsen; IUCT-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A 50	B 200	C 1000
Topf Nr.	1	9	9	10
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	2	9	7	8
	3	8	8	8
	4	7	7	8
Keimrate (%)		83	78	83
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1	1,136	0,921	1,076
	2	0,711	0,782	1,154
	3	1,132	0,666	1,170
	4	0,940	0,740	1,102
Mittelwert (g)		0,980	0,777	1,126
Standardabweichung		0,201	0,107	0,044
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%)			21	-15
				45
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,126	0,102	0,108
	2	0,079	0,112	0,144
	3	0,142	0,083	0,146
	4	0,134	0,106	0,157
Mittelwert (g)		0,120	0,101	0,139
Standardabweichung		0,028	0,012	0,022
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%)			16	-15
				42

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

6.2.2.2 Nematodentest

(Tabelle 37)

Auf die Nematoden war kein statistisch signifikanter hemmender Effekt durch den belasteten Boden im Vergleich zu IUCT-Boden bzw. Borstel-Boden zu verzeichnen. Im Ansatz mit IUCT-Boden konnte bei dem höchsten Schadstoffgehalt zwar im Mittel eine deutlich reduzierte Vermehrungsrate festgestellt werden, die sich jedoch aufgrund der hohen Standardabweichung statistisch nicht signifikant auswirkte.

Tabelle 37: Wirkung auf Mikroorganismen, Regenwürmer und Nematoden; Schadstoff: Arsen

Ansätze		TG	pH - Wert	NO ₂ -N (Nitritifikation) [ng/g TS/min]	basal [µg/g/h]	SIR (*) [µg/g/h]	Peak _{max} [h]	Mortalität [%]	Regenwurm-Reprotost Nachkommen [Anzahl pro Testgefäß]	Nematoden- anzahl Vermehrungs- faktor	
B	As-Borstel-0	85,8	6,5	5,8	1,05 ± 0,13	0,55 ± 0,05	5,6 ± 0,2	61,0 ± 0,0	3,3	184 ± 40	0,4 ± 0,23
O	As-Borstel-50 KW	88,4	6,6	5,9	1,18 ± 0,14	0,45 ± 0,03	5,8 ± 0,2	40,0 ± 0,0	0,0	145 ± 12	1,1 ± 0,13
E	As-Borstel-200 KW	88,3	6,7	6,1	1,30 ± 0,17	0,73 ± 0,18	5,7 ± 0,4	40,0 ± 0,0	3,3	125 ± 8	1,0 ± 0,39
N	As-Borstel-1000 KW	87,5	7,3	6,8	1,20 ± 0,16	0,84 ± 0,14	6,0 ± 0,2	40,0 ± 0,0	13,3	35 ± 14	0,5 ± 0,27
B	As IUCT-0	75,4	6,0	5,4	1,69 ± 0,21	1,62 ± 0,23	18,0 ± 0,7	37,5 ± 2,6	23,3	218 ± 30	1,4 ± 0,41
O	As IUCT-50 KW	75,2	6,2	5,5	1,28 ± 0,16	1,76 ± 0,07	16,7 ± 1,5	36,3 ± 1,0	33,3	233 ± 65	2,0 ± 0,33
E	As IUCT-200 KW	75,9	6,4	5,7	2,33 ± 0,07	1,75 ± 0,16	17,7 ± 1,5	33,5 ± 1,7	20,0	177 ± 35	1,7 ± 0,50
N	As IUCT-1000 KW	76,2	7,1	6,6	2,58 ± 0,13	1,74 ± 0,11	17,7 ± 1,0	30,3 ± 1,0	13,3	105 ± 20	0,5 ± 0,39

(*) = substratinduzierte Atmung

BODEN 1 = Borstel-Boden

BODEN 2 = IUCT-Boden

Tabelle 38: Wirkung auf Mikroorganismen; Schadstoff: Arsen, Inkubationsdauer der Bodenmischung bis zum Testansatz 56 Tage.

Ansätze	TG [%]	pH - Wert [H ₂ O]	NO ₂ -N (Nitrifikation) [ng/g TS/min]	mikrob. Atmungsaktivität		Peak _{max} [h]					
				basal [µg/g/h]	SIR (*) [µg/g/h]						
B O D E N 1	As-Borstel-0 85,5 88,3 88,3 87,4	6,1 6,2 6,4 7,2	5,5 5,6 5,9 6,8	0,78 0,92 0,93 0,75	± 0,04 ± 0,03 ± 0,10 ± 0,04	0,25 0,23 0,25 0,30	± 0,03 ± 0,02 ± 0,03 ± 0,02	3,7 4,4 4,6 4,3	± 0,3 ± 0,6 ± 0,4 ± 0,2	61,0 n.a. (**) 40,0 n.a. (**)	± 0,0 0,0 0,0 0,0
B O D E N 2	As-IUCT-0 74,8 75,0 75,9 76,2	5,7 5,7 6,1 6,9	5,0 5,1 5,5 6,5	1,94 2,72 3,68 4,71	± 0,16 ± 0,10 ± 0,12 ± 0,20	0,62 0,69 0,75 0,88	± 0,03 ± 0,06 ± 0,04 ± 0,03	9,8 9,9 12,2 12,2	± 0,4 ± 0,6 ± 1,3 ± 1,0	42,0 42,0 42,0 n.a. (**)	± 0,0 0,0 0,0 0,0

(*) = substratinduzierte Atmung

n.a. (**) = mehrere Peaks, nicht eindeutig zu interpretieren

BODEN 1 = Borstel-Boden

BODEN 2 = IUCT-Boden

6.2.2.3 Regenwurmtest

(Tabelle 37)

Eine geringfügige Mortalität konnte in den einzelnen Ansätzen verzeichnet werden, doch war keine Dosis-Wirkungs-Beziehung festzustellen, so daß die Schlußfolgerung gezogen werden kann, daß der Schadstoff Arsen in den untersuchten Gehalten keinen signifikanten Effekt auf die Würmer ausgeübt hat.

