



# **Materialien zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg**

**Band 4.1 Leitfaden Detailuntersuchung**

**Teil Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze**



## Materialien zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg, Band 4.1

### Herausgeber:

Landesumweltamt Brandenburg (LUA)  
Abt. Technischer Umweltschutz, Ref. Altlasten – T 6  
Seeburger Chaussee 2  
OT Groß Glienicke  
14476 Potsdam

Download: <http://www.mluv.brandenburg.de/info/lua-publikationen>  
Potsdam, im Januar 2010

Diese Informationsschrift basiert auf dem Abschlussbericht Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

### Erarbeitung:

Autoren            Dr. Thomas Mathews  
                       Dipl. Biol. M. Techn. Stephan Exner

                       Fugro Consult GmbH  
                       Zweigniederlassung Nordrhein-Westfalen  
                       Napoleonsberg 126  
                       52076 Aachen

Redaktion:        Landesumweltamt Brandenburg  
                       Referat Altlasten, Bodenschutz (T6)  
                       Dr. Jürgen Ritschel  
                       Matthias Feskorn  
                       André Wunsch

Diese Veröffentlichung erfolgt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Der Bericht einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

## Inhalt

1	Allgemeine Hinweise .....	7
1.1	Zielsetzung des Leitfadens .....	7
1.2	Rechtliche Grundlagen .....	8
1.3	Ablauf der Detailuntersuchung .....	10
1.4	Charakterisierung des Wirkungspfad .....	12
2	Prüf- und Maßnahmenwerte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze nach Anhang 2 Nr. 2.2 – 2.4 BBodSchV .....	15
2.1	Abgrenzung der Nutzungen .....	15
2.2	Schutzgutbezug .....	15
3	Detailuntersuchung des Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze .....	17
3.1	Bodenuntersuchungen .....	19
3.1.1	Probennahme .....	19
3.1.2	Analytik .....	20
3.1.2.1	Anorganische Schadstoffe .....	20
3.1.2.2	Organische Schadstoffe .....	22
3.1.2.3	Chemisch-physikalische Bodeneigenschaften .....	23
3.2	Untersuchungen zum Schadstofftransfer Boden-Nutzpflanze .....	24
3.2.1	Nutzung „Ackerbau / Erwerbsgemüsebau“ .....	25
3.2.1.1	Anorganische Schadstoffe .....	25
3.2.1.2	Organische Schadstoffe .....	27
3.2.2	Nutzung „Haus-/Kleingärten“ .....	29
3.2.3	Nutzung „Grünland“ .....	33
3.2.3.1	Anorganische Schadstoffe .....	33
3.2.3.2	Organische Schadstoffe .....	36
3.3	Pflanzenuntersuchungen .....	36
4	Handlungsempfehlungen .....	38
4.1	Nutzungen „Ackerbau / Erwerbsgemüsebau“ und „Haus- / Kleingärten“ .....	39
4.2	Nutzung „Grünland“ .....	41

## Anhang

Anhang 1:	Ergänzende Hinweise zu den Extraktionsverfahren für die quantitative Bestimmung von anorganischen Schadstoffen in Bodenproben .....	43
Anhang 2:	Ergänzende Hinweise zu den Extraktions- und Analyseverfahren für die quantitative Bestimmung von organischen Schadstoffen in Bodenproben .....	45
Anhang 3:	Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Nahrungspflanze .....	47
Anhang 4:	Referenzwerte zur Beurteilung von anorganischen Schadstoffgehalten in Nahrungspflanzen .....	53
Anhang 5:	Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Futterpflanze .....	57
Anhang 6:	Hinweise zur Abschätzung des Verschmutzungsanteils von Futtermitteln im Rahmen einer Detailuntersuchung für die Nutzung „Grünland“ .....	57
Anhang 7:	Referenzwerte zur Beurteilung von Schadstoffgehalten in pflanzlichen Futtermitteln .....	59
Anhang 8:	Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Verschmutzungspfad bei der Nutzung „Grünland“ (Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier) .....	63
Anhang 9:	Quellenverzeichnis .....	

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Nutzungsabhängige Fallgestaltungen und Schutzgüter bei der Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze .....	16
Tabelle 2:	Prüf- und Maßnahmenwerte für den Wirkungspfad Boden-Pflanze gemäß Anhang 2 Nr. 2.2 – 2.4 BBodSchV .....	17
Tabelle 3:	Anforderungen an die Probenahme bei Untersuchungen zum Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze gemäß Anhang 1 BBodSchV .....	20
Tabelle 4:	Extraktionsverfahren nach BBodSchV zur Gefahrenbeurteilung anorganischer Schadstoffparameter für den Pfad Boden-Nutzpflanze .....	22
Tabelle 5:	Relatives Anreicherungsvermögen verschiedener Nutzpflanzenarten für die Schwermetalle Blei, Cadmium und Thallium; kursiv = Einstufung unsicher (aus LABO, 1998) .....	26
Tabelle 6:	Auf der Grundlage von experimentellen Daten abgeleitete Transferfaktoren Boden–Pflanze für Einzelverbindungen der Stoffgruppen PAK und PCB, bezogen auf Trockensubstanz Pflanze; Fettdruck = signifikante Korrelation (aus Trapp et al., 1998).....	28
Tabelle 7:	Bearbeitungshinweise für die quantitative Expositions- und Risikoabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch .....	31
Tabelle 8:	Einflussfaktoren auf den bodenbürtigen Verschmutzungsanteil von Futtermitteln (aus LUA BB, 2003) .....	34
Tabelle 9:	Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Mensch (nach LABO, 1998; LUA BB, 2003) .....	40

## Anhang

Tabelle A - 1:	Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Nutzpflanze–Mensch für Nutzpflanzen mit hohem relativem Anreicherungsvermögen (nach Knoche et al., 1999).....	50
Tabelle A - 2:	Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Nutzpflanze–Mensch (nach Knoche et al., 1999) .....	51
Tabelle A - 3:	Höchstgehalte für anorganische Kontaminanten in pflanzlichen Lebensmitteln gemäß EU- Schadstoffhöchstmengen-Verordnung (EG) 1881/2006 .....	53
Tabelle A - 4:	ZEBS-Richtwerte für pflanzliche Lebensmittel (BGVV; 1997) .....	54
Tabelle A - 5:	Wassergehalte verzehrbare Pflanzenteile (nach Souci et al., 1986).....	55
Tabelle A - 6:	Schadstoffgehalte in Nutzpflanzen, bei deren Überschreitung Ertragsdepressionen >10 % auftreten (nach Sauerbeck, 1989, aus LABO, 1998) .....	56
Tabelle A - 7:	Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Futterpflanze–Nutztier für Grünlandaufwuchs und Mais (nach Knoche et al., 1999).....	57
Tabelle A - 8:	Richt- und Grenzwerte für anorganische Kontaminanten in Futtermitteln.....	60
Tabelle A - 9:	Grenzwerte für organische Kontaminanten in Futtermitteln gemäß Anhang 5 Futtermittelverordnung.....	61

Tabelle A - 10:	Grenzwerte für Dioxine und dioxinähnliche PCB in Futtermitteln gemäß Anhang 5 Futtermittelverordnung (FuttMV, 2008).....	62
Tabelle A - 11:	Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier bei Weidenutzung (nach LUA NRW, 2006) .....	66
Tabelle A - 12:	Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier bei Wiesennutzung (nach LUA NRW, 2006) .....	69
Tabelle A - 13:	Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier bei Ackerfutterbau (nach LUA NRW, 2006) .....	71

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Ablauf der Detailuntersuchung.....	11
Abbildung 2:	Mechanismen des Schadstofftransfers im System Boden/Pflanze .....	13
Abbildung 3:	Empfehlungen für die methodische Vorgehensweise bei der Detailuntersuchung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze (LUA BB, 2003; LUA NRW, 2000) .....	18

## Anhang

Abbildung A - 1:	Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse der regressionsanalytischer Auswertung der TRANSFER-Datenbank des Umweltbundesamtes .....	48
------------------	--	----

# 1 Allgemeine Hinweise

## 1.1 Zielsetzung des Leitfadens

Die Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze erfolgt bei altlastverdächtigen Flächen und Altlasten anhand der in Anhang 2 Nr. 2 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) dargestellten Prüf- und Maßnahmenwerte. Bei der Ableitung dieser Werte stand die Funktion des Bodens **als Standort für den Anbau von Nutzpflanzen** im Vordergrund. Bei der Altlastenbearbeitung ist der Pfad Boden-Nutzpflanze daher in denjenigen Fällen zu betrachten, in denen kontaminierte Flächen zum Anbau von

- **Nahrungspflanzen** (Gemüse, Obst) oder
- **Futterpflanzen** (z.B. Grünlandaufwuchs, Silomais)

genutzt werden, da aus Belastungen von Nutzpflanzen mit toxisch wirkenden Stoffen über die Nahrungskette auch eine Gefährdung für die menschliche Gesundheit resultieren kann. Im Rahmen dieses Leitfadens werden zunächst die relevanten Mechanismen des Stofftransfers im System Boden/Pflanze in einem kurzen Überblick dargestellt. Anschließend werden auf der Grundlage der rechtlichen Vorgaben der BBodSchV Hinweise

- für die Aufstellung eines Untersuchungsprogramms für die Detailuntersuchung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze,
- für die Bewertung der Ergebnisse der Detailuntersuchung sowie
- die daraus abzuleitenden Handlungsempfehlungen  
gegeben.

## 1.2 Rechtliche Grundlagen

Im Rahmen der Beurteilung und rechtlichen Bewältigung der Folgen schädlicher Bodenveränderungen durch stoffliche Einwirkungen sind unterschiedliche Regelungen in Fachgesetzen zu beachten. Dies sind im Einzelnen:

### Bundesrechtliche Regelungen:

- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)
- Weitere in § 3 Abs. 1 BBodSchG aufgeführte Fachgesetze

### Landesrechtliche Regelungen:

- Brandenburgisches Abfall- und Bodenschutzgesetz (BbgAbfBodG)
- Bekanntmachung der Neufassung der Verordnung zur Regelung der Zuständigkeiten auf dem Gebiet des Abfall- und Bodenschutzes (Abfall- und Bodenschutz-Zuständigkeitsverordnung – AbfBodZV), Novellierung in 2010

Ferner sind zur Beurteilung von schadstoffbelasteten pflanzlichen Lebensmitteln und Futtermitteln für landwirtschaftliche Nutztiere folgende Rechtsvorschriften heranzuziehen:

### Lebensmittelüberwachung:

- Verordnung (EG) Nr. 466/2001 der Kommission vom 08.03.2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln
- Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Europäischen Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln

### Futtermittelüberwachung:

- Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung
- Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 der Europäischen Kommission vom 25. Juli 2003 zur Änderung der Bedingungen für die Zulassung einer Reihe von zur Gruppe der Spurenelemente zählenden Futtermittelzusatzstoffen
- Richtlinie 2006/13/EG der Kommission vom 3. Februar 2006 zur Änderung der Anhänge I und II der Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über unerwünschte Stoffe in Futtermitteln in Bezug auf Dioxine und dioxinähnliche PCB

- Futtermittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Mai 2007 BGBl. I S. 770, zuletzt geändert durch die Verordnung vom 15. Dezember 2008, BGBl. I S. 2483

Die Bodenschutzbehörden müssen bei der Gefahrenbeurteilung und der Ableitung von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr Abgrenzungsfragen zu den genannten Rechtswerken berücksichtigen.

### 1.3 Ablauf der Detailuntersuchung

Wird als Ergebnis der Orientierenden Untersuchung die Überschreitung eines Prüf- oder Maßnahmenwertes festgestellt, so sind nachfolgend gemäß § 9 BBodSchG weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Ziel der Detailuntersuchung ist die abschließende Klärung, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt oder der Gefahrenverdacht ausgeräumt werden kann. Konkrete Vorgaben, welche Untersuchungsschritte und –methoden dabei im Einzelnen anzuwenden sind, enthält die BBodSchV nicht. Stattdessen stellt die Verordnung ganz auf die Beurteilung des für den Einzelfall erforderlichen und angemessenen Untersuchungsaufwandes ab.

Im Rahmen der Detailuntersuchung sind folgende Standortuntersuchung und Expositionsabschätzungen durchzuführen (vgl. Abbildung 1):

- Ermittlung der betroffenen Schutzgüter und der relevanten Nutzung(en),
- Ermittlung der Nutzungsintensität (Zugänglichkeit, Aufenthaltsdauer),
- Ermittlung der standortspezifischen Expositionsbedingungen, relevante Wirkungspfade, Expositionsabschätzung relevanten Parameter,
- Charakterisierung von Kontaminationen, Ermittlung der Schadstoffverteilung,
- Relevante Hintergrundgehalte,
- Erstellen eines nachvollziehbaren und zu begründenden Beprobungsplans für die relevanten Wirkungspfade und Schutzgüter,
- Repräsentative Probennahme in den festgelegten Medien (inkl. Konservierung, Transport, Lagerung),
- Gewinnung repräsentativer Messwerte (Probenvorbereitung Laboranalytik, Qualitätssicherung und Arbeitsschutz),
- Beurteilung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Kontamination.

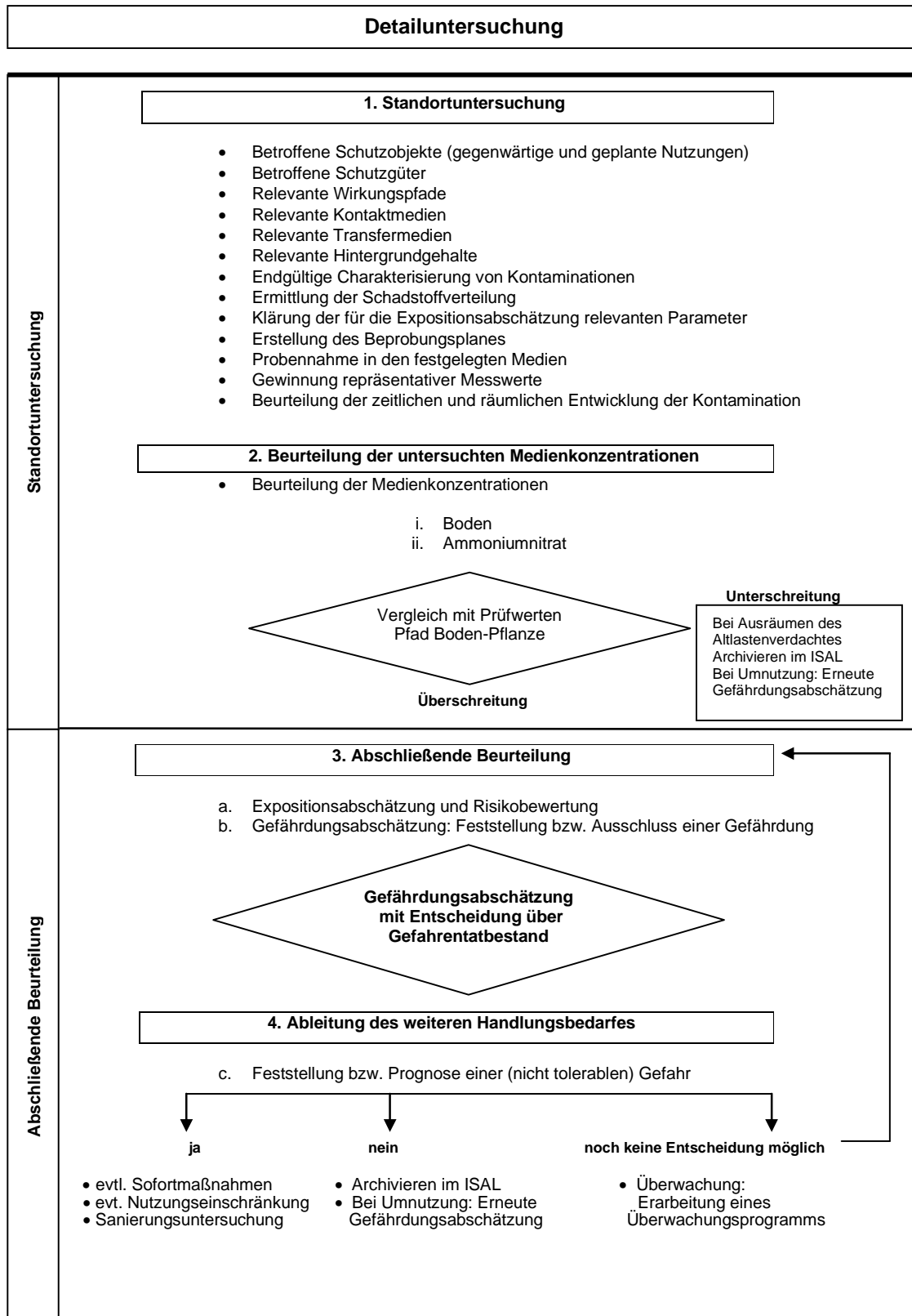


Abbildung 1 Ablauf der Detailuntersuchung

## 1.4 Charakterisierung des Wirkungspfad

Voraussetzung für eine fachlich fundierte Planung und Durchführung von weiteren Sachverhaltsermittlungen für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze ist die Kenntnis der wesentlichen Aspekte der pflanzlichen Aufnahmemechanismen von (Schad-)Stoffen aus dem Boden sowie der relevanten boden-, substanz- und pflanzenbedingten Einflussgrößen auf den Schadstofftransfer.

Pflanzen stehen vorrangig über das Wurzelsystem und die Blattoberfläche im Stoffaustausch mit ihrer Umgebung. Schadstoffe unterliegen bei der Aufnahme in die Pflanze sowie bei dem sich daran anschließenden Transport in der Pflanze grundsätzlich den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie Substanzen, die von der Pflanze „natürlicherweise“ aufgenommen werden wie z.B. bodengebundene Nährstoffe und Kohlendioxid.

Während gelöste Stoffe bevorzugt über die Wurzel in die Pflanze gelangen, erfolgt der Eintritt gasförmiger Substanzen sowohl über die Wurzel als auch über die oberirdischen Organe (Blätter, Sprossachse, Früchte) der Pflanze. Hinsichtlich der Stoffaufnahme aus der Luft sind aufgrund ihrer morphologischen Struktur (große Oberfläche, Spaltöffnungen zum Gasaustausch mit der Atmosphäre) vor allem die Blätter der Pflanze von Bedeutung.