In der Nachkommenanzahl waren dagegen signifikante Unterschiede zwischen Arsen-belasteten Ansätzen und dem Kontrollansatz zu verzeichnen. So konnten statistisch signifikante Unterschiede in den Ansätzen mit Borstel-Boden bei den Gehalten 200 mg/kg ($p = 0,01$) und 1000 mg/kg ($p = 0,001$) sowie in den Ansätzen mit IUCT-Boden bei 1000 mg/kg ($p = 0,001$) erzielt werden. Die Reduktion der Nachkommenanzahl betrug 32 % bzw. 81 % (Mischung mit Borstel-Boden: 200 mg/kg bzw. 1000 mg/kg) und 52 % (Mischung mit IUCT-Boden: 1000 mg/kg). Aufgrund des weiten Mischungsverhältnisses (1 in 100) bei dem Ansatz mit dem nominalen As-Gehalt von 200 mg/kg sollte eine Veränderung der Bodenstruktur durch die Mischung im Vergleich zur Kontrolle zumindest bei diesem Ansatz keinen nennenswerten Einfluß auf die Ergebnisse ausgeübt haben.

6.2.2.4 Nitrifikation, Mikrobielle Atmung

(Tabelle 37, Tabelle 38)

Weder in der potentiellen Ammoniumoxidation noch in der mikrobiellen Atmung konnte bei einem der Ansätze ein Hinweis auf toxische Effekte erhalten werden. Nach einer Inkubationsdauer von 56 Tagen war bei allen mikrobiellen Aktivitäten eine vom Schadstoffgehalt abhängige Stimulation zu verzeichnen. An Tag 0 war dies noch nicht so deutlich ausgeprägt. An Tag 0 ließ der Zeitpunkt des Peakmaximums bei der substratinduzierten Atmung keine Besonderheiten erkennen. An Tag 56 war eine Auswertung teilweise nicht möglich, da mehrere, teilweise recht kleine Maxima auftraten. Für eine endgültige Interpretation sollten die Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes „Ökotoxikologische Testbatterien“ abgewartet werden. Für die Bewertung im Rahmen des vorliegenden Projektes werden daher die Ergebnisse im Hinblick auf den Zeitpunkt des Peakmaximums nicht einbezogen.

6.2.2.5 Gesamtfazit: Arsen

Als Prüfwerte für Arsen werden

25 mg/kg	für Kinderspielflächen,
50 mg/kg	für Wohngebiete,
125 mg/kg	für Park- und Freizeitanlagen und
200 mg/kg	für Ackerbau, Nutzgarten

angegeben (Bachmann et al., 1997). Im Hinblick auf die untersuchten Stellvertreterorganismen „Pflanzen“, „Nematoden“ und „Mikroorganismen“ sollte mit diesen Werten auch ein ausreichender Schutz der Lebensraumfunktion gegeben sein. Die Reproduktionsrate der Regenwürmer war bei den Mischungen mit dem Borstel-Boden auch bei Gehalten von 200 mg/kg statistisch signifikant reduziert. Wie bereits bei Cadmium dargestellt, könnte die Lebenraumfunktion für Regenwürmer, erfaßt über den Kompostwurm *Eisenia fetida*, in leichten Böden bei dem vorliegenden Prüfwert für Ackerbau und Nutzgarten (200 mg/kg) beeinträchtigt sein. Da der Prüfwert für Park- und Freizeitflächen mit 125 mg/kg deutlich niedriger liegt, könnte bei derartigen Gehalten die Beeinträchtigung für diese Organismengruppe jedoch geringer sein.

6.2.3 Schadstoff: Benzo(a)pyren

6.2.3.1 Pflanzentest

(Tabelle 39 bis Tabelle 42)

Im Pflanzentest waren teilweise starke Wachstumsstimulationen zu verzeichnen, wobei die Stimulation in den Ansätzen mit dem geringeren Schadstoffgehalt (geringere Bodenbeimischung) höher ausfielen, als in den Ansätzen mit den höheren Schadstoffgehalten. Eine statistisch signifikante Hemmung ($p = 0,05$) trat nur bei dem Frischgewicht pro Pflanze (*Brassica rapa*) im Ansatz mit Borstel-Boden (20 mg/kg) auf. Auf die Gesamtbiomasse bezogen, waren die Unterschiede jedoch nicht statistisch absicherbar.

Tabelle 39: Pflanzentest mit *Avena sativa*; Schadstoff: Benzo(a)pyren; Borstel-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	Topf Nr.	K	A	B
		0	10	20
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1	10	10	10
	2	5	10	10
	3	9	10	9
	4	5	9	9
Keimrate (%)		73	98	95
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1	2,108	2,343	2,472
	2	1,224	2,487	1,993
	3	2,161	2,666	2,019
	4	1,438	2,313	2,395
Mittelwert (g)		1,733	2,452	2,220
Standardabweichung		0,473	0,161	0,249
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)			- 42	- 28
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,211	0,234	0,247
	2	0,245	0,249	0,199
	3	0,240	0,267	0,224
	4	0,288	0,257	0,266
Mittelwert (g)		0,246	0,252	0,234
Standardabweichung		0,032	0,014	0,029
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)			-2	5

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 40: Pflanzentest mit *Brassica rapa*; Schadstoff: Benzo(a)pyren; Borstel-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	Topf Nr.			
	K 0	A 10	B 20	
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1 2 3 4	6 8 8 7	10 6 7 8	8 10 8 7
Keimrate (%)		73	78	83
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1 2 3 4	1,408 1,425 1,300 1,113	1,424 1,166 1,034 1,644	1,043 1,284 0,868 1,102
Mittelwert (g)		1,312	1,317	1,074
Standardabweichung		0,143	0,272	0,172
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *			- 0,4	18
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1 2 3 4	0,235 0,178 0,163 0,159	0,142 0,194 0,148 0,206	0,130 0,128 0,109 0,157
Mittelwert (g)		0,184	0,172	0,131
Standardabweichung		0,035	0,032	0,020
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%)			6	29

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 41: Pflanzentest mit *Avena sativa*; Schadstoff: Benzo(a)pyren; IUCT-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K	A	B
	0	10	20
Topf Nr.			
	1	10	10
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	2	10	10
	3	10	10
	4	10	10
Keimrate (%)		100	100
			100
	1	1,952	2,641
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	2	1,793	2,974
	3	1,859	2,251
	4	2,214	2,942
Mittelwert (g)		1,955	2,702
Standardabweichung		0,185	0,336
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)		- 38	- 29
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1	0,195	0,264
	2	0,179	0,297
	3	0,186	0,225
	4	0,221	0,294
Mittelwert (g)		0,195	0,270
Standardabweichung		0,018	0,034
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%)		-38	-29

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

Tabelle 42: Pflanzentest mit *Brassica rapa*; Schadstoff: Benzo(a)pyren; IUCT-Boden.

Nominaler Schadstoffgehalt Substanz (mg/kg Boden)	K 0	A 10	B 20	
Topf Nr.				
Aufgewachsene Pflanzen pro Topf	1 2 3 4	6 8 7 7	7 9 8 9	8 5 8 6
Keimrate (%)		70	83	68
Frischgewicht der Pflanzen pro Topf (g)	1 2 3 4	0,627 0,805 0,573 0,638	1,428 2,036 2,076 1,926	1,432 1,115 1,057 0,844
Mittelwert (g)		0,661	1,867	1,112
Standardabweichung		0,100	0,299	0,243
% Wachstumshemmung in bezug auf K (= 100%) *)			- 183	- 68
rechnerisch ermitteltes Frischgewicht pro Pflanze (g)	1 2 3 4	0,105 0,101 0,082 0,091	0,204 0,226 0,260 0,214	0,179 0,223 0,132 0,141
Mittelwert (g)		0,095	0,226	0,169
Standardabweichung		0,010	0,024	0,042
% Wachstumshemmung in bezug auf K (=100%) *)			-139	-78

*) Minuswerte bedeuten Wachstumsförderung

6.2.3.2 Nematodentest

(Tabelle 43)

Ein hemmender Einfluß auf die Nematoden durch den Benzo(a)pyren-haltigen Boden im Vergleich zu Borstel-Boden und IUCT-Boden konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 43: Wirkung auf Mikroorganismen, Regenwürmer und Nematoden; Schadstoff: Benzo(a)pyren.

Ansätze		TG [%]	pH - Wert [H ₂ O]	NO ₂ -N (Nitrifikation) [ng/gTS/min]	mikrob. Atmungsaktivität basal [µg/g/h]	SIR (*) [µg/g/h]	Peak _{max} [h]	Regenwurm-Reprotost Mortalität Nachkommen [Anzahl pro Testgefäß] [%]	Nematoden- anzahl Vermehrungs- faktor
B	PAK-Borstel-0	88,4	6,8	6,4	1,03 ± 0,06	0,59 ± 0,07	6,5 ± 0,8	44,3 ± 2,6	0,0
D	PAK-Borstel-10	84,9	7,6	7,4	1,27 ± 0,04	0,78 ± 0,05	4,7 ± 0,6	50,0 ± 1,2	3,3
E	PAK-Borstel-20	82,7	7,7	7,5	1,87 ± 0,50	0,59 ± 0,07	3,8 ± 0,4	80,5 ± 5,1	0,0
1									
B	PAK-IUCT-0	76,1	6,7	6,0	1,75 ± 0,12	1,65 ± 0,14	16,8 ± 0,8	33,5 ± 2,5	3,3
D	PAK-IUCT-10	77,5	7,4	7,3	2,05 ± 0,33	2,37 ± 0,07	15,0 ± 1,1	35,5 ± 1,0	3,3
E	PAK-IUCT-20	76,3	7,5	7,4	2,57 ± 0,47	1,99 ± 0,12	9,0 ± 1,1	42,8 ± 2,1	3,3
2									

(*) = substratinduzierte Atmung

BODEN 1 = Borstel-Boden

BODEN 2 = IUCT-Boden

Tabelle 44: Wirkung auf Mikroorganismen; Schadstoff: Benzo(a)pyren; Inkubationsdauer der Bodenmischung bis zum Testansatz 56 Tage.

Ansätze	TG [%]	pH - Wert [H ₂ O]	[CaCl ₂]	NO ₂ -N (Nitrifikation) [mg/g TS/min]	mikrob. Atmungsaktivität		
					basal [µg/g/h]	SIR (*) [µg/g/h]	Peak _{max} [h]
B	88,3	6,1	5,7	0,69 ± 0,10	0,32 ± 0,05	5,3 ± 0,4	50,0 ± 0,8
O	PAK-Borstel-0	84,8	7,9	7,6	0,97 ± 0,07	0,46 ± 0,09	3,5 ± 0,2
D	PAK-Borstel-10	82,5	7,9	7,8	1,28 ± 0,11	0,41 ± 0,03	1,2 ± 0,6
E	PAK-Borstel-20	82,5	7,9	7,8			
N	PAK-Borstel-20	82,5	7,9	7,8			
1							
B	75,9	5,8	5,2	1,63 ± 0,73	0,76 ± 0,04	14,5 ± 0,9	36,3 ± 0,5
O	PAK-IUCT-0	77,7	7,8	7,6	2,24 ± 0,23	0,88 ± 0,05	11,7 ± 0,6
D	PAK-IUCT-10	76,3	7,9	7,7	3,72 ± 0,54	0,79 ± 0,03	5,9 ± 0,4
E	PAK-IUCT-20	76,3	7,9	7,7			
N	PAK-IUCT-20	76,3	7,9	7,7			
2							

(*) = substratinduzierte Atmung

BODEN 1 = Borstel-Boden

BODEN 2 = IUCT-Boden

6.2.3.3 Regenwurmtest

(Tabelle 43)

Nach 28 Tagen war keine Mortalität zu beobachten, die auf den schadstoffhaltigen Boden zurückgeführt werden konnte.