Bei der Quantifizierung des Schadstofftransfers im System Boden/Pflanze sind grundsätzlich drei Teilpfade zu unterscheiden. Diese können abhängig von den Standortverhältnissen und den Schadstoffeigenschaften unterschiedlich bzw. gleichzeitig wirksam sein (vgl. auch Abbildung 2):

1. **„Systemischer Pfad“**: Aufnahme von Schadstoffen mit dem Bodenwasser in die Wurzel und nachfolgender Stofftransfer mit dem Transpirationsstrom in andere Pflanzenorgane.
2. **„Luft-Pfad“**: Ausgasung von leichtflüchtigen Schadstoffen aus dem Boden und Aufnahme über die Spaltöffnungen bzw. Kutikula der Blätter und Verteilung innerhalb des pflanzlichen Gewebes.
3. **„Verschmutzungspfad“**: Anlagerung von schadstoffhaltigen Bodenpartikeln an oberirdische Pflanzenorgane infolge meteorologischer (Wind, Niederschläge), standortbedingter (z.B. Überschwemmungsbereich) und/oder nutzungsbedingter Einflüsse (z.B. durch die Feldbewirtschaftung).

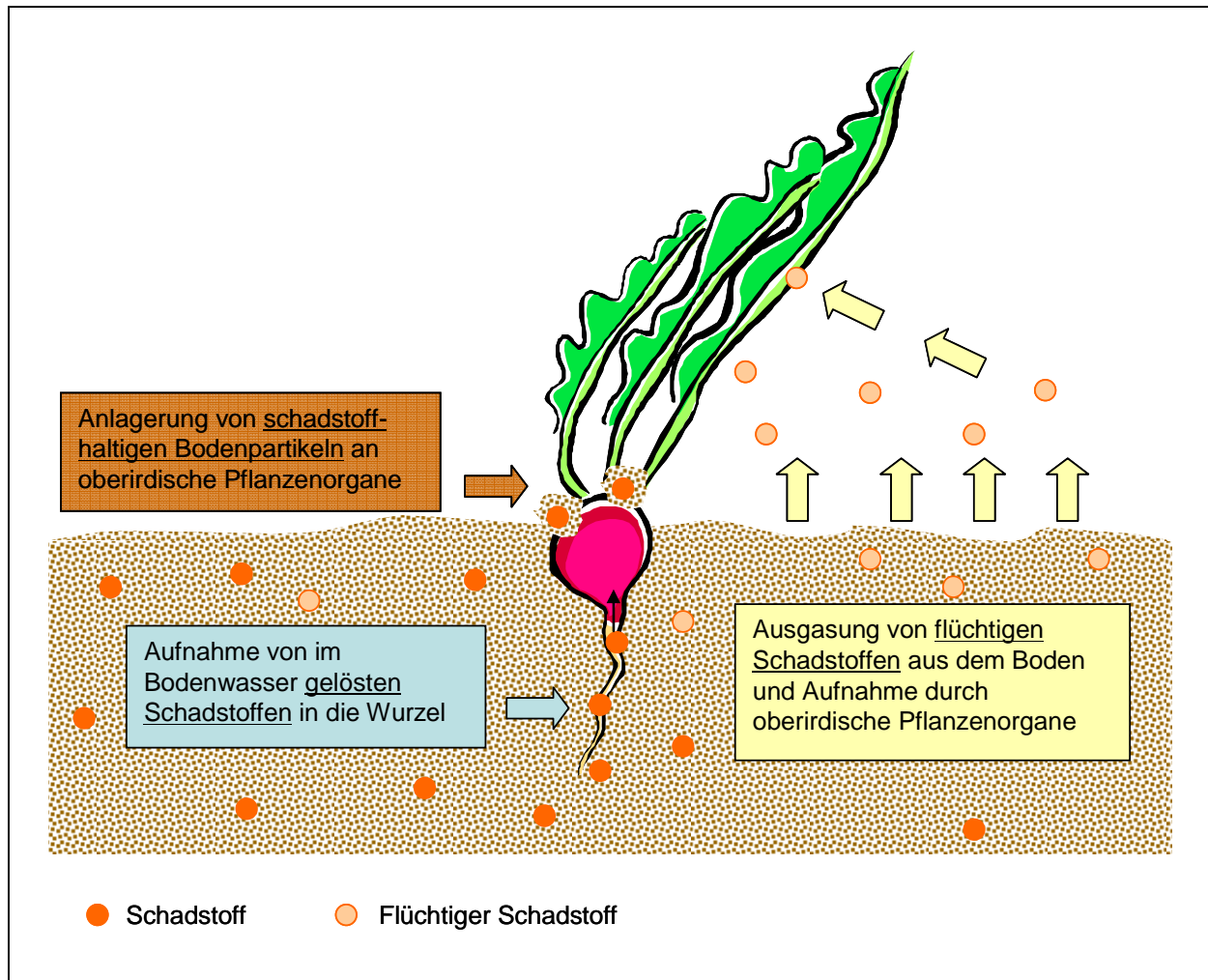


Abbildung 2: Mechanismen des Schadstofftransfers im System Boden/Pflanze

In welchem Umfang über die oben genannten Transferprozesse eine Aufnahme von Schadstoffen in die Pflanze erfolgt, wird durch folgende Faktoren entscheidend beeinflusst:

- **Chemisch-physikalische Eigenschaften des Schadstoffes:**
  - u.a. - Wasserlöslichkeit,
  - Dampfdruck,
  - Polarität (n-Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizient).
- **Standorteigenschaften:**
  - u.a. - Bodenart,
  - Organischer Kohlenstoffgehalt des Bodens,
  - pH-Wert,
  - Temperatur.
- **Pflanzenspezifische Parameter:**
  - u.a. - Größe der Wurzel- und Blattoberfläche,
  - Chemische Zusammensetzung und Dicke der Kutikula (= wachsartiger Überzug)

der

Blattoberfläche),

- Metabolisierungspotenzial der Pflanze für den aufgenommenen Schadstoff.

## 2 Prüf- und Maßnahmenwerte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze nach Anhang 2 Nr. 2.2 – 2.4 BBodSchV

### 2.1 Abgrenzung der Nutzungen

Gemäß Anhang 2 Nr. 2.1 BBodSchV sind bei Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze folgende **Nutzungen** zu unterscheiden:

- **Ackerbau bzw. Erwerbsgemüsebau:**  
= Flächen zum Anbau wechselnder Ackerkulturen einschließlich Gemüse und Feldfutter;
- **Nutzgarten:**  
= Hausgarten-, Kleingarten- und sonstige Gartenflächen, die zum Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden
- **Grünland:**  
= Flächen unter Dauergrünland.

Für Ackerflächen, die dem Anbau von Futtergräsern oder Silomais dienen, ist die Anwendung der Maßnahmenwerte für die Nutzung „Grünland“ vorgesehen.

### 2.2 Schutzgutbezug

Abhängig von der Nutzungsart kommen bei der Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

- unterschiedliche **Fallgestaltungen** zum Tragen und
- sind unterschiedliche **Schutzgüter** bewertungsrelevant (Bek. BBodSchV, 1999).

Die nachfolgende Tabelle zeigt die entsprechenden Zusammenhänge im Überblick.

Nutzung	Fallgestaltung	Schutzgut
Ackerbau / Erwerbsgemüsebau	Vermarktung von Nahrungspflanzen als Lebensmittel	Vermarktungsfähigkeit von Nahrungspflanzen; menschliche Gesundheit (mittelbar)
Nutzgarten	Verzehr von Obst und Gemüse aus Eigenanbau	menschliche Gesundheit
Grünland	Verwertung/Vermarktung von Futterpflanzen aus Ackerfutterbau und Grünlandnutzung	Verwertbarkeit von Ackerfutter und Grünlandaufwuchs als Futtermittel; menschliche Gesundheit (mittelbar)

Tabelle 1: Nutzungsabhängige Fallgestaltungen und Schutzgüter bei der Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Um bei der einzelfallbezogenen Gefahrenbeurteilung die jeweils betroffenen Schutzgüter angemessen berücksichtigen zu können, enthält die BBodSchV entsprechend differenzierte Prüf- und Maßnahmenwerte. Diese lassen sich unterscheiden in

- Prüf- und Maßnahmenwerte zur Beurteilung der **Qualität** von **Nahrungspflanzen**,
- Maßnahmenwerte zur Beurteilung der **Qualität** von **Futtermittelpflanzen** und
- Prüfwerte zur Beurteilung von **phytotoxischen Effekten** auf Nutzpflanzen.

Prüfwerte der letztgenannten Kategorie liegen für Arsen, Kupfer, Nickel und Zink vor. Gemäß LABO (1998) sind diese anorganischen Parameter im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen von besonderer Bedeutung, da

- zum einen für diese Schadstoffe in zahlreichen unter Feldbedingungen durchgeführten Studien phytotoxische Wirkungen nachgewiesen wurden und
- zum anderen diese Elemente bereits bei Stoffgehalten im Boden zu Ertragseinbußen bei Nutzpflanzen führen, bei denen eine signifikante Beeinträchtigung der Pflanzenqualität noch nicht festzustellen ist.

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze im Überblick. Bei der Anwendung der Prüf- und Maßnahmenwerte sind jeweils die Vorgaben bezüglich der beurteilungsrelevanten Bodentiefen gemäß Anhang 2 Nr. 2.5 BBodSchV zu berücksichtigen (vgl. auch Tabelle 3, Seite 20).

I. Prüf- und Maßnahmenwerte für „Ackerbauflächen“ und „Nutzgärten“ im Hinblick auf die <u>Pflanzenqualität</u>		
Stoff	Extraktionsmethode <sup>1)</sup>	Prüfwert [mg/kg TM]
Arsen	KW	200 <sup>2)</sup>

Blei	AN	0,1
Quecksilber	KW	5
Thallium	AN	0,1
Benzo(a)pyren	-	1
<b>Stoff</b>	<b>Extraktionsmethode <sup>1)</sup></b>	<b>Maßnahmenwert [mg/kg TM]</b>
Cadmium	AN	0,04 / 0,1 <sup>3)</sup>
<b>II. Maßnahmenwerte für „Grünland“ im Hinblick auf die Pflanzenqualität</b>		
<b>Stoff</b>	<b>Extraktionsmethode <sup>1)</sup></b>	<b>Maßnahmenwert [mg/kg TM]</b>
Arsen	KW	50
Blei	KW	1.200
Cadmium	KW	20
Kupfer	KW	1.300 <sup>4)</sup>
Nickel	KW	1.900
Quecksilber	KW	2
Thallium	KW	15
PCB <sub>6</sub>	KW	0,2
<b>III. Prüfwerte für „Ackerbauflächen“ im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen</b>		
<b>Stoff</b>	<b>Extraktionsmethode <sup>1)</sup></b>	<b>Prüfwert [mg/kg TM]</b>
Arsen	AN	0,4
Kupfer	AN	1
Nickel	AN	1,5
Zink	AN	2
<sup>1)</sup> AN = Ammoniumnitrat-Extraktion, KW = Königswasser-Extraktion <sup>2)</sup> Bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg TM <sup>3)</sup> Auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cadmium-anreichernden Gemüsearten gilt als Maßnahmenwert 0,04 mg/kg TS; ansonsten gilt als Maßnahmenwert 0,1 mg/kg TM <sup>4)</sup> Bei Grünlandnutzung durch Schafe gilt als Maßnahmenwert 200 mg/kg TM		

Tabelle 2: Prüf- und Maßnahmenwerte für den Wirkungspfad Boden-Pflanze gemäß Anhang 2 Nr. 2.2 – 2.4 BBodSchV

### 3 Detailuntersuchung des Wirkungspfad des Boden-Nutzpflanze

Wird als Ergebnis einer Orientierenden Untersuchung eine Überschreitung der in Anhang 2 Nr. 2.2 – 2.4 BBodSchV dargestellten Prüf- oder Maßnahmenwerte festgestellt, so ist eine Detailuntersuchung durchzuführen. Ziel der Detailuntersuchung ist die weitergehende Erkundung von Art, Ausmaß und räumlicher Verteilung der Bodenbelastung, um darauf aufbauend eine abschließende Beurteilung der Schutzgutgefährdung vornehmen zu können. Dies kann grundsätzlich mit folgenden weiteren Arbeitsschritten erreicht werden:

- Untersuchungen des **Bodens** (= Schadstoffdonator)
- Untersuchungen zum **Schadstofftransfer** Boden-Nutzpflanze (= Transmission)

c) Untersuchungen von **Nutzpflanzen** (= Schadstoffakzeptor)

Welche der oben genannten Untersuchungen im konkreten Einzelfall die geeignetste Methode darstellt, ist abhängig von standortspezifischen Kriterien wie z.B.

- Art der relevanten Schadstoffe,
- Flächengröße,
- Art der Nutzung,
- chemisch-physikalische Bodeneigenschaften.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Entscheidungsbaum für die methodische Vorgehensweise bei der Detailuntersuchung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze.

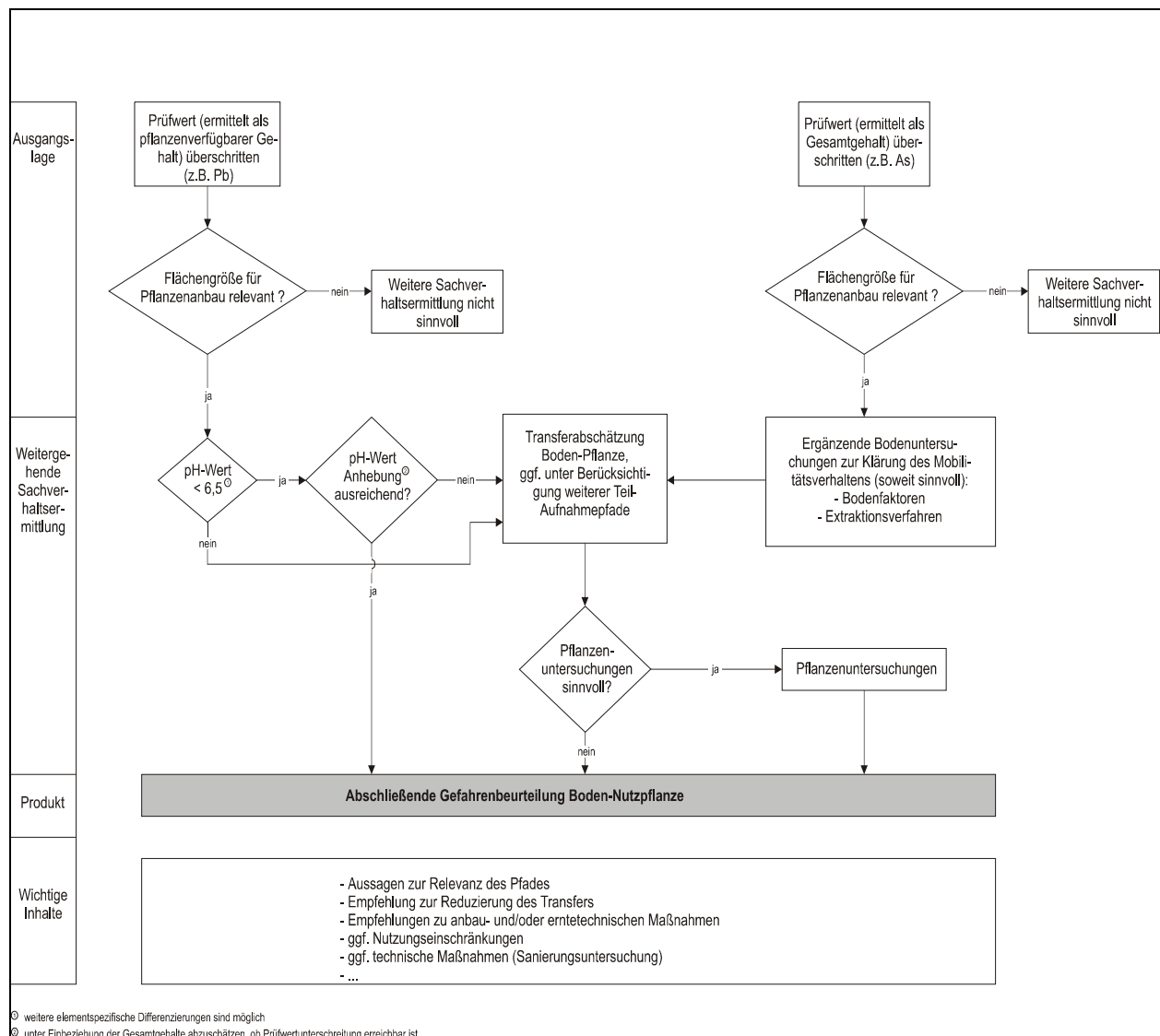


Abbildung 3: Empfehlungen für die methodische Vorgehensweise bei der Detailuntersuchung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze (LUA BB, 2003; LUA NRW, 2000)

## 3.1 Bodenuntersuchungen

Bei der Aufstellung des Programms für die Detailuntersuchung sind die entsprechenden Anforderungen an Untersuchungsumfang, Probenahme, Analytik und Qualitätssicherung gemäß Anhang 1 BBodSchV zu berücksichtigen.

### 3.1.1 Probennahme

Bei landwirtschaftlich einschließlich gartenbaulich genutzten Böden mit annähernd gleicher Bodenbeschaffenheit und Schadstoffverteilung soll auf Flächen bis 10 Hektar in der Regel für jeweils 1 Hektar, mindestens aber von 3 Teilflächen eine Mischprobe entsprechend den Beprobungstiefen entnommen werden. Bei Flächen unter 5 000 m<sup>2</sup> kann auf eine Teilung verzichtet werden. Für große Flächen größer 10 Hektar sollen mindestens jedoch 10 Teilflächen beprobt werden. Die Probennahme erfolgt nach den Regeln der Probennahme auf landwirtschaftlich genutzten Böden (E DIN ISO 10381-1: 02.96, E DIN ISO 10381-4: 02.96) durch 15 bis 25 Einzeleinstiche je Teilfläche, die zu jeweils einer Mischprobe vereinigt werden (BBodSchV, 1999).