Nach 56 Tagen zeigte sich in den Testansätzen mit belastetem Boden eine deutlich geringere Anzahl an Jungtieren. Bei dem Ansatz mit Borstel-Boden sind die Unterschiede bei beiden Schadstoffgehalten statistisch signifikant, bei dem Ansatz mit IUCT-Boden nur bei dem höheren. Die Gewichtsentwicklung der adulten Würmer in den ersten 28 Tagen der Inkubationszeit zeigte keine Auffälligkeiten, die bereits als Hinweis auf ungünstige Lebensbedingungen und damit eine reduzierte Kokonablage gelten könnten. Im Ansatz mit Borstel-Boden nahmen die Würmer in der Kontrolle um 46 % an Gewicht zu, bei 10 mg/kg um 66 % und bei 20 mg/kg um 16 %. Im Ansatz mit IUCT-Boden wurde eine Gewichtszunahme von 30 % (Kontrolle), 28 % (10 mg/kg) bzw. 64 % (20 mg/kg) verzeichnet.

Auffallend war die sehr bindige Bodenbeschaffenheit der Benzo(a)pyren-haltigen Böden. Möglicherweise ist die Reduktion der Nachkommenanzahl nicht nur auf den Schadstoff, sondern zumindest teilweise auch auf die Bodenstruktur zurückzuführen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundvorhabens „Ökotoxikologische Testbatterien“, Teilvorhaben 4.4 „Bodenextraktionsverfahren“, das auch die Validierung des Regenwurmtestes umfaßte, konnte beispielsweise gezeigt werden, daß die Reproduktionsrate von *Eisenia fetida* in bindigeren Böden etwas niedriger liegen kann als in sandigen, die prinzipielle Eignung dieses Organismus für die Testung von Böden jedoch gegeben ist.

Die Ursache für die insgesamt auch in den Kontrollen (Borstel-Boden, IUCT-Boden) niedrige Nachkommenanzahl kann nicht angegeben werden. Der pH-Wert und die Feuchtigkeit der Kontrollen zeigten gegenüber den Kontrollen in den Ansätzen mit Cadmium- und Arsen-haltigen Böden keine Besonderheiten. Das Auftreten solcher Schwankungen ist bekannt (Römbke, persönl. Mitteilung), wobei eine Ursache in der Qualität des Rinderdungs liegen könnte, jedoch bisher nicht näher untersucht wurde.

6.2.3.4 Nitrifikation, Mikrobielle Atmung

(Tabelle 43, Tabelle 44)

Zu beiden Meßzeitpunkten wies die Nitrifikation einen leicht stimulierten Effekt auf, wobei die größte Steigerung in dem Ansatz mit 20 mg Benzo(a)pyren/kg auftrat.

In der Basalatmung waren bei 10 mg/kg erhöhte Aktivitäten zu verzeichnen, wohingegen bei der substratinduzierten Atmung in Abhängigkeit vom Schadstoffgehalt deutlich hemmende Effekte zu erkennen waren, die auch statistisch signifikant waren ($p = 0,5, 0,01$ bzw. $0,001$). Auch nach einer Inkubationszeit von 56 Tagen hatten diese nicht abgenommen. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß im Gegensatz zu den Testansätzen mit den anderen beiden Schadstoffen der kontaminierte Boden in den Mischungsansätzen in höheren Anteilen vorlag. So betrug das Mischungsverhältnis bei 10 mg Benzo(a)pyren/kg 1 Teil Altlast + 3,4 Teile Borstel-Boden bzw. IUCT-Boden; bei 20 mg/kg ergaben sich 1 Teil Altlast auf 1,2 Teile Borstel-Boden

bzw. IUCT-Boden. Neben einem Schadstoffeffekt können in diesem Fall auch veränderte Bodenparameter das Ergebnis beeinflussen. Aus Tabelle 45 ist eine Gegenüberstellung von gemessener (s. Tabelle 43 und Tabelle 44) und rechnerisch ermittelter substratinduzierter Atmungsaktivität ersichtlich. Bei der rechnerisch ermittelten Atmungsaktivität handelt es sich um einen worst case. Es wurde nur die Atmungsaktivität des unkontaminierten Mischbodens berücksichtigt. Aufgrund der Ergebnisse des 100 % Ansatzes (nur unkontaminiert Boden) wurde die Atmungsaktivität in den Mischungsansätzen unter Berücksichtigung des Verdünnungsverhältnisses berechnet. Bei dieser Vorgehensweise wird die Atmungsaktivität des kontaminierten Bodens auf Null gesetzt.

Tabelle 45: Gegenüberstellung von gemessener und rechnerisch ermittelter (worst case) substratinduzierter mikrobieller Atmungsaktivität; Schadstoff: Benzo(a)pyren.

Ansatz	Tag 0 [$\mu\text{g}^{*}(\text{g}^{*}\text{h})^{-1}$]		Tag 56 [$\mu\text{g}^{*}(\text{g}^{*}\text{h})^{-1}$]	
	experimentell	rechnerisch	experimentell	rechnerisch
Borstel 10 mg/kg	4,7	5,1	3,5	4,1
Borstel 20 mg/kg	3,8	3,5	1,2	2,9
IUCT 10 mg/kg	15,0	13,0	11,7	11,2
IUCT 20 mg/kg	9,0	9,2	5,9	7,9

Da die Aktivität des kontaminierten Bodens bei der Berechnung unberücksichtigt blieb, sollten die experimentell ermittelten Werte höher liegen. Deutlich niedrigere Werte könnten ein Indiz für einen Schadstoffeffekt darstellen. Um einen Schadstoffeffekt abzuleiten, sollte des weiteren eine Abhängigkeit vom Schadstoffgehalt gegeben sein. So sollten entweder sowohl bei den Ansätzen mit 10 als auch 20 mg/kg niedrigere gemessene Werte als die rechnerisch ermittelten vorliegen oder bei 10 mg/kg höhere gemessene und bei 20 mg/kg niedrigere gemessene Werte auftreten. Niedrigere gemessene bei 10 mg/kg und höhere bei 20 mg/kg als rechnerisch ermittelt deuten dagegen nicht auf einen Schadstoffeffekt, sondern auf Meßschwankungen hin.

Auf der Basis dieser Überlegung ist an Tag 0 kein Effekt zu prognostizieren. An Tag 56 würden die Ergebnisse eher auf einen Effekt hindeuten. Da jedoch keine Informationen über die substratinduzierte Atmungsaktivität des kontaminierten Bodens vorlag, sind derartige Aussagen mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Für eine abgesichertere Interpretation empfiehlt es sich, bei künftigen Ansätzen, in denen der kontaminierte Boden in einem hohen Anteil vorliegt, zusätzlich diesen Boden ebenfalls unverdünnt zu untersuchen.

Bemerkenswert war eine Verschiebung des Peakmaximums bei der substratinduzierten Atmung zu beiden Meßzeitpunkten mit steigenden Schadstoffgehalten nach hinten. Diese Verschiebung war in den Mischungen mit dem sandigeren Borstel-Boden stärker ausgeprägt als bei den Mischungen mit IUCT-Boden. So erfolgte mit Borstel-Boden eine Verschiebung bei beiden Schadstoffgehalten, wobei sie bei 10 mg/kg jedoch nur schwach ausgeprägt war. Bei den Mischungen mit IUCT-Boden war sie dagegen nur beim höchsten Schadstoffgehalt zu beobachten.

6.2.3.5 Gesamtfazit: Benzo(a)pyren

Als Prüfwerte werden für Benzo(a)pyren vorgeschlagen (Bachmann et al., 1997):

Kinderspielplatz.	2 mg/kg
Wohngebiete:	4 mg/kg
Park- und Freizeitanlagen:	10 mg/kg.

Im Hinblick auf die getesteten Organismen Pflanzen und Nematoden sollte damit ein ausreichender Schutz gegeben sein. Für Regenwürmer kann der Erhalt der Lebensraumfunktion nicht be- scheinigt werden, wobei jedoch nicht nur die Schadstoffgehalte sondern möglicherweise auch die sehr bindige Struktur des belasteten Bodens eine Rolle spielen könnte.

Eine Aussage in Bezug auf die Mikroflora ist aufgrund der Ergebnisse der substratinduzierten Atmung nicht möglich.

Beim höchsten Schadstoffgehalt lag auch der Anteil an Nebenkontaminanten (Pb, Cd, Cu, Hg) über dem niedrigsten Prüfwert (s. Tabelle 19). Nach der Zusammenstellung von Bachmann et al. (1997) kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, daß diese Schwermetalle in den vorliegenden Gehalten mit zu einem Effekt beigetragen haben. So liegt beispielsweise der Pb-Gehalt mit 60,5 mg/kg im Bereich eines experimentell bestimmten LOEC für Pflanzen. Der Cu-Gehalt und der Hg-Gehalt wiederum liegt im Bereich des LOEC für Mikroorganismen. Da die in der Literatur angegebenen Werte sich jeweils nur auf die Untersuchung einer Einzelsubstanz beziehen, ist durchaus denkbar, daß die Summe der Begleitkontaminanten zu einem Effekt zumindest beim höchsten Schadstoffgehalt mit beigetragen haben könnte.

7 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Ein grundsätzliches Problem bei der biologischen Testung von Böden besteht darin, daß - solange das Konzept der Standorttypen nicht konsequent umgesetzt und erprobt wurde - mit unbelasteten Kontrollböden als Vergleich gearbeitet werden muß. Noch sind die Kenntnisse über die Einflußfaktoren auf die biologische Grundausstattung zu gering, um zu den kontaminierten Böden, unbelastete Kontrollböden zu beschaffen, die hinsichtlich Bodencharakteristik, Nährstoffversorgung und biologischer Grundausstattung den kontaminierten Böden vergleichbar sind.

Für die Überprüfung, ob die vorwiegend zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgelegten Prüfwerte für die Schadstoffe Arsen, Cadmium und Benzo(a)pyren gleichzeitig ausreichen, auch die Lebensraumfunktion von Boden in ausreichender Weise zu schützen, wurde deshalb wie folgt vorgegangen:

Gehalte im Bereich der Prüfwerte wurden in den ausgewählten Kontrollböden eingestellt, indem in diese möglichst geringe Mengen kontaminierten Böden eingearbeitet wurden. Die kontaminierten Böden sollten möglichst eine Monobelastung aufweisen. Der Vorteil der Vermischung mit belastetem Boden im Gegensatz zur direkten Dotierung eines unbelasteten Bodens mit Schadstoffen liegt darin, daß so eine "Alterung" des Materials vorgegeben ist, die sonst nur schwierig zu erreichen ist.

Ursprünglich war geplant, die belasteten Böden mit unkontaminierten Böden gleicher Bodenart, die in der Nähe des belasteten Standorts beprobt werden sollte, zu vermischen. Dies ließ sich nicht realisieren, da die Suche nach geeigneten Standorten den Aufwand unverhältnismäßig vergrößert hätte. Zudem wurden – zumindest für Arsen und Cadmium – im Verhältnis zur unbelasteten Bodenmatrix nur geringe Mengen an kontaminiertem Boden in den belasteten Boden eingebracht (Verhältnis < 1 : 30 für Gehalte im Bereich der Prüfwerte), so daß davon auszugehen ist, daß die Struktur und Gesamtcharakteristik des unbelasteten Bodens weitgehend erhalten blieb. Auch die Erreichung einer Belastung oberhalb der Prüfwerte, die sonst nur durch Zudosierung des Schadstoffs zu erzielen wäre, ließ sich so leicht umsetzen. In diesem Fall wäre der Schadstoff aber nicht so fest in der Bodenmatrix gebunden und damit leichter verfügbar.