Aufgrund der vergleichsweise geringen Flächengrößen in Nutzgärten erfolgt die Probennahme in der Regel durch Entnahme einer grundstücksbezogenen Mischprobe für jede Beprobungstiefe und im Übrigen in Anlehnung an die Regeln der Probennahme auf Ackerflächen. Bei der Detailuntersuchung von Haus- oder Kleingärten sollten jedoch Nutzgartenbereiche und Ziergartenflächen separat beprobt werden.

Die **Probennahmetiefe** beträgt bei Ackerflächen 0-30 cm, bei Grünland 0-10 cm. Es empfiehlt sich jedoch, auch tiefere Bodenbereiche (30-60 cm bei Ackerbauflächen, 10-30 cm bei Grünland) zumindest stichprobenartig mit zu beproben und zu analysieren (LABO, 1998). Die nachfolgende Tabelle fasst die Vorgaben der BBodSchV bezüglich des Probennahmeprogramms für die Untersuchung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze zusammen.

Nutzung	Flächengröße	Probenahmeumfang	Probenahmetiefe
Ackerbau, Grünland	> 10 ha	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterteilung der Gesamtfläche in mind. 10 Teilflächen, die nachfolgend separat beprobt werden</li> <li>• Je Teilfläche 15-25 Einstiche, die anschließend zu jeweils einer Mischprobe vereinigt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ackerbau: 0-30 cm (Bearbeitungshorizont), 30-60 cm</li> <li>• Grünland: 0-10 cm (Hauptwurzelbereich), 10-30 cm</li> </ul>
	0,5 bis 10 ha	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterteilung der Gesamtfläche in Teilflächen von i.d.R. jeweils 1 ha, mind. aber in 3 Teilflächen</li> <li>• Je Teilfläche 15-25 Einstiche, die anschließend zu jeweils einer Mischprobe vereinigt werden</li> </ul>	
	< 5.000 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auf eine Unterteilung in Teilflächen kann verzichtet werden</li> <li>• 15-25 Einstiche, die anschließend zu einer Mischprobe vereinigt werden</li> </ul>	
Nutzgarten	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entnahme einer grundstücksbezogenen Mischprobe für jede Beprobungstiefe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0-30 cm (Bearbeitungshorizont), 30-60 cm</li> </ul>

Tabelle 3: Anforderungen an die Probenahme bei Untersuchungen zum Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze gemäß Anhang 1 BBodSchV

### 3.1.2 Analytik

Hinweise zu den Aufschluss- und Analyseverfahren, die zur Ermittlung der Stoffgehalte in den entnommenen Bodenproben einzusetzen sind sowie zur Qualitätssicherung enthält Anhang 1 Nr. 3 und 4 der BBodSchV.

#### 3.1.2.1 Anorganische Schadstoffe

Bei **anorganischen Schadstoffen** richtet sich die Auswahl des Extraktionsverfahrens für die zu analysierenden Bodenproben nach dem Aufnahmepfad, über den die Kontamination der Nutzpflanze vorrangig erfolgt. Hinsichtlich einer Belastung von Nutzpflanzen mit Schwermetallen sind vorrangig zwei Aufnahmepfade von Bedeutung (LABO, 1998):

- **Systemischer Aufnahmepfad:** In der Bodenlösung vorhandene Schwermetalle werden über die Wurzel aufgenommen und mit dem Transpirationsstrom in die oberirdischen Pflanzenorgane transportiert.
- **Verschmutzungspfad:** Die Anlagerung von kontaminierten Bodenpartikeln an oberirdische Pflanzenorgane (Sprossachse, Blätter, Früchte) kann ebenfalls zu einer Schadstoffbelastung von Nutzpflanzen führen. Vor allem der Verschmutzungspfad ist für den Bereich der Grünlandnutzung relevant, da hier von einer unvermeidbaren Futtermittelverschmutzung (insbesondere bei Beweidung auch durch Bodenaufnahme der

Tiere) auszugehen ist. Auch im Falle von Nahrungspflanzen besitzt der Verschmutzungspfad Relevanz, da anzunehmen ist, dass die äußerliche Verschmutzung der Pflanze durch kontaminierte Bodenpartikel bei der küchentechnischen Aufbereitung (Waschen, Schälen) nicht immer vollständig entfernt werden kann.

Es ist davon auszugehen, dass grundsätzlich sowohl der systemische Aufnahmepfad als auch der Verschmutzungspfad einen Beitrag zur Schwermetallbelastung von Nutzpflanzen liefern. Die relative Bedeutung der beiden genannten Pfade ist jedoch im Einzelfall in starkem Maße abhängig von

- **nutzungsspezifischen**,
- **schadstoffspezifischen**,
- **pflanzenart**spezifischen und
- **pflanzenorgan**spezifischen Eigenschaften.

Im Extremfall kann dabei fast ausschließlich einer der beiden Aufnahmepfade für die Schadstoffbelastung einer Pflanze bestimmend sein (LABO, 1998):

*Beispiele:*

- Für die Blei-Belastung von Grünlandaufwuchs ist der Verschmutzungspfad bestimmend.
- Die Cadmium-Belastung von Weizenkörnern ist vorrangig auf die systemische Aufnahme zurückzuführen.
- In Bezug auf phytotoxische Wirkungen von Schwermetallen ist der systemisch aufgenommene Stoffanteil relevant.

Um die oben genannten Mechanismen der Schwermetallaufnahme bei der Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze zu berücksichtigen, sind bei der quantitativen Bestimmung **anorganischer** Bodenschadstoffe geeignete chemische Untersuchungsmethoden anzuwenden. Diese müssen die oben genannten Aufnahmepfade in ausreichendem Maße abbilden. Die BBodSchV sieht hierzu in Abhängigkeit von der Nutzung bzw. dem zu bewertenden Schutzgut

- die **Ammoniumnitrat-Extraktion** nach DIN 19730 für die Beurteilung der Schwermetallaufnahme über den systemischen Pfad und
- die **Königswasser-Extraktion** nach DIN ISO 11466: 06.97 für die Quantifizierung der Schadstoffaufnahme über den Verschmutzungspfad vor.

Die nachfolgende Tabelle fasst die entsprechenden Vorgaben der BBodSchV zusammen. Ergänzende Hinweise zu den beiden genannten Aufschlussverfahren enthält Anhang 1 dieses Leitfadens.

Anwendungsbereich	Stoff	Extraktionsmethode
Beurteilung der Nutzungen - <b>Ackerbau / Erwerbsgemüsebau</b> - <b>Haus- / Kleingarten</b>	Blei, Cadmium, Thallium	Ammoniumnitrat-Extraktion nach DIN 19730
	Arsen, Quecksilber	Königswasser-Extraktion nach DIN ISO 11466: 06.97
Beurteilung der Nutzung - <b>Grünland</b>	Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium	Königswasser-Extraktion nach DIN ISO 11466: 06.97
Beurteilung <b>phytotoxischer Wirkungen</b>	Arsen, Kupfer, Nickel, Zink	Ammoniumnitrat-Extraktion nach DIN 19730

Tabelle 4: Extraktionsverfahren nach BBodSchV zur Gefahrenbeurteilung anorganischer Schadstoffparameter für den Pfad Boden-Nutzpflanze

### 3.1.2.2 Organische Schadstoffe

Bezüglich der Beurteilung von Belastungen des Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze durch organische Schadstoffe enthält die BBodSchV Prüf- bzw. Maßnahmenwerte für die Parameter polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und polychlorierte Biphenyle (PCB).

Insbesondere für die **PAK-Analytik** werden die in Tabelle 5 des Anhangs 1 der BBodSchV benannten Verfahren nicht mehr angewendet, da seit 2006 das DIN-ISO-Verfahren 18287 vorliegt.

Diese internationale Norm legt die quantitative Bestimmung von 16 polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) nach der Prioritätenliste der Environmental Protection Agency (EPA, Umweltschutzbehörde) fest. Die vorliegende Norm ist auf alle Bodenarten anwendbar (feldfeuchte oder chemisch getrocknete Proben) und deckt somit eine große Bandbreite an PAK-Kontaminationsgraden ab.

Unter den in dieser internationalen Norm festgelegten Bedingungen kann eine untere Anwendungsgrenze von 0,01 mg/kg (bezogen auf die Trockenmasse) für jeden einzelnen PAK sichergestellt werden. Eine Methodenbeschreibung für die Durchführung der Extraktion und chemischen Analyse von Bodenproben gemäß dem DIN-ISO-Verfahren 18287 enthält Anhang 2 dieses Leitfadens.

Die Gruppe der **PCB** umfasst 209 Kongenere, von denen in der Praxis meist nur sechs Leitverbindungen, die PCB-Kongenere 28, 52, 101, 153, 138 und 180, bestimmt werden. Die Analyseergebnisse für diese sechs PCB-Kongenere sind vor dem Abgleich mit dem entsprechenden Maßnahmenwert der BBodSchV zu addieren.

Für die Quantifizierung von PCB in Bodenproben werden in Tabelle 5 des Anhangs 1 der BBodSchV drei Analyseverfahren genannt (E DIN ISO 10382, DIN 38414-20, VDLUFA-Methodenbuch Bd. VII). Im Labor erfolgt die Analyse von PCB in Boden- und Feststoffproben routinemäßig analog DIN 38407 F3 mit Hilfe von GC/ECD (Gaschromatographie gekoppelt mit Elektroneneinfangdetektor) oder GC/MS (Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektroskopie) bei vorheriger Extraktion mit Hexan. Weiterführende Angaben zur Durchführung und den Bestimmungsgrenzen dieses Analyseverfahrens können Anhang 2 entnommen werden.

### 3.1.2.3 Chemisch-physikalische Bodeneigenschaften

Neben der chemischen Schadstoffanalytik sollten an den im Rahmen der Detailuntersuchung entnommenen Bodenproben auch die die **Schadstoffmobilität beeinflussende Bodeneigenschaften** wie z.B.

- pH-Wert,
- Tongehalt,
- C<sub>org</sub>-Gehalt

untersucht werden. Denn in zahlreichen Untersuchungen zur Akkumulation von Schwermetallen in Pflanzen wurde ein starker Einfluss bodenspezifischer Faktoren auf das Aufnahmeverhalten von Pflanzen nachgewiesen. Dabei zeigte sich, dass insbesondere der **pH-Wert** des Bodens die Aufnahme von Schwermetallen in Pflanzen wesentlich beeinflusst. Mit sinkendem pH-Wert des Bodens nimmt die Konzentration von Schwermetallen in der Bodenlösung und damit auch die Pflanzenverfügbarkeit dieser Elemente deutlich zu. Pflanzen, die an Standorten mit saurer Bodenreaktion wachsen, weisen daher häufig signifikant höhere Schwermetallkonzentrationen auf als solche, die auf Böden mit neutralem oder basischem pH-Wert wachsen (Hasselbach & v. Boguslawski, 1991; Hein et al., 1995). Bezüglich des Zusammenhangs zwischen Boden-pH-Wert und Löslichkeitsverhalten zeigen die einzelnen Schwermetalle deutliche Unterschiede. Während z.B. die Löslichkeit von Cadmium und Zink bereits bei pH-Werten <6 deutlich ansteigt, erhöht sich die Pflanzenverfügbarkeit von Blei und Zink dagegen erst bei pH-Werten <4,5 (Hornburg & Brümmer, 1989; Scheffer & Schachtschabel, 1989).

Neben dem pH-Wert wird die Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen auch vom Ton- und Humusgehalt des Bodens sowie vom Gehalt des Bodens an Eisen- und Manganoxiden beeinflusst. **Tonminerale** entstehen bei der Verwitterung von Mineralen und Gesteinen und gehören daher zu den wesentlichen Bestandteilen des Bodens. Es handelt sich dabei um kristalline OH-haltige Alumosilikate, die zumeist einen typischen Schichtaufbau zeigen und ein hohes Adsorptionsvermögen für Kationen und damit auch für Schwermetalle besitzen. Eine Immobilisierung von Schwermetallen in Böden erfolgt darüber hinaus auch durch pedogene Eisen- und Manganoxide. Die einzelnen Schwermetalle zeigen hinsichtlich ihrer Bindung an Tonminerale und pedogene Oxide deutliche Unterschiede. Untersuchungen ergaben, dass Blei und Kupfer durch diese Bodenbestandteile in erheblich stärkerem Maße festgelegt werden als z.B. Zink und Cadmium (Hasselbach & v. Boguslawski, 1991; Zeien & Brümmer, 1991).

Neben der Festlegung durch die anorganische Bodenfraktion führt auch die Bindung an die **organische Bodensubstanz** zu einer Immobilisierung von Schwermetallen. Die Elemente liegen dabei vorwiegend in Form von metallorganischen Komplexen vor. Während Kupfer und Blei durch Huminstoffe relativ stark komplexiert werden, besitzen die Schwermetalle Zink, Kobalt und Nickel nur eine vergleichsweise geringe Tendenz zur Anreicherung an Huminstoffen (Hiller & Brümmer, 1991; Hein et al., 1995).

Zusätzlich zu den o.g. Bodenparametern können im Einzelfall auch die separate Bestimmung des Schwermetall-Gesamtgehaltes und des Anteils der mobilen Schwermetallfraktion sowie die Ermittlung der vorherrschenden Bindungsform der relevanten Kontaminanten sinnvoll sein.

Darüber hinaus sollte im Rahmen der Detailuntersuchung geprüft werden, ob im Bereich der untersuchten Fläche **Hinweise auf phytotoxische Wirkungen** vorliegen (z.B. Ertragsrückgänge, Welkeerscheinungen, Nekrosen).

### 3.2 Untersuchungen zum Schadstofftransfer Boden-Nutzpflanze

Auf der Grundlage von ermittelten Schadstoffgehalten im Boden kann mit Hilfe von Modellrechnungen eine rechnerische Abschätzung des Schadstofftransfers Boden-Nutzpflanze vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang ist allerdings darauf hinzuweisen, dass bislang nur für eine begrenzte Zahl von altlastrelevanten Schadstoffen eine ausreichende Datengrundlage aus experimentellen Studien vorliegt, die es ermöglicht, eine quantitative Abschätzung des Boden-Pflanze-Transfers gemäß den methodischen Vorgaben nach Bek. BBodSchV (1999) durchzuführen. Die nachfolgenden Ausführungen berücksichtigen daher vorrangig diejenigen Schadstoffe, für die Prüf- bzw. Maßnahmenwerte nach BBodSchV abgeleitet wurden.

Bei der Abschätzung des Schadstofftransfers Boden-Nutzpflanze ist aus methodischen Gründen zu differenzieren zwischen

- der Nutzung **Ackerbau / Erwerbsgemüsebau**, die dem Anbau von Nutzpflanzen dient,
- **Haus- / Kleingärten**, die durch den Anbau von Gemüse und Obst für die Eigenversorgung charakterisiert sind, und
- der Nutzung **Grünland**, bei der die Gewinnung von Futtermitteln für Nutztiere im Vordergrund steht.

Des Weiteren sind **anorganische** und **organische Schadstoffe** separat zu betrachten, da sich diese beiden Stoffgruppen in Bezug auf ihr Verhalten im System Boden/Pflanze deutlich voneinander unterscheiden.

### 3.2.1 Nutzung „Ackerbau / Erwerbsgemüsebau“

#### 3.2.1.1 Anorganische Schadstoffe

Zur Quantifizierung der Schwermetallbelastung von Nutzpflanzen, die im Bereich einer kontaminierten Fläche angebaut werden, können sogenannte Regressionsgleichungen herangezogen werden. Ausgehend von gemessenen Schadstoffgehalten in der oberflächennahen Bodenschicht ermöglichen es diese, die Schadstoffkonzentration in der Pflanze rechnerisch abzuschätzen.

Entsprechende Regressionsgleichungen zum Schadstofftransfer Boden-Pflanze wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens durch Auswertung der beim Umweltbundesamt geführten Datenbank „TRANSFER“ erarbeitet. Die von Knoche et al. (1999) ermittelten Regressionsgleichungen bildeten die Grundlage für die Ableitung der in Anhang 2 Nr. 2 der BBodSchV für den Pfad Boden-Nutzpflanze genannten Prüf- und Maßnahmenwerte für anorganische Schadstoffe. Eine Übersichtsdarstellung ausgewählter Regressionsgleichungen, die im Rahmen der Detailuntersuchung für die Bewertung herangezogen werden können, sowie Erläuterungen zur Herleitung dieser Regressionsgleichungen enthält Anhang 3 dieses Leitfadens.

Wie bereits erwähnt, kann die Höhe des Schadstofftransfers Boden-Pflanze in Abhängigkeit von der Pflanzenart zum Teil erheblich variieren. In dem von Knoche et al. (1999) erarbeiteten Bericht werden daher für Arsen und die Schwermetalle Blei, Cadmium, Quecksilber und Thallium jeweils Regressionsgleichungen für mehrere Nutzpflanzenarten angegeben. Darüber hinaus wurde für die genannten Schadstoffe eine Regression für „mäßig anreichernde Gemüsearten“ errechnet.

Angaben zum **Schadstoffanreicherungsvermögen** verschiedener Nutzpflanzenarten bezüglich der Schwermetalle Cadmium, Blei und Thallium enthält das von der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Boden erarbeitete Eckpunktepapier „Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfades Bodenverunreinigung/Altlasten – Pflanze“ (LABO, 1998). Basierend auf den Ergebnissen einer Auswertung von Literaturdaten wurden Nutzpflanzen hinsichtlich ihrer Akkumulationseigenschaften für die oben genannten Elemente in drei Anreicherungsklassen (hoch, mäßig, niedrig) eingeteilt. Eine Übersicht über die vorgenommene Klassifizierung gibt die nachfolgende Tabelle.