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt auch darin, daß für PAK/Benzo(a)pyren die Überprüfung der Prüfwerte mit einer realitätsnahen Schadstoff-Mischung erfolgt. Benzo(a)pyren ist als Leitkomponente anzusehen, wobei aber davon auszugehen ist, daß bei typischen PAK-Verunreinigungen immer ein ähnliches Verteilungsmuster auftritt. Ein Vergleich mit einer reinen Benzo(a)pyren-Kontamination wäre nicht sinnvoll, da Benzo(a)pyren auch in Altlasten nicht als singuläre Kontamination vorliegt. In diesem Projekt wurden somit die charakteristischen Nebenkontaminanten (andere PAK) ebenfalls mit in die Wirkungsprüfung miteinbezogen

Ein weiterer Vorteil der hier angewandten Strategie war, daß so mit relativ geringem Aufwand die Prüfwerte für zwei unterschiedliche Bodenarten überprüft werden konnten.

Ein Problem bei der gewählten Vorgehensweise ist allerdings die Tatsache, daß es trotz großem Aufwand nicht gelang, tatsächlich monobelastete Böden zu identifizieren. So weisen auch die ausgewählten Böden zusätzliche Kontaminationen oberhalb der Vorsorgewerte auf, doch ist

deren Höhe im Verhältnis zur Hauptkontamination in den meisten Fällen zu vernachlässigen. Nur beim Boden mit der PAK/Benzo(a)pyrenbelastung (Boden B3-PAK) lagen beim höchsten Schadstoffgehalt der Mischböden (20 mg/kg Benzo(a)pyren) auch Cadmium und Quecksilber in Gehalten oberhalb des jeweiligen niedrigsten Prüfwerts vor (13 mg/kg Cd, Prüfwert 10 mg/kg; 10 mg/kg Hg, Prüfwert 5 mg/kg).

Da die zu untersuchenden Stoffe/Stoffgruppen persistent sind, war es möglich, unbelastete Böden mit den kontaminierten Böden zu vermischen und die so hergestellten Mischungen über mehrere Monate in feuchtem Zustand zu inkubieren, ohne daß ein relevanter Abbau zu erwarten war.

Ziel dieses Projektes war eine Aussage darüber, ob durch die festgelegten Prüfwerte für Park- und Freizeitflächen bzw. Ackerbau/Nutzgarten die Bodenfauna und –flora geschützt werden. In Tabelle 46 sind daher die erhaltenen Ergebnisse im Bereich der jeweiligen Prüfwerte nochmals qualitativ zusammengefaßt. Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die Versuchsansätze nicht wie bei der Chemikalienbewertung direkt mit einander verglichen werden können. So wird bei der Chemikalienbewertung in einem definierten Substrat / Boden mit der zu testenden Substanz eine Verdünnungsreihe hergestellt. Die einzelnen Ansätze unterscheiden sich somit nur in dem Substanzgehalt. In dem vorliegenden Projekt wurden die verschiedenen Schadstoffgehalte erzielt, indem zwei Böden, die auch unterschiedliche chemisch-physikalische Eigenschaften aufwiesen, miteinander vermischt wurden. Im Rahmen des vom BMBF-geförderten Verbundvorhabens „Ökotoxikologische Testbatterien“, Teilvorhaben 4.4 „Bodenextraktionsverfahren“, das auch die Validierung des Regenwurmtestes umfaßte, konnte beispielsweise gezeigt werden, daß die Reproduktionsrate von *Eisenia fetida* in bindigeren Böden etwas niedriger liegen kann als in sandigen.

Die erzielten Ergebnisse lassen sich so interpretieren, daß die Lebensraumfunktion des Bodens für Nematoden und Pflanzen im Bereich der Prüfwerte für alle drei getesteten Schadstoffe gesichert sein könnte.

Dies scheint auch für die Mikroorganismen für die Schadstoffe Cadmium und Arsen zu gelten. Für BaP bestehen jedoch diesbezügliche Zweifel, wobei jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, daß die chemisch-physikalischen Bodenparameter bei diesem Schadstoff mit die Ergebnisse beeinflußt haben könnten. Es empfiehlt sich daher, die Wirkung des Schadstoffs BaP nochmals mit einem höher belasteten Boden zu überprüfen.

Der Test mit dem Kompostwurm *Eisenia fetida* erwies sich als sehr sensitiv. Hier wurden die größten Abweichungen im Vergleich zu den Kontrollansätzen bei allen drei Schadstoffen erzielt. Es kann daher der Schluß gezogen werden, daß leichte (sandige) Böden ein Problem für die Lebensraumfunktion für die Regenwürmer darstellen könnten. Es empfiehlt sich daher, nochmals verschiedene sandige Böden, die sich in ihrem Ton-/Schluff-Anteil unterscheiden, zu testen, um einen detaillierteren Einblick in das Reproduktionsverhalten der Würmer in Abhängigkeit der Bodenart zu erhalten. Dabei sollten nur hochkontaminierte Böden für die Testung verwendet werden, um den Einfluß einer veränderten Bodenstruktur bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen auf das Ergebnis zu minimieren.

Im Rahmen des BVB-Arbeitskreises „Biologische Bewertung von Böden“ der Fachgruppe 4 „Bodenfunktionen und Bodenbelastung“ ist es das Ziel, eine Ableitungsstrategie für Prüfwerte aufzustellen und für prioritäre Stoffe Prüfwertvorschläge festzulegen. Dazu zählt unter anderem eine Konvention über Testsysteme als Basis zur Prüfwertableitung. Neben den im vorliegenden Projekt vorgeschlagenen Testsystemen wird zur Abdeckung der weiteren möglichen Kombinationen von Expositionspfad und Ernährungsweise im Boden die Testung mit *Enchytraeus albidus*, *Folsomia candida*, *Aleochara bilineata*, *Poecilus cupreus* und Isopoden diskutiert.

Zunächst werden die Schadstoffe BaP und Cadmium bearbeitet.