Anreicherungsvermögen	Parameter		
	Cadmium	Blei	Thallium

<b>hoch</b>	Endivie Lollo rosso Mangold Sellerie Spinat Weizen Zuckerrübenblatt	Endivie Lollo rosso	Grünkohl Raps
	<b>mäßig</b>	<i>Blumenkohl</i> Brokkoli <i>Chinakohl</i> Grünkohl Hafer Möhren Porree <i>Rote Bete</i> Kopfsalat <i>Schwarzwurzel</i>	<i>Blumenkohl</i> Roggen Brokkoli <i>Rosenkohl</i> <i>Chinakohl</i> <i>Rote Bete</i> Feldsalat Rotkohl Gerste <i>Schwarzwurzel</i> Grünkohl Sellerie Hafer Spinat Kohlrabi <i>Spitzkohl</i> Kopfsalat Weißkohl Mangold Weizen Möhren <i>Wirsing</i> Porree <i>Zwiebel</i> Radies/Rettich
<b>niedrig</b>	Buschbohne Roggen Erbse <i>Rosenkohl</i> Feldsalat Rotkohl Gerste <i>Spitzkohl</i> <i>Gurke</i> Stangenbohne Kartoffel <i>Tomate</i> Kohlrabi Weißkohl Kürbis <i>Wirsing</i> Paprika Zucchini Radies/Rettich <i>Zwiebel</i>	Buschbohne <i>Erbse</i> <i>Gurke</i> Kartoffel Stangenbohne <i>Tomate</i> <i>Zucchini</i>	<i>Blumenkohl</i> Porree Buschbohne <i>Rosenkohl</i> <i>Chinakohl</i> <i>Rotkohl</i> Endivie <i>Salat</i> Erbse <i>Spitzkohl</i> Gurke Stangenbohne <i>Kohlrabi</i> Tomate Kürbis <i>Weißkohl</i> Möhren <i>Zucchini</i> Paprika Zwiebel

Tabelle 5: Relatives Anreicherungsvermögen verschiedener Nutzpflanzenarten für die Schwermetalle Blei, Cadmium und Thallium; *kursiv* = Einstufung unsicher (aus LABO, 1998)

Für die Abschätzung des Schwermetalltransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Mensch im Rahmen einer Detailuntersuchung wird in Abhängigkeit vom Kenntnisstand über die zu bewertende Fläche (insbesondere hinsichtlich der angebauten Nutzpflanzenarten) folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Wenn keine Informationen über die auf der zu bewertenden Fläche angebauten Gemüsekulturen vorliegen oder auf der Fläche unterschiedliche Nutzpflanzenarten angebaut werden, sollte hinsichtlich des Schadstofftransfers Boden-Nutzpflanze von ungünstigen Randbedingungen ausgegangen werden. In diesem Fall sollten jeweils Regressionsgleichungen für Gemüsearten herangezogen werden, die ein relativ hohes

Anreicherungsvermögen für den betrachteten Schadstoff besitzen. Diese können der Tabelle A - 1 in Anhang 3 entnommen werden.

- In denjenigen Fällen, in denen gezielt eine Transferabschätzung für bestimmte Nutzpflanzenarten durchgeführt werden soll (z.B. wenn bekannt ist, dass die entsprechenden Gemüsearten auf der zu bewertenden Fläche regelmäßig angebaut werden), können – sofern in dem genannten UBA-Bericht verfügbar – jeweils diejenigen Regressionsgleichungen eingesetzt werden, die für die relevante(n) Nutzpflanzenart(en) ermittelt wurden. Eine Zusammenstellung der entsprechenden Angaben enthält Tabelle A - 2 in Anhang 3.

Die oben genannten Regressionsgleichungen ermöglichen eine rechnerische Abschätzung der in der Nutzpflanze zu erwartenden Schadstoffkonzentration. Um das Ergebnis dieser Berechnungen anschließend sachgerecht bewerten zu können, müssen geeignete Referenzwerte herangezogen werden.

Bei der Ableitung der pfadspezifischen Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV wurden die sogenannten **ZEBS-Werte** als Referenzwerte zugrunde gelegt. Es handelt sich hierbei um von der ehemaligen *Zentralen Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien* (ZEBS) des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) festgelegte Richtwerte zur Bewertung von Schadstoffgehalten in Nahrungsmitteln.

Mit dem Inkrafttreten der **EU-Verordnung über die Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln** im April 2002 (Verordnung (EG) 466/2001, später ersetzt durch Verordnung (EG) 1881/2006) wurden die ZEBS-Werte für Blei und Cadmium durch entsprechende Grenzwerte dieser EU-Verordnung abgelöst. Gemäß Aussage des Bundesumweltministeriums können die ZEBS-Werte für diejenigen Sachverhalte, die in der EU-Verordnung nicht geregelt werden, jedoch weiterhin als Beurteilungsgrundlage dienen (BMU, 2008).

Eine Zusammenstellung der Grenzwerte der o.g. EU-Schadstoffhöchstmengen-Verordnung sowie der ZEBS-Werte enthält Anhang 4.

Die oben genannten Grenz- bzw. Richtwerte ermöglichen es, gemessene oder berechnete Schwermetallkonzentrationen in Nahrungspflanzen im Hinblick auf das Schutzgut menschliche Gesundheit zu beurteilen. Neben schädigenden Wirkungen auf die menschliche Gesundheit können bei der Bewertung des Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze in bestimmten Fällen jedoch auch **phytotoxische Effekte** zu berücksichtigen sein. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn im Boden erhöhte Gehalte der Elemente Arsen, Kupfer, Nickel oder Zink nachgewiesen wurden. Studien zeigten, dass bei Vorhandensein dieser Stoffe im Boden Wachstumsbeeinträchtigungen und damit einhergehend Ertragsrückgänge bei landwirtschaftlichen/gärtnerischen Kulturen eher auftreten als Beeinträchtigungen der Pflanzenqualität (vgl. Kap. 2.2). Angaben darüber, bei welchen Schadstoffkonzentrationen in der Pflanze mit signifikanten Ertragsrückgängen bei Gemüsekulturen zu rechnen ist, können Tabelle A - 6 in Anhang 4 entnommen werden.

### 3.2.1.2 Organische Schadstoffe

Die Aufnahme von organischen Schadstoffen in Pflanzen wird von einer Vielzahl von stoff-, boden- und pflanzenspezifischen Faktoren beeinflusst. Darüber hinaus sind im Hinblick auf die Aufnahme und den Verbleib von organischen Schadstoffen in der Pflanze auch Metabolisierungsprozesse zu berücksichtigen. Durch diese können organische Substanzen sowohl im Boden als auch in der Pflanze chemisch verändert werden.

Umfangreiche Studien, die eine quantitative Abschätzung des Stofftransfers im System Boden/Pflanze ermöglichen, liegen für die Stoffgruppen PAK und PCB vor. Für diese Parameter bzw. für Einzelsubstanzen dieser Stoffgruppen werden in der Literatur entsprechende Transferfaktoren für den Pfad Boden-Pflanze angegeben. Trapp et al. (1998) werteten vorliegende Daten aus experimentellen Untersuchungen zur Aufnahme von PAK und PCB in Pflanzen aus und ermittelten basierend auf diesen Ergebnissen pfadspezifische Transferfaktoren. Einen Überblick über die rechnerisch abgeleiteten Transferfaktoren für den Pfad Boden-Pflanze für ausgewählte Einzelsubstanzen der Stoffgruppen PAK und PCB gibt die nachfolgende Tabelle. Diejenigen Schadstoff/Pflanze-Paare, für die sich bei der Auswertung der Daten eine signifikante Korrelation zwischen den Stoffgehalten im Boden und den in der Pflanze gemessenen Gehalten ergab, sind durch Fettdruck hervorgehoben.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)						
Pflanze	Transferfaktor Boden-Pflanze (Trockensubstanz) $TF_{Bo-Pfl}$					
	Benzo(a)pyren	Fluoranthren	Phenanthren			
Spinat	<b>0,037</b>	<b>0,0375</b>	<b>0,025</b>			
Salat	<b>0,022</b>	0,016	<b>0,023</b>			
Möhren	0,005	0,0048	0,047			
Kartoffelschale	0,013	<b>0,0053</b>	<b>0,0031</b>			
Grünkohl	0,002	0,0054	0,0073			
Weizenstroh	0,0004	-0,002	-0,01			
Polychlorierte Biphenyle (PCB)						
Pflanze	Transferfaktor Boden-Pflanze (Trockensubstanz) $TF_{Bo-Pfl}$					
	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 138	PCB 153	PCB 180
Spinat	<b>0,15</b>	<b>0,1</b>	<b>0,14</b>	0,063	0,038	0,04
Salat	<b>0,13</b>	<b>0,18</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,24</b>	<b>0,28</b>
Möhren	0,063	0,06	0,01	0,0056	-	-
Kartoffel	0,047	0,028	0,004	0,003	-	-
Grünkohl	<b>0,003</b>	0,005	0,044	0,0015	-	-
Weizenstroh	0,014	0,009	0,005	<b>0,01</b>	<b>0,008</b>	-0,00007

Tabelle 6: Auf der Grundlage von experimentellen Daten abgeleitete Transferfaktoren Boden-Pflanze für Einzelverbindungen der Stoffgruppen PAK und PCB, bezogen auf Trockensubstanz Pflanze; **Fettdruck** = signifikante Korrelation (aus Trapp et al., 1998)

Wie anhand der in der obigen Tabelle dargestellten Daten ersichtlich ist, liegen alle errechneten Transferfaktoren im Wertebereich  $<1$ , wobei sich in der Regel für PCB höhere Transferfaktoren ergaben als für PAK. Diese Tendenz sowie Transferfaktoren in vergleichbarer Höhe wurden auch von Dornberger et al. (1997) ermittelt, die entsprechende Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Bodenverhältnisse im Land Brandenburg durchführten.

Für spezielle Fragestellungen im Zusammenhang mit der Aufnahme von PAK und PCB aus belasteten Böden in Pflanzen (z.B. Einfluss der stoffspezifischen Hintergrundbelastung auf den Schadstoffgehalt in Nutzpflanzen, relative Bedeutung der einzelnen Aufnahmepfade – Anlagerung von schadstoffhaltigen Bodenpartikeln an der Pflanzenoberfläche, Aufnahme über die Wurzel, Deposition von belasteten Staubpartikeln auf der Blattoberfläche) können im Rahmen der Gefahrenbeurteilung zusätzliche Literaturquellen herangezogen werden (u.a. Crößmann, 1992; LÖLF, NRW, 1992; Delschen, 1994; Delschen et al., 1996; Delschen et al., 1999; LUA BB, 2000).

Sofern andere organische Schadstoffparameter für die zu bewertende Fläche relevant sind, kann eine Abschätzung des Schadstofftransfers Boden-Pflanze durchgeführt werden

- auf der Grundlage der Ergebnisse entsprechender experimenteller Studien zum Boden-Pflanze-Transfer, die für die betreffenden Schadstoffe in der Literatur verfügbar sind (z.B. Günther & Nolting, 1996 (Pflanzenschutzmittelwirkstoffe), Hülster et al., 1994 (PCDD/F), Winkler & Scheunert, 1993 (chlorierte Kohlenwasserstoffe), und/oder
- anhand von Modellrechnungen, bei denen die maßgeblichen Verteilungs- und Transferprozesse im System Boden/Pflanze durch geeignete Berechnungsgleichungen beschrieben werden.

Ein umfassendes Modell zum Verhalten von organischen Schadstoffen im System Boden-Pflanze wurde von Trapp erarbeitet (Trapp, S., 1992; Trapp, S.; Matthies, M.; Kaune, A., 1994; Trapp, S.; Matthies, M., 1994; Matthies, M.; Trapp, S., 1994; Trapp, S., 1995). Dieses Modell, das auch als Software-Version vorliegt (Trapp & Matthies, 1996), ermöglicht es,

- die Aufnahme von Schadstoffen in die Wurzel,
- den Stofftransfer von der Wurzel in oberirdische Pflanzenorgane sowie
- die Aufnahme von gasförmigen oder partikelförmigen Schadstoffen über das Blatt rechnerisch abzuschätzen.

Bei der Bewertung der mittels Modellrechnungen abgeschätzten Pflanzenkonzentrationen ergibt sich das Problem, dass für altlastenrelevante organische Schadstoffparameter keine Richt- oder Grenzwerte für Gemüsepflanzen existieren. Lediglich für Benzo(a)pyren enthält die Schadstoff-Höchstmengenverordnung (SHmV) einen Grenzwert von 1 µg/kg FG für Getreidebeikost für Säuglinge und Kleinkinder. Dieser Referenzwert besitzt für die im Rahmen dieses Leitfadens betrachtete Fragestellung jedoch nur geringe Relevanz. Wie Tabelle 6 zeigt, weist Getreide im Vergleich zu Gemüsepflanzen ein deutlich geringeres Anreicherungsvermögen für organische Schadstoffe auf. Bei den in Tabelle 6 dargestellten Transferfaktoren für Weizen ist zu berücksichtigen, dass sich diese auf Weizenstroh beziehen. Da im allgemeinen die Schadstoffanreicherung in generativen Pflanzenteilen deutlich geringer ist als in Wurzel, Sprossachse oder Blättern, ist davon auszugehen, dass die Transferfaktoren für das als Nahrungsmittel genutzte Weizenkorn noch unterhalb der in Tabelle 6 für Weizenstroh aufgeführten Transferfaktoren liegen.

### **3.2.2 Nutzung „Haus-/Kleingärten“**

Die Quantifizierung des Schadstofftransfers Boden-Pflanze erfolgt bei der Nutzung „Haus-/Kleingärten“ analog zur Vorgehensweise, wie sie in Kapitel 3.2.1 für die Nutzung „Ackerbau/Erwerbsgemüsebau“ beschrieben wurde. Im Unterschied zur landwirtschaftlichen Nutzung

werden die in privaten Haus- und Kleingärten angebauten Nahrungspflanzen jedoch nicht vermarktet, sondern dienen der Selbstversorgung. Dieser Umstand kann unter bestimmten Randbedingungen eine weitergehende Betrachtung in Form einer standortspezifischen Expositions- und Risikoabschätzung erforderlich machen. Mittels dieser ist zu klären, ob für die Nutzer der Fläche durch den Verzehr von selbst angebautem Gemüse eine gesundheitlich bedenkliche Schadstoffaufnahme zu besorgen ist.

Eine standortspezifische Expositions- und Risikoabschätzung ist in denjenigen Fällen in Betracht zu ziehen, in denen

- die zu bewertende Fläche aktuell zum Anbau von Nahrungspflanzen genutzt wird,
- die Ergebnisse der durchgeführten Transferabschätzungen Boden-Pflanze deutlich erhöhte Schadstoffgehalte in den Ernteprodukten erwarten lassen oder diese durch entsprechende Pflanzenuntersuchungen (siehe Kapitel 3.3) bereits nachgewiesen wurden, und
- aufgrund der Größe der Nutzgartenfläche von einer relevanten Selbstversorgungsquote mit Gemüse und Obst aus dem Eigenanbau auszugehen ist.

Bezüglich des letztgenannten Punktes ist festzustellen, dass eine relevante Selbstversorgung aus dem eigenen Garten nur für diejenigen Fälle plausibel anzunehmen ist, in denen für den Nutzpflanzenanbau eine gewisse Mindestfläche zur Verfügung steht. So dürfte sich beispielsweise bei einem 20 m<sup>2</sup> großen Nutzgarten die theoretisch mögliche Selbstversorgungsquote für eine 4-köpfige Familie auf wenige Prozent belaufen. Die benötigte Nutzfläche, um für Obst und Gemüse eine 100%-ige Selbstversorgung zu realisieren, ist mit ca. 100-200 m<sup>2</sup> / Person zu veranschlagen (LUA NRW, 2000).

Die fachgerechte Durchführung einer quantitativen Expositions- und Risikoabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch ist mit einem vergleichsweise hohen Untersuchungsaufwand verbunden und setzt seitens des Bearbeiters eine intensive Auseinandersetzung mit den Parametern und Annahmen, die in die Modellrechnungen eingehen, voraus. Daher sollte bei der Entscheidung, ob entsprechende aufwändige Untersuchungen veranlasst werden sollen, das Prinzip der Verhältnismäßigkeit berücksichtigt werden. Im Rahmen des Entscheidungsprozesses sollte sorgfältig gegeneinander abgewogen werden,

- ob eine deutliche Reduzierung der Schadstoffexposition nicht durch einfache Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen erreicht werden kann (z.B. Verzicht auf den Anbau von Gemüsearten mit hohem Schadstoffanreicherungspotenzial, anbau- und erntetechnische Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers Boden-Pflanze, vgl. Tabelle 9, Kap. 4.1), oder
- ob derartige Maßnahmen eine so starke Nutzungseinschränkung darstellen, dass sie nur dann ergriffen werden sollten, wenn auch die Ergebnisse einer standortspezifischen Expositions- und Risikoabschätzung deren Notwendigkeit belegen.

Um eine quantitative Expositions- und Risikoabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch durchführen zu können, sind Angaben zu folgenden Parametern erforderlich:

- Schadstoffkonzentration in der Nahrungspflanze (Ernteprodukt),

- Verzehrmenge an selbst angebautem Gemüse und Obst,
- Resorptionsquote des Schadstoffes im Magen-Darm-Trakt,
- Wirkungsmechanismus des Schadstoffes (toxische oder/und kanzerogene Effekte),
- Tolerierbare resorbierte Schadstoffdosis (= toxikologisch begründeter Referenzwert, mit dem die schadstoffspezifische Körperdosis, die für die betroffenen Nutzer rechnerisch ermittelt wird, in Bezug zu setzen ist),
- Schadstoffspezifische Hintergrundbelastung (= Schadstoffbelastung, die aus dem Verzehr anderer Nahrungsmittel und der Schadstoffaufnahme aus der Umgebungsluft resultiert).

Die fachlichen Grundlagen der quantitativen Expositions- und Risikoabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch lassen sich aufgrund der Komplexität der Methodik im Rahmen dieses Leitfadens nicht im Detail darstellen, so dass hier auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden muss. Eine Zusammenstellung entsprechender Literaturquellen enthält die nachfolgende Tabelle.

Expositionsparameter	Ableitungs- / Literaturhinweise
Schadstoffkonzentration in der Nahrungspflanze (Ernteprodukt)	Sofern keine Ergebnisse von entsprechenden Pflanzenuntersuchungen vorliegen, kann die Schadstoffbelastung der angebauten Nahrungspflanzen mittels Transferberechnungen abgeschätzt werden. Zur Quantifizierung des Stofftransfers Boden-Pflanze können die in Kapitel 3.2.1.1 (anorganische Stoffe) bzw. 3.2.1.2 (organische Stoffe) erläuterten methodischen Hilfsmittel (Regressionsgleichungen, Transferfaktoren, Transfermodelle) herangezogen werden.
Verzehrmenge an selbst angebautem Gemüse und Obst	LUA NRW (2001) Delschen & Leisner-Saaber (1998) Mazath (1993) Steffens et al. (1991)
Resorptionsquote des Schadstoffes im Magen-Darm-Trakt	Bek. BBodSchV (1999) Eikmann et al. (1999)
Wirkungsmechanismus des Schadstoffes (toxische oder/und kanzerogene Effekte)	UBA (1999)
Tolerierbare resorbierte Schadstoffdosis	
Schadstoffspezifische Hintergrundbelastung	

Tabelle 7: Bearbeitungshinweise für die quantitative Expositions- und Risikoabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch



### 3.2.3 Nutzung „Grünland“

Bei der Nutzung „Grünland“ steht die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen als Weideland (neben der Nutzung als Mähwiese) und damit die Gefahrenbeurteilung für den Transferpfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier im Vordergrund. Gemäß BBodSchV sind des Weiteren auch Ackerflächen, die dem Anbau von Futtergräsern oder Silomais dienen, anhand der Maßnahmenwerte für die Nutzung „Grünland“ zu bewerten (vgl. Kap. 2.1).

#### 3.2.3.1 Anorganische Schadstoffe

Die Ableitung der in Anhang 2 Nr. 2.3 BBodSchV dargestellten Maßnahmenwerte für die Nutzung „Grünland“ erfolgte ebenfalls auf der Grundlage der von Knoche et al. (1999) abgeleiteten Regressionsgleichungen. Diese Funktionen können im Rahmen einer Detailuntersuchung eingesetzt werden, um ausgehend von den ermittelten Bodengehalten die Schadstoffkonzentration in der Futterpflanze abzuschätzen. Eine Zusammenstellung der für die pflanzlichen Futtermittel Grünlandaufwuchs und Mais vorliegenden Regressionsfunktionen enthält Anhang 5 dieses Leitfadens.

Bei der Bewertung des Pfades Boden-Nutzpflanze-Nutztier ist zu berücksichtigen, dass der Schadstofftransfer über diesen Pfad durch die **unvermeidbare Verschmutzung** des Futters

- durch direkte Bodenaufnahme der Tiere beim Weiden oder
- durch anhaftende Bodenpartikel bei der Ernte

nicht unwesentlich erhöht wird.

Die Höhe des Beitrages, den der Verschmutzungspfad zur Schadstoffbelastung von Futterpflanzen liefert, wird maßgeblich bestimmt durch

- die **Art des angebauten Futtermittels** (bodennah wachsende Futtermittel wie z.B. Gras und Futterrüben sind in der Regel deutlich stärker durch anhaftende Bodenpartikel verschmutzt als Futtermittel, die aus bodenfern wachsenden Pflanzenteilen gewonnen werden, wie dies z.B. bei Mais der Fall ist) und
- die **Art der Flächenbewirtschaftung**.

Einfluss auf den Verschmutzungsgrad haben dabei insbesondere folgende Vorgänge (LVVG Aulendorf & IB Feldwisch, 2007):

- Aufspritzen von Bodenpartikeln durch Regentropfenaufprall („Splash“),
- Aufwirbeln von Bodenpartikeln durch Wind (Winderosion),
- Verschmutzen von Weideaufwuchs durch Viehtritt,
- Beimischung von Bodenpartikeln während der Ernte.

Untersuchungen zeigten, dass abhängig von den Randbedingungen der Weidehaltung bzw. der eingesetzten Ernteverfahren Futtermittel mit Bodenbeimengungen von bis zu 10 % verunreinigt sein können (LUA BB, 2003).

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über Faktoren, die sich reduzierend bzw. erhöhend auf den bodenbürtigen Verschmutzungsanteil von Futtermitteln auswirken können.

<b>Einflussfaktoren</b>	<b>geringerer Verschmutzungsanteil</b>	<b>höherer Verschmutzungsanteil</b>
<b>1. Allgemeine Faktoren</b>		
Tierart	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rind</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaf, Pferd</li> </ul>
Bodenfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht vernässte Böden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stau-, Haft- und Grundwasserböden</li> </ul>
<b>2. Faktoren bei der Weidehaltung</b>		
Geländemorphologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ebene Lage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stark geneigte Lage</li> </ul>
Weideführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portionsweide</li> <li>• Sommerbeweidung bzw. nur in trockenen Perioden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standweide</li> <li>• Ganzjährige Beweidung bzw. auch in nassen Perioden</li> </ul>
Grünlandzustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dichte Grasnarbe</li> <li>• Keine / geringe Maulwurfsaktivität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lockere bis zerstörte Grasnarbe</li> <li>• Hohe Maulwurfsaktivität</li> </ul>
Viehbesatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedriger Besatz: Rinder &lt; 1 Rind/ha Schafe &lt; 10 Schafe/ha Pferde &lt; 0,7 Pferde/ha</li> <li>• Angepasstes Futterangebot, ggf. Beifütterung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Besatz: Rinder &gt; 1,5 Rind/ha Schafe &gt; 15 Schafe/ha Pferde &gt; 1,1 Pferde/ha</li> <li>• Zu geringes oder zu großes Futterangebot; keine Beifütterung</li> </ul>
<b>3. Faktoren bei Wiesennutzung / Verwendung von Ackerfutter</b>		
Geländemorphologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glatte Oberfläche, ebene Lage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ungleichmäßige Oberfläche, stark geneigte Lage</li> </ul>
Futterkonservierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuchtsilage</li> </ul>
Futtermitteln	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Anteil an Silomais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Futterrüben, Grasschnitt bei tief eingestellten Mähwerkzeugen, Zuckerrübenblattsilage</li> </ul>
<b>4. Faktoren der Futtergewinnung</b>		
Witterung bei der Ernte / Bodenzustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trocken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nass</li> </ul>
Erntetechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gut eingestellte Mähgeräte, Mähbalken hoher Schnitt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlecht eingestellte Mähgeräte, insbesondere bei Kreiselmähern; niedriger Schnitt</li> </ul>

Tabelle 8: Einflussfaktoren auf den bodenbürtigen Verschmutzungsanteil von Futtermitteln (aus LUA BB, 2003)

Hinweise, wie der Verschmutzungsanteil von Futtermitteln im Rahmen einer Detailuntersuchung für die Nutzung „Grünland“ abgeschätzt und in die Bewertung mit einbezogen werden kann, enthält Anhang 5 dieses Leitfadens.

Als Bewertungsmaßstab für die Beurteilung der rechnerisch ermittelten Schadstoffbelastung von Futtermitteln können für die Parameter Arsen, Blei, Cadmium und Quecksilber die

entsprechenden Grenzwerte der Futtermittelverordnung herangezogen werden (FuttMV, 2008). Für die Elemente Kupfer und Zink enthält die Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 der Europäischen Kommission Höchstgehalte für Futtermittel (EU, 2003). Die Bewertung von Nickel- und Thallium-Gehalten von Futtermitteln kann, analog zur Vorgehensweise bei der Ableitung der Maßnahmenwerte der BBodSchV, anhand der VDI-Richtwerte für maximale Immissionswerte zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere (VDI, 1991; VDI, 1992) erfolgen. Eine Zusammenstellung der genannten Grenz- und Richtwerte enthält Tabelle A - 8 in Anhang 7.

### 3.2.3.2 Organische Schadstoffe

Bezüglich der Aufnahme von organischen Schadstoffen in Pflanzen liegen Untersuchungen und quantitative Abschätzungen (z.B. in Form von Transferfaktoren) vorrangig für Nahrungspflanzen vor. Um die Schadstoffbelastung von Futterpflanzen, die auf Flächen mit erhöhten Gehalten organischer Kontaminanten wachsen, abzuschätzen, sind komplexe Modellrechnungen erforderlich. Hinweise auf entsprechende Fachpublikationen, die hierfür herangezogen werden können, enthält Kapitel 3.2.1.2.

Bei der Quantifizierung des Schadstofftransfers ist zu berücksichtigen, dass bei organischen Verbindungen die systemische Aufnahme über die Wurzel häufig nur in geringem Umfang erfolgt und der Verschmutzungspfad den dominierenden Aufnahmepfad darstellt. Dies gilt insbesondere für bodennah wachsende Futterpflanzen wie z.B. Grünlandaufwuchs.

Die gemäß Anhang 5 der Futtermittelverordnung zulässigen Höchstgehalte bzw.

Aktionsgrenzwerte für altlastenrelevante organische Schadstoffe sind in Anhang 7 (Tab. A - 9 und A - 10) zusammengestellt.

## 3.3 Pflanzenuntersuchungen

Bei der Planung und Durchführung von Schadstoffanalysen in Nutzpflanzen ist zu beachten, dass es sich hierbei um relativ aufwendige Untersuchungen handelt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass der bei einer Pflanzenuntersuchung gemessene Schadstoffgehalt nur für diesen Probenahmezeitpunkt und diese Pflanzencharge aussagekräftig ist. Um im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung zu repräsentativen Ergebnissen zu gelangen, sind insbesondere folgende Aspekte bei der Erstellung eines Untersuchungsprogrammes zu berücksichtigen (LUA NRW, 2006):

- Chemische Analyseverfahren zur Ermittlung der Schadstoffgehalte in Pflanzen liegen nicht für alle altlastenrelevanten Schadstoffparameter vor. Während für die meisten Schwermetalle aus der Praxis der Lebensmittelüberwachung entsprechende Analyseverfahren zur Verfügung stehen, existieren für organische Parameter nur in vergleichsweise geringem Umfang validierte Untersuchungsmethoden. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang u.a. Analyseverfahren für die Parameter PCB und PCDD/F.
- Bei der Beurteilung der Ergebnisse von Pflanzenuntersuchungen auf organische Schadstoffparameter ist zu berücksichtigen, dass organische Substanzen durch pflanzliche Stoffwechselprozesse in ihrer chemischen Struktur verändert werden können. Wissenschaftliche Erkenntnisse in Bezug auf die beim Abbau von organischen Schadstoffen in Pflanzen entstehenden Metaboliten liegen bislang nur in geringem Umfang vor. Darüber hinaus unterscheiden sich die einzelnen Pflanzenarten in Bezug auf den Metabolismus von Xenobiotika zum Teil deutlich voneinander. Aus den oben genannten Gründen werden daher bei Pflanzenuntersuchungen Abbauprodukte von organischen Schadstoffen häufig analytisch nicht erfasst und entziehen sich somit einer toxikologischen Bewertung.
- Der Umfang der Schadstoffaufnahme in Pflanzen wird von den Anbaubedingungen (u.a. Düngereinsatz, Bewässerung, Kulturdauer, Erntezeitpunkt, Ernteverfahren) beeinflusst. Die im Bereich der zu bewertenden Fläche praktizierten Anbaumethoden sollten daher im Rahmen der Untersuchungen dokumentiert und die Beprobungsmethoden so gewählt werden, dass sie die Einflüsse der Bewirtschaftung und der eingesetzten Ernteverfahren auf die Schadstoffbelastung der Nutzpflanzen berücksichtigen (insbesondere die erntebedingte Verschmutzung mit Bodenpartikeln).

- Bei der Durchführung von Pflanzenuntersuchungen sollten möglichst parallel auch Bodenproben, die unmittelbar aus dem Wurzelbereich der jeweiligen Pflanzenproben gewonnen wurden, analysiert werden (Untersuchung von sog. „echten“ Pflanze-/Boden-Probenpaaren). Werden Pflanzen- und Bodenproben an unterschiedlichen Punkten entnommen, schränkt dies die Aussagekraft der durchzuführenden Transferabschätzungen ein.
- Die Auswahl der zu untersuchenden Pflanzenarten sollte sowohl entsprechend des Spektrums der vor Ort angebauten Nutzpflanzen erfolgen, als auch das Schadstoffanreicherungsvermögen der einzelnen Nutzpflanzenarten berücksichtigen. Die Höhe des Schadstofftransfers Boden-Pflanze kann sowohl von Pflanzenart zu Pflanzenart als auch zwischen den verschiedenen Sorten *einer* Pflanzenart erheblich variieren.
- Für die Gefahrenbeurteilung für das Schutzgut menschliche Gesundheit maßgebend ist die Schadstoffkonzentration in den verzehrbaren Pflanzenteilen der jeweiligen Nutzpflanze. Bei der chemischen Analyse der Ernteprodukte ist im Rahmen der Probenvorbereitung die übliche küchentechnische Aufbereitung (z.B. Waschen bei Blattgemüse, Schälen bei Wurzelgemüsen) zu berücksichtigen.
- Bei der Untersuchung von Futterpflanzen ist bei der Probenvorbereitung zu entscheiden, ob anhaftende Bodenpartikel und damit der Verschmutzungspfad in die Untersuchung mit einbezogen werden sollen.
- Die Anzahl der zu analysierenden Pflanzenproben ist abhängig von der Größe der gärtnerischen/landwirtschaftlichen Nutzfläche und des Spektrums der angebauten Nutzpflanzen. Darüber hinaus muss die Probenanzahl auch unter statistischen Aspekten für eine Auswertung ausreichend bemessen sein.
- Bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass diese unter Umständen nur eine zeitlich begrenzte Gültigkeit besitzen, da aufgrund witterungsbedingter Einflussfaktoren abweichende Resultate für andere Anbaujahre nicht ausgeschlossen werden können.

## 4 Handlungsempfehlungen

Führen die Ergebnisse der Detailuntersuchung zu der Erkenntnis, dass aufgrund des Umfangs des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze gesundheitsschädigende Wirkungen auf den Menschen (Nutzungen „Haus- / Kleingärten“ und „Ackerbau / Erwerbsgemüsebau“) oder Nutztiere (Nutzungen „Grünland / Futterpflanzenanbau“)

- zu besorgen sind (Besorgnisbereich) bzw.
- mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten oder bereits eingetreten sind (Gefahrenbereich),

sind geeignete Maßnahmen zur Vorsorge bzw. zur Gefahrenabwehr zu ergreifen. Liegt eine Überschreitung von Maßnahmenwerten vor, so ist gemäß § 8 Abs. 1 Nr. 2 BBodSchG unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen und es sind Maßnahmen nach § 2 Abs. 7 oder 8 BBodSchG (Sanierungsmaßnahmen bzw. Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen) einzuleiten.

Ziel dieser Maßnahmen muss es sein, den Schadstofftransfer über den Pfad Boden-Nutzpflanze (bzw. Boden-Nutzpflanze-Nutztier/Mensch) so weit einzuschränken, dass er ein unbedenkliches Maß nicht übersteigt. Dieses Ziel kann grundsätzlich mittels folgender Maßnahmen erreicht werden (LABO, 1998):

- Maßnahmen zur **Verminderung der Schwermetallmobilität** im Boden,
- **Anbau-** und/oder **erntetechnische Maßnahmen** zur Verringerung der Relevanz des Verschmutzungspfades,
- **Nutzungseinschränkungen** bzw. **–änderungen**,
- **technische Sanierungsmaßnahmen** (Dekontaminationsverfahren).

#### **4.1 Nutzungen „Ackerbau / Erwerbsgemüsebau“ und „Haus- / Kleingärten“**

Die Mobilität von Schwermetallen und damit die Aufnahme in Pflanzen über den systemischen Pfad kann durch eine Erhöhung des Boden-pH-Wertes (z.B. durch Kalkung) deutlich verringert werden. Bei Relevanz der systemischen Schadstoffaufnahme kann auch der Verzicht auf den Anbau mäßig bis stark anreichernder Nutzpflanzenarten eine wirksame Maßnahme sein. So weisen z.B. Gerste und Roggen ein geringeres Aufnahmevermögen für Cadmium auf als Weizen (bzgl. des relativen Schwermetallanreicherungsvermögens von Gemüsepflanzen siehe Tabelle 5).

Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Reduzierung des Schadstofftransfers über den Verschmutzungspfad ist eine Überdeckung der Bodenoberfläche mit einer ca. 30 cm mächtigen Schicht aus unbelastetem Bodenmaterial oder Mulchmaterialien. Besonders empfindlich für den Verschmutzungspfad sind Pflanzen, deren verzehrbare Anteile bodennah wachsen und die zudem nicht durch vor dem Verzehr entfernte Pflanzenteile (z. B. Schalen, Hüllblätter) vor einem Kontakt mit belasteten Bodenpartikeln geschützt sind. Als wichtige Nahrungspflanzen, auf die die genannten Eigenschaften zutreffen, sind insbesondere Spinat, Blattsalate, Mangold und Erdbeeren sowie verschiedene Küchenkräuter, zu nennen. Die Erdbeere ist in diesem Zusammenhang von besonderer Relevanz, weil aufgrund der weichen Fruchtschale eine intensive Reinigung der oft auf dem Boden lagernden Früchte nur unzureichend möglich ist.

Andere Gemüsearten, die durch ihre äußeren, üblicherweise nicht verzehrten Blätter gegenüber einem direkten Schadstoffübergang geschützt sind (z.B. Kopfkohlarten, Rosenkohl, Porree, Zwiebel), die vor dem Verzehr geschält werden (z.B. Möhren, Kartoffeln, Kohlrabi, Sellerie, Schwarzwurzel und Spargel), oder die nicht bodennah wachsen (z. B. Stangenbohnen, Tomaten) sind dagegen als unempfindlicher einzustufen.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Maßnahmen zur Verminderung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Mensch, die im Vorfeld von Dekontaminationsmaßnahmen zur Anwendung kommen können, zusammen.

## Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Art der Maßnahmen	Nutzung	
	Ackerbau / Erwerbsgemüsebau	Haus- / Kleingärten
Maßnahmen zur Verringerung der Schwermetallmobilität im Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle und ggf. Korrektur des Boden-pH (z.B. Kalkung)</li> <li>• Zugabe von Sorptionsträgern (z.B. tonhaltige Substrate)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle und ggf. Korrektur des Boden-pH (z.B. Kalkung)</li> <li>• Zugabe von Sorptionsträgern (z.B. tonhaltige Substrate)</li> </ul>
Anbau- und/oder erntetechnische Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifikation der Anbautechnik durch Verwendung von Stroh oder Mulchmaterialien zur Vermeidung von Verschmutzungen bodennah wachsender Pflanzenarten</li> <li>• Anwendung verschmutzungsarmer Ernteverfahren (kein zu tiefer Schnitt etc.)</li> <li>• Anpassen des Erntezeitpunktes (keine Ernte nach aktuellen Staubimmissions- oder Überschwemmungsereignissen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung von Mulchmaterialien zur Vermeidung von Verschmutzungen bodennah wachsender Pflanzenarten</li> <li>• Überdeckung der belasteten Flächen mit unbelastetem Bodenmaterial (z.B. in Form von Hochbeeten), ggf. in Kombination mit technischen Barrieren (Sperrschicht, Spatensperre)</li> <li>• Beratung im Hinblick auf eine Schadstoffreduktion durch küchentechnische Aufbereitung von selbsterzeugtem Obst und Gemüse (Waschen, Schälen)</li> </ul>
Nutzungseinschränkungen bzw. -änderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermarktung von Lebensmitteln nur nach Nachweis der Unbedenklichkeit durch Pflanzenuntersuchungen</li> <li>• Anbaubeschränkungen in Abhängigkeit von Umfang und Höhe der Bodenbelastung, ggf. <ul style="list-style-type: none"> <li>– Einschränkung des Anbaus von mäßig bis stark schadstoffanreichernden Nutzpflanzenarten und -sorten</li> <li>– Umstellung auf den Anbau von Nicht-Nahrungspflanzen (z.B. Zierpflanzen, nachwachsende Rohstoffe)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einschränkung des Anbaus von mäßig bis stark schadstoffanreichernden Nutzpflanzenarten und -sorten</li> <li>• Anbaubeschränkungen in Abhängigkeit von Umfang und Höhe der Bodenbelastung, ggf. <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verringerung der Anbaufläche für Gemüse und Obst</li> <li>– Umstellung auf den Anbau von Beerenobst und Fruchtgemüse bzw. Kern- und Steinobst</li> <li>– Umstellung von Nutzgarten auf Ziergarten</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 9: Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Mensch (nach LABO, 1998; LUA BB, 2003)

## 4.2 Nutzung „Grünland“

Bei den Maßnahmen für die Nutzung „Grünland“ steht die **Verringerung der Belastung über den Verschmutzungspfad** im Vordergrund. Die Auswahl geeigneter Maßnahmen richtet sich dabei nach der Art der Nutzung. Im Einzelnen ist hier zu differenzieren zwischen

- **Weidenutzung**,
- **Wiesennutzung** (Schnittnutzung von Grünland zur Erzeugung von Grünfutter, Silage, Heu) und
- **Feldfutterbau** (Anbau von Futtermitteln wie z.B. Mais).

Eine Auflistung von spezifischen Maßnahmen, die bei den genannten Nutzungen ergriffen werden können, um den Schadstofftransfer über den Verschmutzungspfad zu reduzieren, enthält Anhang 8.

## **Anhang**

### **Materialien & Quellenverzeichnis**

## Anhang 1

### **Ergänzende Hinweise zu den Extraktionsverfahren für die quantitative Bestimmung von anorganischen Schadstoffen in Bodenproben**

Zur Quantifizierung des Schwermetallgehaltes von Bodenproben müssen diese zunächst mittels einer geeigneten Methode aufgeschlossen werden. Die BBodSchV sieht hierzu abhängig von der Art der Nutzung bzw. dem zu bewertenden Schutzgut die beiden folgenden Extraktionsmethoden vor:

- a) **Ammoniumnitrat-Extraktion** nach DIN 19730,
- b) **Königswasser-Extraktion** nach DIN ISO 11466: 06.97.

zu a):

Bei der erstgenannten Methode handelt es sich um eine Extraktion mit einer verdünnten Salzlösung, welche eine Abschätzung der **im Porenwasser gelösten** und damit für die Wurzelaufnahme relevanten **Schwermetallfraktion** liefert. Sie wird eingesetzt, um eine Prognose über die Schwermetallaufnahme über den systemischen Pfad zu treffen.

zu b):

Beim Verschmutzungspfad ist für das Ausmaß der Schadstoffaufnahme in die Pflanze weniger die „mobile“ Schwermetallfraktion denn der **Schwermetallgesamtgehalt** des Bodens von Bedeutung. Die Quantifizierung der Schadstoffaufnahme über den Verschmutzungspfad erfolgt daher gemäß BBodSchV auf der Grundlage der Königswasser-extrahierbaren Schwermetallgehalte im Boden.

Mittels der Königswasser-Extraktion wird der mobile Schwermetallgehalt und ein Großteil des nichtmobilen Schwermetallgehaltes des Bodens, nicht jedoch der Gesamtgehalt an Schwermetallen erfasst. Dennoch wird in der Regel aus Gründen der Vereinfachung bei der Gefahrenbeurteilung für den Pfad Boden-Nutzpflanze der Königswasser-extrahierbare Schwermetallgehalt als „Schwermetallgesamtgehalt“ bezeichnet (Bek. BBodSchV, 1999, S. 37).

Bei der Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte für die Nutzungen Ackerbau und Nutzgarten (Anhang 2 Nr. 2.2 und Nr. 2.4 BBodSchV) ergaben sich bei der Auswertung der vorliegenden Literaturdaten zum Schwermetalltransfer Boden-Pflanze in der Regel signifikantere Korrelationen zwischen den gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Boden und den korrespondierenden Schadstoffgehalten in der Pflanze, wenn die Bestimmung der Bodengehalte mittels Ammoniumnitrat-Extraktion erfolgte. Eine Ausnahme stellten die Elemente Arsen und Quecksilber dar, für die sich eine bessere Abschätzung des Boden-Pflanze-

Transfers auf der Basis der Königswasser-extrahierbaren Bodengehalte ergab (LABO, 1998). Aus diesem Grund sieht die BBodSchV für Arsen und Quecksilber auch bei der Gefahrenbeurteilung für die Nutzungen „Ackerbau“ und „Haus-/Kleingärten“ die Bestimmung aus dem Königswasser-Extrakt vor.

## Anhang 2

### Ergänzende Hinweise zu den Extraktions- und Analyseverfahren für die quantitative Bestimmung von organischen Schadstoffen in Bodenproben

#### 1 PAK-Analytik nach DIN ISO 18287

Die Extraktion erfolgt mit Aceton und Petrolether. Aceton ist ein wirkungsvolles Extraktionsmittel, insbesondere weil es Bodenaggregate aufbricht. Petrolether erhöht die Extraktionseffizienz und wird als Lösungsmittel für den anschließenden Konzentrationsschritt benötigt. Zur Extraktion von PAK sollten mindestens 50 ml Aceton und 50 ml Petrolether (für chemisch getrocknete Proben) eingesetzt werden. Bei Verwendung von frischen Proben sollte das Volumen an Aceton mindestens 100 ml betragen. Unterschiedliche Extraktionsverfahren können zu gleichen Ergebnissen führen, wenn die oben genannten Empfehlungen eingehalten werden. Enthält die Probe eine große Menge Wasser oder wurde der Probe Wasser zugesetzt, sollte Kochsalz (NaCl) der Probe zur Erhöhung der Extraktionseffizienz beigemischt werden.

In dieser Internationalen Norm werden die alternativen Extraktionsverfahren A und B beschrieben:

- Verfahren A (Zwei-Schritt-Verfahren): Eine feldfeuchte Bodenprobe wird zweimal mit Aceton extrahiert, anschließend wird dem Acetonextrakt Petrolether zugesetzt. Der Extrakt wird zweimal mit Wasser gewaschen. Die organische Schicht wird mit wasserfreiem Natriumsulfat getrocknet.
- Verfahren B (Ein-Schritt- oder On-Line-Verfahren): Eine feldfeuchte Bodenprobe wird mit einem Gemisch aus Aceton, Petrolether, Wasser und Natriumchlorid extrahiert, wobei das Mischungsverhältnis festgelegt ist. Ein Aliquot der organischen Schicht wird mit wasserfreiem Natriumsulfat getrocknet.

Sofern erforderlich, können ein Reinigungsschritt durch Adsorptionschromatographie an Kieselgel sowie ein Einengungsschritt durchgeführt werden. Anschließend wird der Extrakt durch Kapillar-Gaschromatographie analysiert. Die Identifizierung und die Quantifizierung der PAK erfolgt durch massenspektrometrischen Nachweis unter Anwendung der geeigneten deuterierten PAK als interne Standards.

#### 2 PCB-Analytik nach DIN 38407 F3

Die Analyse der PCB in Boden- und Feststoffproben erfolgt im Labor routinemäßig analog DIN 38407 F3 mit Hilfe von GC/ECD (Gaschromatographie gekoppelt mit Elektroneneinfangdetektor) oder GC/MS (Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektroskopie) bei vorheriger Extraktion mit Hexan. Bei einer GC/MS-Kopplung besteht der Vorteil gegenüber der GC/ECD-Technik darin, dass die PCB-Kongenere auch bei Vorhandensein anderer ECD-aktiver Verbindungen, wie z.B. Chlorparaffinen und PCB-Ersatzstoffen wie TCBT, sicher identifiziert und quantifiziert werden können. Die Bestimmungsgrenze beträgt 0,01 mg/kg (bezogen auf Einzelstoff).

In Feststoffproben mit sehr hoher, nicht ECD-aktiver, organischer Belastung oder in organischen Flüssigkeiten (z.B. Mineralöl) werden die PCB mittels GC/ECD-Detektion bestimmt. Die Bestimmungsgrenze beträgt hier 0,1 mg/kg.

Im Rahmen einer Evaluierung von Analyseverfahren durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurden im Rahmen der PCB-Bestimmung drei Verfahren lt. BBodSchV (E DIN ISO 10382, DIN 38414-20, VDLUFA-Methodenbuch Bd. VII) miteinander verglichen (Traub et. al., 2002). Bis auf die Ergebnisse aus einer Versuchsreihe zeigten diese drei PCB-Verfahren vergleichbare Ergebnisse. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass die ASE-Extraktion (beschleunigte Extraktion mit Lösungsmitteln gemäß BAM-Hausverfahren) bei allen untersuchten Böden zur höchsten PCB-Wiederfindung führt. Sowohl GC/ECD als auch GC/MS (DIN 38407) sind geeignet, um PCB-haltige Böden zu analysieren. Traub et al. (2002) empfehlen, mit einem internen Standard zu arbeiten, welcher der Bodenprobe vor Beginn der Extraktion zugesetzt wird. Bezüglich des Arbeits- und Zeitbedarfs der verglichenen Extraktionsverfahren ist die Schüttelmethode gemäß VDLUFA die aufwendigste.

## Anhang 3

### Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Nahrungspflanze

#### 1 Ableitungsmethodik der Regressionsgleichungen

Die Datenbank „TRANSFER“ des Umweltbundesamtes enthält die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen zum Stofftransfer im System Boden-Pflanze. Der Datenbestand umfasst mehr als 300.000 Datenpaare Boden/Pflanze. Die von Knoche et al. (1999) vorgenommene Auswertung des Datenbestandes erfolgte unter besonderer Berücksichtigung folgender Aspekte:

- Bei der Auswertung des Datenbestandes wurden ausschließlich Ergebnisse von Studien berücksichtigt, bei denen die Bestimmung des Schwermetallgehaltes des Bodens mittels **Königswasser-Extraktion** oder **Ammoniumnitrat-Extraktion** erfolgte.
- Aus dem sich auf diese Weise ergebenden Teildatenbestand wurden anschließend alle diejenigen Datensätze entfernt, die aus Versuchen mit einer künstlichen Schadstoffbelastung des Bodens und/oder aus Gefäßversuchen stammten. Bedingt durch dieses Auswahlkriterium wurden somit ausschließlich Ergebnisse aus **realistischen Freilanduntersuchungen** berücksichtigt.

Der verbliebene Datenbestand (ca. 61.000 Datenpaare für Königswasser-Extraktion und ca. 21.000 Datenpaare für Ammoniumnitrat-Extraktion) wurde anschließend mittels Regressionsberechnungen ausgewertet, um zu ermitteln, ob zwischen den Schwermetallkonzentrationen im Boden und in der Pflanze ein statistischer Zusammenhang besteht. Die Regressionsberechnungen erfolgten jeweils unter Zugrundelegung folgender Konventionen:

- **Abhängige** Variable ist die Schwermetallkonzentration in der Pflanze.
- **Unabhängige** Variable ist die Schwermetallkonzentration im Boden.
- Bei der Auswertung der TRANSFER-Datenbank wurden auch multiple Regressionen durchgeführt, indem die Bodenparameter pH-Wert, Ton-Gehalt und C<sub>org</sub>-Gehalt, welche die Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen beeinflussen, in die entsprechenden Berechnungen einbezogen wurden, wenn diese Angaben in den Datensätzen verfügbar waren. Die Berücksichtigung der oben genannten Parameter führte jedoch nur zu geringfügigen Verbesserungen des Bestimmtheitsmaßes der jeweiligen Korrelationsgleichungen.
- Bei der Auswertung wurden ausschließlich Werte berücksichtigt, die **oberhalb** der jeweils angegebenen **Bestimmungsgrenze** lagen.
- Aufgrund der Vielzahl der in der Datenbank „TRANSFER“ enthaltenen Pflanzenarten wurde die Auswertung auf diejenigen Pflanzenarten beschränkt, für die einerseits eine **ausreichende Anzahl an Boden/Pflanze-Datenpaaren** vorlag, und die andererseits unter verschiedenen Gesichtspunkten (z.B. hohes Anreicherungsvermögen für Schwermetalle) von **besonderer Relevanz** sind.
- Die in der TRANSFER-Datenbank enthaltenen Boden- und Pflanzenkonzentrationen wurden grundsätzlich **in logarithmierter Form** verrechnet, um auf diese Weise den Einfluss extremer Konzentrationen zu mindern.
- Als Ergebnis der statistischen Auswertung des Datenbestandes wurden jeweils Regressionsgeraden ermittelt, welche das 50. Perzentil der Verteilung markieren. Die zugehörigen Regressionsgleichungen besitzen die folgende allgemeine Form:

$$\log C_{\text{Pflanze}} = \text{Konstante A} + \text{Konstante B} \times \log C_{\text{Boden}}$$

Zusätzlich zu der Regressionsgeraden wurde jeweils das **60 %-Konfidenzintervall der Einzelwerte** (Wertepaare Boden/Pflanze) berechnet, d.h.

- dass ca. 20 % der Werte oberhalb des **oberen Konfidenzintervalles** (= UICI, Upper Individual Confidence Intervall, entspricht dem 80. Perzentil der Verteilung) und
- ca. 20 % unterhalb des **unteren Konfidenzintervalles** (= LICI, Lower Individual Confidence Intervall, entspricht dem 20. Perzentil der Verteilung) liegen.

Die methodische Vorgehensweise bei der regressionsanalytischen Auswertung der TRANSFER-Datenbank veranschaulicht beispielhaft die nachfolgende Abbildung.

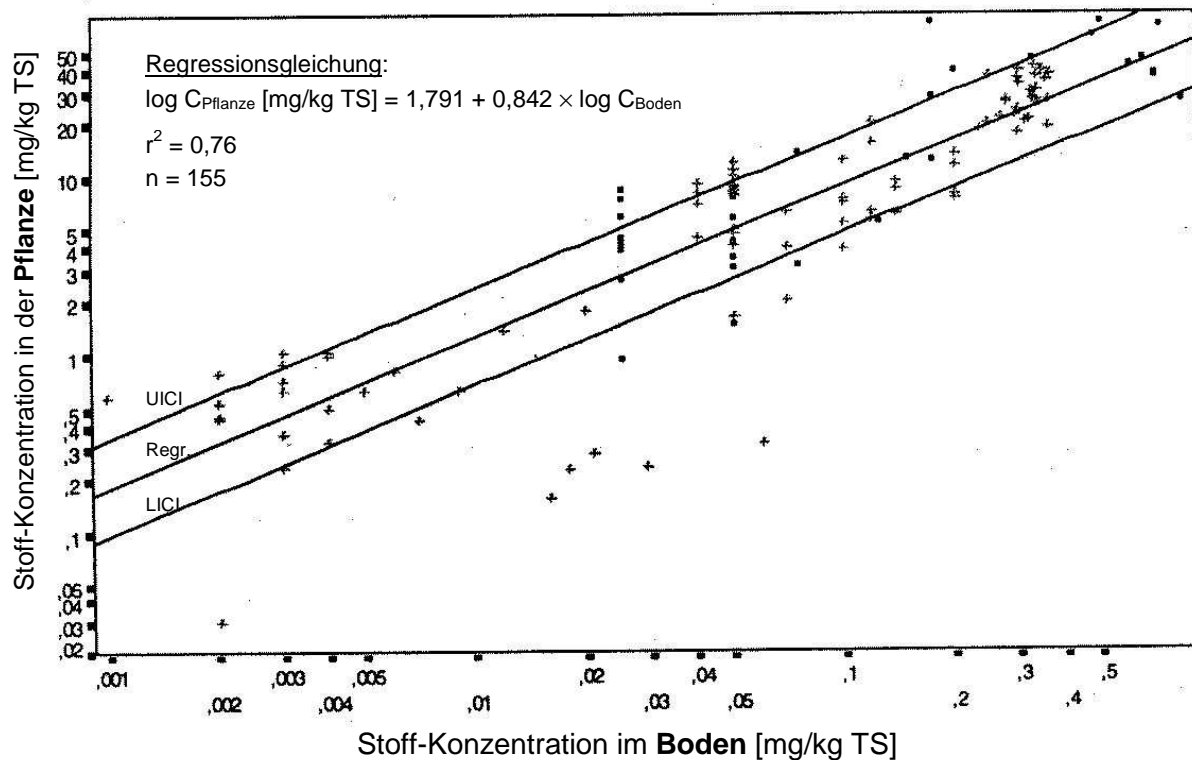


Abbildung A - 1: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse der regressionsanalytischer Auswertung der TRANSFER-Datenbank des Umweltbundesamtes - Beziehung zwischen den Schwermetallgehalten im Boden (x-Achse) und den Schwermetallgehalten in der Pflanze (y-Achse); Darstellung der Stoff-Konzentrationen in der Pflanze und im Boden in logarithmierter Form;  $r^2$  = Bestimmtheitsmaß, n = Anzahl der ausgewerteten Datensätze, UICI = Upper Individual Confidence Intervall (80. Perzentil), Regr. = Regressionsgerade (50. Perzentil), LICI = Lower Individual Confidence Intervall (20. Perzentil), aus Knoche et al. (1999), verändert

## 2 Regressionsgleichungen zur Abschätzung des Schadstofftransfers Boden-Nahrungspflanze

In der nachfolgenden Tabelle A - 1 sind vorrangig Regressionsgleichungen für Nutzpflanzenarten dargestellt, die für den jeweiligen Schadstoff ein **hohes Anreicherungsvermögen** besitzen. Die genannten Regressionsfunktionen berücksichtigen die Vorgaben der BBodSchV bezüglich der für die einzelnen Schwermetalle jeweils anzuwendenden Extraktionsverfahren (vgl. Tabelle 4, Kap. 3.1.2.1).