Ergeben sich Unterschiede zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Prüfwerten, so können mögliche Ursachen sein:

- Den abgeleiteten Werten liegen Untersuchungen mit dotierten Böden zugrunde, wobei in der Regel keine Alterung der Substanzen berücksichtigt wird, während im vorliegenden Vorhaben bewußt mit realen Altlasten gearbeitet wurde.
- Speziell bei Schwermetallen wird bei der Reinsubstanztestung meist mit wasserlöslichen Salzen gearbeitet, während dies bei Altlasten in der Regel nicht der Fall ist.
- In die Berechnung wurden andere Endpunkte und andere Organismen mit einbezogen.
- Die Wirkung charakteristischer Begleitkontaminanten (z.B. weitere PAK bei BaP) werden bei der Testung von Reinsubstanzen meist nicht berücksichtigt.
- Als Basis für die Ableitung wurde pro Tier und Prozeß jeweils die niedrigste, plausible Wirkungsschwelle ausgewählt.

Zur Harmonisierung von Ergebnissen und zur Entwicklung der optimalen Ableitungsstrategie für Prüfwerte, erscheint es empfehlenswert, eine vergleichende Untersuchung von real kontaminierten Boden mit der Testung von dotiertem unkontaminierten Boden vom gleichen Standort durchzuführen. Dabei sollten dann Informationen über den Einfluß von Alterung und Begleitkontaminanten auf die Ergebnisse erhalten werden.

Tabelle 46: Qualitative Darstellung der Wirkung in den angewandten Testsystemen im Bereich der Prüfwerte.

	Cd/Borstel	Cd/IUCT	As/Borstel	As/IUCT	BaP/Borstel	BaP/IUCT
Prüfwert *)	50 mg/kg	50 mg/kg	200 mg/kg	200 mg/kg	10 mg/kg	10 mg/kg
Pflanzen	-	-	-	-	-	-
Nematoden	-	-	-	-	-	-
Regenwurm						
Mortalität	-	-	-	-	-	-
Reproduktion	+	-	+	-	(+)	-
Nitrifikation	-	-	-	-	-	-
Mikrobielle Atmung	-	-	-	-	(+)	-

*). Prüfwert für Park- und Freizeitanlagen (Cd, BaP) bzw. Ackerbau und Nutzgarten (As)

- = kein hemmender Effekt

+= hemmender Effekt

(+) = hemmender Effekt möglicherweise nicht nur den Schadstoff, sondern auch durch die Bodenstruktur mitbedingt.

8 Zusammenfassung

Zur Überprüfung, ob die zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgelegten Prüfwerte für die Schadstoffe Arsen, Cadmium und Benzo(a)pyren gleichzeitig ausreichen, auch die Lebensraumfunktion von Boden in ausreichender Weise zu schützen, wurden definierte Gehalte der Schadstoffe Arsen, Cadmium und Benzo(a)pyren im Bereich der Prüfwerte (Park- und Freizeitanlagen bzw. Ackerbau und Nutzgarten) in Böden eingestellt. Hierfür wurden in die zu untersuchenden Böden möglichst geringe Mengen kontaminiert Böden eingearbeitet.

Zunächst waren in einer aufwendigen Suche, bei der ca. 30 Behörden, Entsorgungs- und Sanierungsunternehmen kontaktiert wurden, geeignete Böden identifiziert worden. Für acht Böden wurden Teilproben einer Voruntersuchung (Screening) unterzogen, um ihre potentielle Eignung zu überprüfen. Für die hinsichtlich einer (weitgehenden) Mono-Belastung mit Arsen, Cadmium bzw. Benzo(a)pyren ausgewählten Böden wurde dann eine für die Untersuchung ausreichende Probenmenge genommen und analytisch charakterisiert (Schwermetallgehalte im Königswasser- auszug, Gehalte an PCB, PAK, HCH, DDT und anderen Chlor-Pestiziden, MKW). So sollte sicher gestellt werden, daß der zu untersuchende Kontaminant weitgehend die Hauptbelastung des jeweiligen Bodens darstellt. Allerdings ließ sich nicht vermeiden, daß weitere Kontaminanten ebenfalls in den belasteten Boden vorlagen (Mischkontamination).

Auf Grundlage der Erstcharakterisierung (Screening auf die Hauptbelastungskomponente sowie auf wichtige Schadstoffgruppen) wurde dann die endgültige Auswahl getroffen. Von den als geeignet erscheinenden Böden wurde eine für die biologischen Untersuchungen ausreichende Menge angefordert bzw. beprobt. Die gesamte vorliegende Charge wurde homogenisiert, gesiebt und einer weiteren analytischen Charakterisierung unterzogen, bei der Haupt- und Nebenkontaminanten bestimmt wurden.

Auf Basis der Analysenergebnisse wurden die belasteten Böden zur Einstellung von Gehalten im Bereich der Prüfwerte im geeigneten Verhältnis mit unbelasteten Böden vermischt. Als unbelastete Böden wurden ein sandiger Boden sowie ein lehmiger Boden ausgewählt. Der Vorteil der Vermischung mit belasteten Boden im Gegensatz zur direkten Dotierung eines unbelasteten Bodens mit Schadstoffen liegt darin, daß so eine "Alterung" des Materials vorgegeben ist, die sonst nur schwierig zu erreichen ist. Weiterhin steht so auch (insbesondere bei kleinen Zumischmengen) eine von den Bodeneigenschaften nahezu identische unbelastete Kontrolle zur Verfügung.

Die für die ökotoxikologischen Tests ausgewählten Testorganismen decken verschiedene Lebensräume und trophische Ebenen ab: Mikroorganismen (Testparameter: Basalatmung, substratinduzierte Atmung, Nitrifikation; Lebensraum: Bodenporenwasser, trophische Ebene: Destruenten), Nematoden (Testparameter: Reproduktion; Lebensraum: Bodenporenwasser, trophische Ebene: Konsument, bakteriophager Nematode); Regenwurm (Testparameter: Reproduktion; Lebensraum: Makroporen; trophische Ebene: Destruent), Pflanzen (Testparameter: Keimrate, Biomasse-

produktion; trophische Ebene: Produzenten). Mit Ausnahme der Mikroorganismen, bei denen die originäre Population herangezogen wurde, wurden die Testorganismen in die Böden eingesetzt.