- Für **Cadmium** wird in der Tabelle A - 1 die Regressionsfunktion für die bezüglich dieses Elementes als hoch anreichernd eingestufte Nutzpflanzenart Spinat angegeben.
- Für **Blei** und **Thallium** liegen entsprechende Regressionsfunktionen für die als hoch anreichernd klassifizierten Nutzpflanzen (vgl. Tabelle 5) nicht vor. In der Tabelle A - 1

werden daher für die beiden letztgenannten Elemente Regressionsfunktionen aufgeführt, die für die als mäßig anreichernd eingestufte Gemüseart Spinat ermittelt wurden.

- Für das Element **Arsen** wird die für Salat errechnete Regressionsgleichung zur Abschätzung des Boden-Pflanze-Transfers herangezogen. Für die genannte Pflanzenart ergab die statistische Auswertung der vorliegenden Daten eine befriedigende Korrelation zwischen den Arsen-Gehalten im Boden und den korrespondierenden Pflanzengehalten (Bestimmtheitsmaß  $r^2 = 0,47$ ).
- Für **Quecksilber** ergaben sich bei der Auswertung der TRANSFER-Datenbank im Vergleich zu den anderen untersuchten Elementen nur relativ schwache Korrelationen zwischen Boden- und Pflanzengehalten. Für die Dosisberechnung für den Boden-Pflanze-Pfad wird die Regressionsgleichung herangezogen, die für Spinat ermittelt wurde. Diese erwies sich bei den von Knoche et al. (1999) durchgeführten regressionsanalytischen Auswertungen als für das genannte Element empfindlichste Kultur. Zugleich ergab sich für diese Gemüseart ein ausreichend signifikanter Zusammenhang zwischen den Stoffgehalten im Boden und den im Ernteprodukt gemessenen Gehalten ( $r^2 = 0,37$ ).
- Für die Elemente **Kupfer**, **Nickel** und **Zink** sind in dem oben genannten UBA-Bericht Regressionsgleichungen jeweils nur für eine Nutzpflanzenart verfügbar. Bei diesen handelt es sich jeweils um diejenigen Gemüsearten, die sich im Hinblick auf das Kriterium Phytotoxizität als empfindlichste Kulturen erwiesen. Bei den entsprechenden Nutzpflanzen treten Wachstumsbeeinträchtigungen und damit verbunden Ertragsrückgänge bereits bei Bodengehalten der oben genannten Elemente auf, bei denen Beeinträchtigungen der Pflanzenqualität hinsichtlich ihrer Eignung als Lebensmittel in der Regel noch nicht zu erwarten sind. Die für Zink angegebene Regressionsfunktion besitzt im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung für den Pfad Boden-Nutzpflanze-Mensch nur eingeschränkte Aussagekraft, da sie für den Schadstoffübergang Boden-Zuckerrübe (Blatt) ermittelt wurde. Für das Element Zink liegen jedoch Regressionsgleichungen für andere Nutzpflanzenarten, die gemäß der Methodik von Knoche et al. (1999) abgeleitet wurden, nicht vor.

Stoff	Extraktionsverfahren	Nutzpflanze	Regressionsfunktion	$r^2$	n
Arsen	KW	Salat	$\log C_{\text{Pflanze}} = -1,138 + 0,560 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-1,138 + 0,560 \log C_{\text{Boden}})$	0,47	110
Blei	AN	Spinat	$\log C_{\text{Pflanze}} = 1,354 + 0,595 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (1,354 + 0,595 \log C_{\text{Boden}})$	0,40	118
Cadmium	AN	Spinat	$\log C_{\text{Pflanze}} = 1,791 + 0,842 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (1,791 + 0,842 \log C_{\text{Boden}})$	0,76	155
Kupfer	AN	Salat	$\log C_{\text{Pflanze}} = 1,247 + 0,473 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (1,247 + 0,473 \log C_{\text{Boden}})$	0,80	26
Nickel	AN	Spinat	$\log C_{\text{Pflanze}} = 0,981 + 0,708 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (0,981 + 0,708 \log C_{\text{Boden}})$	0,46	88
Quecksilber	KW	Spinat	$\log C_{\text{Pflanze}} = -1,067 + 0,352 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-1,067 + 0,352 \log C_{\text{Boden}})$	0,37	150
Thallium	AN	Spinat	$\log C_{\text{Pflanze}} = 1,302 + 1,305 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (1,302 + 1,305 \log C_{\text{Boden}})$	0,77	29

## Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Stoff	Extraktionsverfahren	Nutzpflanze	Regressionsfunktion	r <sup>2</sup>	n
Zink	AN	Zuckerrübenblatt	$\log C_{\text{Pflanze}} = 2,219 + 0,323 \log C_{\text{Boden}}$ $\Rightarrow C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (2,219 + 0,323 \log C_{\text{Boden}})$	0,61	51
AN = Ammoniumnitrat-Extraktion, KW = Königswasser-Extraktion, C <sub>Pflanze</sub> = Stoffkonzentration in der Pflanze in [mg/kg TS], C <sub>Boden</sub> = Stoffkonzentration im Boden in [mg/kg TS], r <sup>2</sup> = Bestimmtheitsmaß, n = Anzahl der ausgewerteten Datensätze					

Tabelle A - 1: Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Nutzpflanze–Mensch für Nutzpflanzen mit hohem relativem Anreicherungsvermögen (nach Knoche et al., 1999)

In denjenigen Fällen, in denen bei der Detailuntersuchung gezielt eine Transferabschätzung für andere Nutzpflanzenarten durchgeführt werden soll, können alternativ bzw. zusätzlich auch die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Regressionsgleichungen zur Expositionsabschätzung herangezogen werden.

Stoff	Extraktionsverfahren	Pflanzenart	Regressionsgleichung
Arsen	KW	Kartoffel	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-4,597 + 1,650 \log C_{\text{Boden}})$
	KW	Möhre	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-2,789 + 0,685 \log C_{\text{Boden}})$
	KW	Salat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-1,138 + 0,560 \log C_{\text{Boden}})$
	KW	Spinat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-2,912 + 1,211 \log C_{\text{Boden}})$
	KW	Weizen	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-1,297 + 0,226 \log C_{\text{Boden}})$
	KW	mäßig anreichernde Gemüsearten	keine signifikante Korrelation
Blei	AN	Kartoffel	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-0,302 + 0,327 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Möhre	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,746 + 0,412 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Salat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,753 + 0,710 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Spinat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,354 + 0,595 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Weizen	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-0,271 + 0,185 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	mäßig anreichernde Gemüsearten	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,749 + 0,673 \log C_{\text{Boden}})$
Cadmium	AN	Kartoffel	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-0,350 + 0,208 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Möhre	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,564 + 0,433 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Salat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,253 + 0,629 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Spinat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,791 + 0,842 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	Weizen	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,270 + 0,594 \log C_{\text{Boden}})$
	AN	mäßig anreichernde Gemüsearten	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,128 + 0,857 \log C_{\text{Boden}})$
Kupfer	AN	Salat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,247 + 0,473 \log C_{\text{Boden}})$
Nickel	AN	Spinat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,981 + 0,708 \log C_{\text{Boden}})$
Quecksilber	KW	Kartoffel	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-3,033 + 0,151 \log C_{\text{Boden}})$

## Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Stoff	Extraktionsverfahren	Pflanzenart	Regressionsgleichung
	KW	Salat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-1,200 + 0,348 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
	KW	Spinat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-1,067 + 0,352 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
	KW	mäßig anreichernde Gemüsearten	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-1,300 + 0,116 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
Thallium	AN	Möhre	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,641 + 1,266 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
	AN	Salat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,127 + 0,994 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
	AN	Spinat	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,302 + 1,305 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
	AN	mäßig anreichernde Gemüsearten	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (0,734 + 1,182 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
Zink	AN	Zuckerrübe (Blatt)	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (2,219 + 0,323 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
AN = Ammoniumnitrat-Extraktion, KW = Königswasser-Extraktion, $C_{\text{Pflanze}}$ = Stoffkonzentration in der Pflanze in [mg/kg TS], $C_{\text{Boden}}$ = Stoffkonzentration im Boden in [mg/kg TS]			

Tabelle A - 2: Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Nutzpflanze–Mensch (nach Knoche et al., 1999)

Die Anwendung der in Tabelle A - 1 und Tabelle A - 2 dargestellten Regressionsgleichungen soll nachfolgend anhand eines Beispiels veranschaulicht werden.

### Berechnungsbeispiel

Schadstoff:	Blei
Nutzpflanze:	Spinat
Ermittelte Blei-Konzentration <u>im Boden</u> (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -Extraktion):	0,2 mg/kg TS
Regressionsgleichung für Cadmium-Transfer Boden-Pflanze (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -Extraktion) (→ <i>Tabelle A - 2</i> ):	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (1,354 + 0,595 \text{ log } C_{\text{Boden}})$

**Berechnung der Schadstoffkonzentration in der Pflanze:**

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Pflanze}} &= \text{INV log} (1,354 + 0,595 \text{ log } C_{\text{Boden}}) \\
 &= \text{INV log} (1,354 + 0,595 \text{ log} (0,2 \text{ mg/kg TS})) \\
 &= \text{INV log} (1,354 + 0,595 \times (-0,699)) \\
 &= \text{INV log} (0,938) \\
 &= 9 \text{ mg/kg TS}
 \end{aligned}$$

## Anhang 4

### Referenzwerte zur Beurteilung von anorganischen Schadstoffgehalten in Nahrungspflanzen

Die nachfolgende Tabelle fasst die die maximal zulässigen Blei- und Cadmiumgehalte in pflanzlichen Nahrungsmitteln gemäß **Schadstoffhöchstmengen-Verordnung** zusammen.

	Höchstgehalt [mg/kg Frischgewicht]
<b>Blei</b>	
Getreide, Hülsengemüse und Hülsenfrüchte	0,20
Gemüse, ausgenommen Kohlgemüse, Blattgemüse, frische Kräuter und Pilze <sup>(1) (2)</sup>	0,10
Kohlgemüse, Blattgemüse und Kulturpilze <sup>(1)</sup>	0,30
Früchte, ausgenommen Beeren und Kleinobst <sup>(1)</sup>	0,10
Beeren und Kleinobst <sup>(1)</sup>	0,20
<b>Cadmium</b>	
Getreide, ausgenommen Kleie, Keime, Weizen und Reis	0,10
Kleie, Keime, Weizen und Reis	0,20
Gemüse und Früchte, ausgenommen Blattgemüse, frische Kräuter, Pilze, Stengelgemüse, Pinienkerne, Wurzelgemüse und Kartoffeln <sup>(1)</sup>	0,050
Blattgemüse, frische Kräuter, Kulturpilze und Knollensellerie <sup>(1)</sup>	0,20
Stengelgemüse, Wurzelgemüse und Kartoffeln <sup>(1) (2)</sup> , ausgenommen Knollensellerie.	0,10
<sup>(1)</sup> Der Höchstgehalt gilt nach dem Waschen der Früchte bzw. des Gemüses und dem Abtrennen der genießbaren Teile.	
<sup>(2)</sup> Im Fall von Kartoffeln gilt der Höchstgehalt für geschälte Kartoffeln.	

Tabelle A - 3: Höchstgehalte für anorganische Kontaminanten in pflanzlichen Lebensmitteln gemäß EU- Schadstoffhöchstmengen-Verordnung (EG) 1881/2006

Eine Übersicht über die ZEBS-Richtwerte für verschiedene Schwermetalle gibt Tabelle A - 4. Dabei ist folgendes zu berücksichtigen:

- Die ZEBS-Richtwerte haben keinen gesetzlich bindenden, sondern einen administrativen, orientierenden Charakter haben. Sie sollen den für die Lebensmittel zuständigen Behörden sowie auch den Produzenten und Distributoren von Lebensmitteln aufzeigen, wann unerwünscht hohe Schadstoffkonzentrationen in Lebensmitteln vorliegen. Die Richtwerte werden nach statistischen, gesundheitlichen und auch die Versorgung der Bevölkerung berücksichtigenden Gesichtspunkten festgelegt.
- Mit dem Inkrafttreten der EU-Verordnung über die Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln im April 2002 (Verordnung (EG) 466/2001, später ersetzt durch Verordnung (EG) 1881/2006) wurden die ZEBS-Werte für Blei und Cadmium durch entsprechende Grenzwerte der o.g. Schadstoffhöchstmengen-Verordnung abgelöst (siehe Tabelle A - 3). Gemäß Aussage des Bundesumweltministeriums können die ZEBS-Werte für diejenigen Sachverhalte, die in der EU-Verordnung nicht geregelt werden, jedoch weiterhin als Beurteilungsgrundlage dienen (BMU, 2008).
- Bei der Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Pflanze wurden die **doppelten ZEBS-Werte** als Beurteilungsmaßstab für die höchstzulässige Schadstoffkonzentration in pflanzlichen Nahrungsmitteln zugrunde gelegt. Die doppelten ZEBS-Werte sind in der Praxis der Lebensmittelüberwachung als Indikator einer „echten“ Richtwertüberschreitung gebräuchlich (Bek. BBodSchV, 1999).

Lebensmittel	ZEBS-Richtwerte [mg/kg Frischgewicht] <sup>(1)</sup>			
	Blei	Cadmium	Quecksilber	Thallium
Weizen	0,30	0,10	0,03	-
Roggen	0,40	0,10	0,03	-
Schalenobst	0,50	0,05	0,03	0,1
Kartoffeln	0,25	0,10	0,02	-
Blattgemüse (ausgenommen Petersilienblätter, Küchenkräuter, Spinat)	0,80	0,10	0,05	0,1
Petersilienblätter, Küchenkräuter	2,00	0,10	0,05	0,1
Spinat	0,80	0,50	0,05	0,1
Sprossgemüse	0,50	0,10	0,05	0,1
Fruchtgemüse	0,25	0,10	0,05	0,1
Wurzelgemüse (ausgenommen Knollensellerie)	0,25	0,10	0,05	0,1
Knollensellerie	0,25	0,20	0,05	-
Beeren-, Kern-, Steinobst	0,50	0,05	0,03	0,1

<sup>(1)</sup> Richtwerte beziehen sich jeweils auf die verzehrbaren Pflanzenanteile

Tabelle A - 4: ZEBS-Richtwerte für pflanzliche Lebensmittel (BGVV; 1997)

Tabelle A - 3 und Tabelle A - 4 dargestellten Grenz- bzw. Richtwerte können nicht direkt zum Vergleich mit den mittels Regressionsgleichungen ermittelten Pflanzenkonzentrationen herangezogen werden, da die genannten Werte unterschiedliche Einheiten besitzen. Während

sich die Höchstgehalte der EU-Verordnung und die ZEBS-Werte auf das Frischgewicht der verzehrbaren Pflanzenteile beziehen, erfolgt die rechnerische Abschätzung der in der Pflanze zu erwartenden Schadstoffkonzentration in der Einheit mg/kg Trockensubstanz. Um die oben genannten Referenzwerte verwenden zu können, ist es daher erforderlich, diese auf Stoffgehalte in mg/kg Trockensubstanz umzurechnen. Entsprechende Umrechnungen wurden auch bei der Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV durchgeführt. Hierzu wurden die von Souci et al. (1986) angegebenen Wassergehalte pflanzlicher Nahrungsmittel herangezogen. Die entsprechenden Daten fasst die nachfolgende Tabelle zusammen.

Nahrungspflanze (verzehrbarer Anteil)	Wassergehalt [%]
Weizenkörner	13,2
Roggenkörner	13,7
Blattgemüse (ausgenommen Petersilienblätter, Küchenkräuter, Spinat)	90,0
Petersilienblätter	81,9
Küchenkräuter	81,9
Spinat	91,6
Kopfsalat u.a. Salate	95,0
Wurzelgemüse (ausgenommen Knollensellerie)	90,0
Knollensellerie	88,6
Möhren	88,2
Kartoffeln	77,8
Sprossgemüse	90,0
Fruchtgemüse	92,0
Früchte und Rhabarber	94,5
(Schalen-)Obst	90,0

Tabelle A - 5: Wassergehalte verzehrbare Pflanzenteile (nach Souci et al., 1986)

Wie die in Tabelle A - 5 dargestellten Angaben zum Wassergehalt für die oben beschriebene Umrechnung von zulässigen Schadstoffhöchstgehalten in die Einheit [mg/kg TM] herangezogen werden können, soll das nachfolgende Beispiel veranschaulichen.