Bei den untersuchten Schwermetallen Arsen und Cadmium wurden im Bereich der Prüfwerte, die im Hinblick auf den Schutz des Menschen für Park- und Freizeitanlagen bzw. Ackerbau und Nutzgarten festgelegt wurden, in den Mischböden und in den Kontrollböden ähnliche Testergebnisse bei der Testung mit Pflanzen, Nematoden und Mikroorganismen erzielt, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die diesbezügliche Lebensraumfunktion ausreichend erhalten bleiben sollte. Für Regenwürmer könnten die zugrundeliegenden Gehalte in leichten Böden ein Problem darstellen.

Bei Benzo(a)pyren nahm der original kontaminierte Boden einen relativ großen Anteil in den Mischungen ein, was die Ergebnisinterpretation erschwerte. Die Untersuchungen mit Pflanzen und Nematoden ließen auch bei diesem Schadstoff keine nicht akzeptablen Auswirkungen bei dem Prüfwert für Park- und Freizeitflächen erkennen, wenn als Kriterium statistisch signifikante Unterschiede in Kombination mit einer Gehalt-Wirkungs-Beziehung herangezogen wurden. Eine nochmalige Überprüfung speziell im Hinblick auf die Mikroflora (substratinduzierte Atmung) bzw. auf den Testansatz mit *Eisenia fetida* ist jedoch wünschenswert.

9 Literatur

- Bachmann, G., C.-G. Bannick, E. Giese, F. Glanthe, A. Kiene, R. Konietzka, F. Rück, S. Schmidt, K. Terytze, D. von Borris (1997): Fachliche Eckpunkte zur Ableitung von Bodenwerten im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes. In: D. Rosenkranz, G. Einsele, H.-M. Harreß (Hrsg.) Bodenschutz. Kennzahl 3500.
- BBA VI 1-1: Richtlinien für die amtliche Prüfung von Pflanzenschutzmitteln, Auswirkungen auf die Aktivität der Bodenmikroflora. März 1990 (2. Auflage).
- Berg, P. & T. Roswall (1985): Ammonium oxidizer numbers, potential and actual oxidation rates in two swedish arable soils. Biol. Fert. Soil. 1, 131-140.
- Bodenschutzverordnung (BBodSchV), Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes, 16.06.1999.
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, BGBl. I 502, 17.03.1998.
- DIN 19730 (1997): Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung (Bodenbeschaffenheit); Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19733-1 (1998): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität in Böden – Teil 1: Verfahren mit TTC, 1998-07-00; Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19733-2 (1998): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität in Böden – Teil 2: Verfahren mit INT. 1998-07-00; Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 38405 Teil 14 (1988): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D); Bestimmung von Cyaniden in Trinkwasser, gering belastetem Grund- und Oberflächenwasser (D 14); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN 38405 Teil 9 (1979): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D); Bestimmung des Nitrat-Ions (D 9); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN 38406 Teil 22 (1988): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E); Bestimmung von 33 Elementen mittels ICP-OES (E 22); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN 38406 Teil 5 (1983): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E); Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs (E 5); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN 38409 Teil 16 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Phenol-Index (H 16); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN 38409 Teil 18 (1981): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung von Kohlenwasserstoffen (H 22); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN EN 10304-1 (1995): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D); Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie (D 19); Wiley-VCH, Weinheim.

- DIN EN 1483 (1997): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E); Bestimmung des Quecksilbers mit AAS (E 12); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN EN 26777 (1993): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D); Bestimmung von Nitrit – Spektrometrisches Verfahren (D 10); Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN ISO 11466 (1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente, 1997 06-00; Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN ISO 14238 (1995): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Stickstoffmineralisierung und – nitrifizierung in Böden und der Einflüsse von Chemikalien auf diese Prozesse (ISO/DIS 14238), 1995-06-00; Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 11268-1 (1993): Bodenbeschaffenheit; Wirkung von Schadstoffen auf Regenwürmer (*Eisenia fetida*); Teil 1: Bestimmung der akuten Toxizität unter Verwendung von künstlichem Bodensubstrat, 1993-12-00; Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 11268-2 (1998): Bodenbeschaffenheit; Wirkung von Schadstoffen auf Regenwürmer (*Eisenia fetida*) – Teil 2: Bestimmung der Wirkung auf die Reproduktion, 1998-07-00; Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 11269-2 (1995): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Wirkung von Schadstoffen auf die Bodenflora – Teil 2: Wirkung von Chemikalien auf Auflauf und Wachstum höherer Pflanzen, 1995-12-00; Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 14240-1 (1997): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der mikrobiellen Biomasse von Böden – Teil 1: Substratinduziertes Respirationsverfahren, 1997-01-00; Beuth-Verlag, Berlin.
- LUA NRW (1994), Merkblatt Nr. 1: Bestimmung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Bodenproben, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen.
- Niemann, R., R. Debus (1996): Nematotentest zur Abschätzung der chronischen Toxizität von Bodenkontaminationen. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 8, 255-260.
- OECD-Guideline for Testing of Chemicals 208 (1984): Terrestrial plants, growth test.
- Schinner, F., R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (1993): Bodenbiologische Arbeitsmethoden. 2. Auflage. Springer-Verlag.
- VDLUFA (1991), Methodenhandbuch Band I, Die Untersuchung von Böden, Methode A6.2.1.1, Verlag VDLUFA, Darmstadt.

10 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Stellen, die bei der Auswahl der Böden behilflich waren oder Material zur Verfügung gestellt haben. Insbesondere gilt unser Dank Herrn Michael Sander, der während seiner Tätigkeit als Praktikant am Fraunhofer- IUCT an der Identifizierung der geeigneten Böden sowie teilweise an der Probennahme beteiligt war.