### Berechnungsbeispiel

Schadstoff:	Cadmium
Nutzpflanze:	Blattgemüse (z.B. Salat)
Zulässiger Höchstgehalt gemäß EU-Verordnung (EG) 1881/2006 (→ Tabelle A - 3):	0,20 mg/kg <u>FG</u>

Wassergehalt (WG) des pflanzl. Lebensmittels (→ Tabelle A - 5):	95,0 %
--	--------

**Berechnung von auf die Pflanzen-Trockensubstanz bezogenen zulässigen Schadstoffhöchstgehalten:**

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Pfl., zul.}} \text{ [mg/kg TM]} &= \frac{\text{zul. Höchstgehalt [mg/kg FG]}}{100 \% - \text{WG [\%]}} \\
 &= \frac{0,20 \text{ mg/kg FG}}{100 \% - 95,0 \%} \\
 &= \frac{0,20}{0,05} = 4 \text{ mg/kg TM}
 \end{aligned}$$

Bei der Bewertung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze sind neben schädigenden Wirkungen auf die menschliche Gesundheit durch schadstoffbelastete pflanzliche Nahrungsmittel bei bestimmten Schadstoffparametern auch **phytotoxische Effekte** zu berücksichtigen. Dies ist bei den anorganischen Schadstoffen Arsen, Kupfer, Nickel, Zink der Fall. Gemäß LABO (1998) treten bei Vorhandensein dieser Stoffe im Boden Ertragsdepressionen bei landwirtschaftlichen/gärtnerischen Kulturen eher auf als Beeinträchtigungen der Pflanzenqualität. Die nachfolgende Tabelle enthält Angaben zu Stoffgehalten in Pflanzen, bei deren Überschreitung bei Nutzpflanzen Ertragsdepressionen >10 % auftreten. Diese Schadstoffgehalte, die je nach Pflanzenart variieren, werden in LABO (1998) wie folgt angegeben.

Stoff	Stoffkonz., bei der Ertragsdepressionen > 10 % bei Kulturpflanzen auftreten [mg/kg pflanzl. TM]	geometrischer Mittelwert [mg/kg pflanzl. TM]
Arsen	3 – 10	5,5
Kupfer	15 – 40	24
Nickel	20 – 100	45
Zink	150 – 500	270

Tabelle A - 6: Schadstoffgehalte in Nutzpflanzen, bei deren Überschreitung Ertragsdepressionen >10 % auftreten (nach Sauerbeck, 1989, aus LABO, 1998)

## Anhang 5

### Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Futterpflanze

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die von Knoche et al. (1999) abgeleiteten Gleichungen für die Futtermittelpflanzen Grünlandaufwuchs und Mais. Bezüglich der zugrunde liegenden Ableitungsmethodik sei auf die entsprechenden Ausführungen in Anhang 2 verwiesen.

Stoff	Extraktionsverfahren	Futterpflanze	Regressionsfunktion	r <sup>2</sup>	n
Arsen	KW	Grünlandaufwuchs	$\log C_{\text{Pflanze}} = -1,772 + 0,747 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-1,772 + 0,747 \log C_{\text{Boden}})$	0,49	115
Blei			$\log C_{\text{Pflanze}} = -0,985 + 0,571 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-0,985 + 0,571 \log C_{\text{Boden}})$	0,44	468
Cadmium			$\log C_{\text{Pflanze}} = -0,659 + 0,343 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-0,659 + 0,343 \log C_{\text{Boden}})$	0,24	744
Kupfer			$\log C_{\text{Pflanze}} = 0,861 + 0,088 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (0,861 + 0,088 \log C_{\text{Boden}})$	0,06	189
Nickel			$\log C_{\text{Pflanze}} = -0,45 + 0,491 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-0,45 + 0,491 \log C_{\text{Boden}})$	0,15	104
Quecksilber			$\log C_{\text{Pflanze}} = -1,339 + 0,186 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-1,339 + 0,186 \log C_{\text{Boden}})$	0,14	1025
Zink			$\log C_{\text{Pflanze}} = 1,240 + 0,234 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (1,240 + 0,234 \log C_{\text{Boden}})$	0,15	294
Blei	KW	Mais	$\log C_{\text{Pflanze}} = -0,750 + 0,398 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-0,750 + 0,398 \log C_{\text{Boden}})$	0,17	114
Cadmium			$\log C_{\text{Pflanze}} = -0,650 + 0,568 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-0,650 + 0,568 \log C_{\text{Boden}})$	0,40	139
Quecksilber			$\log C_{\text{Pflanze}} = -1,518 + 0,389 \log C_{\text{Boden}}$ ⇒ $C_{\text{Pflanze}} = \text{INV} \log (-1,518 + 0,389 \log C_{\text{Boden}})$	0,41	61
KW = Königswasser-Extraktion, C <sub>Pflanze</sub> = Stoffkonzentration in der Pflanze in [mg/kg TM], C <sub>Boden</sub> = Stoffkonzentration im Boden in [mg/kg TM], r <sup>2</sup> = Bestimmtheitsmaß, n = Anzahl der ausgewerteten Datensätze					

Tabelle A - 7: Regressionsgleichungen zur Quantifizierung des Transfers von anorganischen Schadstoffen über den Pfad Boden–Futterpflanze–Nutztier für Grünlandaufwuchs und Mais (nach Knoche et al., 1999)

## Anhang 6

### Hinweise zur Abschätzung des Verschmutzungsanteils von Futtermitteln im Rahmen einer Detailuntersuchung für die Nutzung „Grünland“

Bei der Ableitung der Maßnahmenwerte der BBodSchV für die Nutzung „Grünland“ wurde davon ausgegangen, dass für die Kontamination von pflanzlichen Futtermitteln, die auf einer schadstoffbelasteten Fläche wachsen, sowohl die systemische Aufnahme über die Wurzel als auch der Verschmutzungspfad von Bedeutung sind. Zur Berücksichtigung des letztgenannten Pfades wurde bei der rechnerischen Ableitung der Maßnahmenwerte ein bodenbürtiger Verschmutzungsanteil des Futtermittels von 3 % zugrunde gelegt. Hierzu führten Knoche et al. (1999) Regressionsberechnungen nicht nur mit den Original-Daten aus der TRANSFER-Datenbank sondern auch mit rechnerisch korrigierten Pflanzendaten durch. Letzteres erfolgte in der Weise, dass zu den in der TRANSFER-Datenbank enthaltenen Schwermetallkonzentrationen in der Pflanze jeweils **3 % der Königswasser-löslichen Schwermetallkonzentration** des jeweils zugehörigen Bodens (= angenommener Verschmutzungsanteil) **addiert** wurde.

Für die Abschätzung des Verschmutzungsanteils von Futtermitteln im Rahmen einer Detailuntersuchung für die Nutzung „Grünland“ wird vorgeschlagen, folgende, im Leitfaden zur Untersuchung und Bewertung des Wirkungspfades Boden-Pflanze-Tier (LUA BB, 2003) dargestellten Konventionen zu übernehmen:

- Sofern keine konkreten Anhaltspunkte für einen besonders geringen oder besonders hohen Verschmutzungsgrad der auf der zu bewertenden Fläche angebauten Futtermittel vorliegen, sollte – analog zur Ableitung der Maßnahmenwerte der BBodSchV – von einem **bodenbürtigen Verschmutzungsanteil von 3 %** ausgegangen werden, d.h. der berechneten Pflanzenkonzentration sind 3 % der im Boden ermittelten Schadstoffkonzentration (Königswasser-Extraktion) hinzu zu addieren.
- Wenn aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen ein relativ geringer Verschmutzungsgrad zu erwarten ist (vgl. Tabelle 8, mittlere Spalte), sollte **1 % des Königswasser-extrahierbaren Bodengehaltes** der rechnerisch ermittelten Pflanzenkonzentration hinzu addiert werden.
- Liegen deutliche Anhaltspunkte dafür vor, dass von einer überdurchschnittlich starken Verschmutzung des Futtermittels auszugehen ist (vgl. Tabelle 8, rechte Spalte), kann auch bereits bei Bodengehalten unterhalb der Maßnahmenwerte der BBodSchV eine Gefahrenlage zu besorgen sein. Um bei der Abschätzung der Schadstoffbelastung des Futtermittels dem erhöhten bodenbürtigen Verschmutzungsanteil Rechnung zu tragen, sollte dieser mit **6 % des Königswasser-extrahierbaren Bodengehaltes** angenommen werden.

Die quantitative Abschätzung der Schwermetallbelastung von Grünlandaufwuchs unter Berücksichtigung des bodenbürtigen Verschmutzungsanteils veranschaulicht das nachfolgende Berechnungsbeispiel.

### Berechnungsbeispiel

Schadstoff:	Blei
Nutzpflanze:	Grünlandaufwuchs

Ermittelte Blei-Konzentration im Boden (Königswasser-Extraktion):	600 mg/kg TS
Regressionsgleichung für Blei-Transfer Boden-Gründlandaufwuchs (Königswasser-Extraktion) (→ Anhang 4, Tabelle A - 7):	$C_{\text{Pflanze}} = \text{INV log} (-0,985 + 0,571 \text{ log } C_{\text{Boden}})$
angenommener bodenbürtiger Verschmutzungsgrad:	mittel (= 3 % des Königswasser-extrahierbaren Bodengehaltes)

**Berechnung der beurteilungsrelevanten Schadstoffbelastung von Grünlandaufwuchs:**

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Pflanze}} &= \text{INV log} (-0,985 + 0,571 \text{ log } C_{\text{Boden}}) + 0,03 C_{\text{Boden}} \\
 &= \text{INV log} (-0,985 + 0,571 \text{ log} (600 \text{ mg/kg TS})) + 0,03 \times 600 \text{ mg/kg TS} \\
 &= \text{INV log} (-0,985 + 0,571 \times (2,778)) + 0,03 \times 600 \text{ mg/kg TS} \\
 &= \text{INV log} (0,601) + 18 \text{ mg/kg TS} \\
 &= 3,99 \text{ mg/kg TS} + 18 \text{ mg/kg TS} \\
 &= 22 \text{ mg/kg TS}
 \end{aligned}$$

## Anhang 7

### Referenzwerte zur Beurteilung von Schadstoffgehalten in pflanzlichen Futtermitteln

#### 1 Anorganische Schadstoffe

Zur Beurteilung der Schadstoffbelastung von Futtermitteln können die Grenzwerte der Futtermittelverordnung herangezogen werden. Mit der 24. Verordnung zur Änderung der Futtermittelverordnung vom 09.12.2003 wurden die Vorgaben der EU-Richtlinie 2002/32/EG vom 07.05.2002 über unerwünschte Stoffe und Erzeugnisse in der Tierernährung in nationales Recht umgesetzt. Die in Anhang 5 der aktuellen Fassung der Futtermittelverordnung (FuttMV, 2008) genannten zulässigen Höchstgehalte für die anorganischen Stoffe **Arsen**, **Blei**, **Cadmium** und **Quecksilber** können Tabelle A - 8 entnommen werden. Für die Elemente **Kupfer** und **Zink** enthält die Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 der Europäischen Kommission entsprechende zulässige Höchstgehalte. Für die Elemente **Nickel** und **Thallium** wurden bei der Ableitung der Maßnahmenwerte der BBodSchV für die Nutzung „Grünland“ VDI-Richtwerte für maximale Immissionswerte zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere zugrunde gelegt. Die nachfolgende Tabelle fasst die oben beschriebenen Referenzwerte für die Beurteilung von Schadstoffgehalten in Futtermitteln zusammen. Diese beziehen sich jeweils auf Futtermittel mit einem Wassergehalt von 12 %. Da die rechnerische Abschätzung der in der Futterpflanze zu erwartenden Schadstoffkonzentration in der Einheit mg/kg Trockensubstanz erfolgt, ist eine Umrechnung der Grenz- bzw. Richtwerte in Stoffgehalte mit der Einheit mg/kg Trockensubstanz erforderlich. Die Ergebnisse dieser Umrechnung sind ebenfalls in Tabelle A - 8 dargestellt.

Schadstoff	Produkt	Zulässiger Höchstgehalt [mg/kg Futter mit 12 % Wassergehalt]	Zulässiger Höchstgehalt [mg/kg Futter TS]
Arsen <sup>1)</sup>	Einzelfuttermittel, ausgenommen	2	2,3
	– Grünmehl, Luzernegrünmehl und Klee grünmehl sowie getrocknete (melassierte) Zuckerrübenschnitzel	4	4,5
	Alleinfuttermittel für landwirtschaftliche Nutztiere	2	2,3

Schadstoff	Produkt	Zulässiger Höchstgehalt [mg/kg Futter mit 12 % Wassergehalt]	Zulässiger Höchstgehalt [mg/kg Futter TS]
	Ergänzungsfuttermittel, ausgenommen Mineralfuttermittel	4	4,5
Blei <sup>1)</sup>	Einzeluttermittel, ausgenommen	10	11
	– Grünfutter einschließlich Heu, Grünfuttersilage, frisches Gras	30	34
	Alleinuttermittel	5	5,7
	Ergänzungsfuttermittel, ausgenommen Mineralfuttermittel	10	11
Cadmium <sup>1)</sup>	Einzeluttermittel pflanzlichen Ursprungs	1	1,1
	Ergänzungsfuttermittel für u.a. landwirtschaftliche Nutztiere	0,5	0,57
	Alleinuttermittel für Rinder, Schafe und Ziegen, ausgenommen	1	1,1
	– Alleinuttermittel für Kälber, Lämmer und Ziegenlämmer	0,05	0,06
Kupfer <sup>2)</sup>	Alleinuttermittel für Rinder, ausgenommen	35	40
	– Alleinuttermittel für Rinder vor dem Wiederkäueralter	15	17
	Alleinuttermittel für Schafe	15	17
	Alleinuttermittel für u.a. sonstige Nutztierarten	25	28
Nickel <sup>3)</sup>	Futtermittel für Rinder	50	57
Quecksilber <sup>1)</sup>	Einzeluttermittel, ausgenommen Futtermittel aus der Verarbeitung von Meerestieren	0,1	0,11
	Alleinuttermittel für u.a. landwirtschaftliche Nutztiere	0,1	0,11
	Ergänzungsfuttermittel für u.a. landwirtschaftliche Nutztiere	0,2	0,23
Thallium <sup>4)</sup>	Futtermittel für Mastbullen	1	1,1
	Futtermittel für Schafe	0,5	0,57
Zink <sup>2)</sup>	Alleinuttermittel für u.a. landwirtschaftliche Nutztiere, ausgenommen Milchaustauschfuttermittel	150	171
<sup>1)</sup> Zulässige Höchstgehalte an unerwünschten Stoffen gemäß Futtermittelverordnung (FuttMV, 2008) <sup>2)</sup> Zulässige Höchstgehalte an Zusatzstoffen gemäß Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 (EU, 2003) <sup>3)</sup> Richtwert nach VDI (1991) <sup>4)</sup> Richtwert nach VDI (1992)			

Tabelle A - 8: Richt- und Grenzwerte für anorganische Kontaminanten in Futtermitteln

## 2 Organische Schadstoffe

Die beiden nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die gemäß Anhang 5 der Futtermittelverordnung zulässigen Höchstgehalte bzw. Aktionsgrenzwerte für verschieden Pestizide (Tabelle A - 9), Dioxine und polychlorierte Biphenyle (Tabelle A - 10).

Schadstoff	Produkt	Zulässiger Höchstgehalt [mg/kg Futter mit 12 % Wassergehalt]	Zulässiger Höchstgehalt [mg/kg Futter TS]
Aldrin, Dieldrin, einzeln oder insgesamt, berechnet als Dieldrin	Alle Futtermittel, ausgenommen Fette und Öle sowie Alleinfuttermittel für Fische	0,01	0,011
DDT (Summe aus DDT-, DDD- (oder TDE-) und DDE-Isomeren, berechnet als DDT)	Alle Futtermittel, ausgenommen Fette und Öle	0,05	0,057
Hexachlorbenzol (HCB)	Alle Futtermittel, ausgenommen Fette und Öle	0,01	0,011
Hexachlorcyclohexan (HCH)			
- alpha-Isomere	Alle Futtermittel, ausgenommen Fette und Öle	0,02	0,023
- beta-Isomere	Alle Einzelfuttermittel, ausgenommen Fette und Öle	0,01	0,011
	Alle Mischfuttermittel, ausgenommen:	0,01	0,011
	- Mischfuttermittel für Milchvieh	0,005	0,006
- gamma-Isomere	Alle Futtermittel, ausgenommen Fette und Öle	0,2	0,227

Tabelle A - 9: Grenzwerte für organische Kontaminanten in Futtermitteln gemäß Anhang 5 Futtermittelverordnung

Schadstoff	Produkt	Höchstgehalt [ng WHO-PCDD/F- /PCB-TEQ / kg Futter mit 12 % Wassergehalt]	Aktions- grenzwert <sup>1)</sup> [ng WHO-PCDD/F- /PCB-TEQ / kg Futter mit 12 % Wassergehalt]
Dioxine (Summe PCDD/PCDF)	Einzelfuttermittel pflanzlichen Ursprungs außer pflanzlichen Ölen und Nebenerzeugnissen	0,75	0,5
	Mischfuttermittel, ausgenommen Mischfuttermittel für Pelztier, Heimtiere und Fische	0,75	0,5
Summe Dioxine und dioxinähnliche PCB	Einzelfuttermittel pflanzlichen Ursprungs außer pflanzlichen Ölen und Nebenerzeugnissen	1,25	-
	Mischfuttermittel, ausgenommen Mischfuttermittel für Pelztier, Heimtiere und Fische	1,5	-
Dioxinähnliche PCB	Einzelfuttermittel pflanzlichen Ursprungs außer pflanzlichen Ölen und Nebenerzeugnissen	-	0,35
	Mischfuttermittel, ausgenommen Mischfuttermittel für Pelztier, Heimtiere und Fische	-	0,5
<sup>1)</sup> Bei Überschreitung eines Aktionsgrenzwertes sind Untersuchungen durchzuführen, um die Kontaminationsursachen zu ermitteln, und Maßnahmen zu ihrer Verringerung oder Beseitigung zu treffen			

Tabelle A - 10: Grenzwerte für Dioxine und dioxinähnliche PCB in Futtermitteln gemäß Anhang 5 Futtermittelverordnung (FuttMV, 2008)

## **Anhang 8**

### **Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Verschmutzungspfad bei der Nutzung „Grünland“ (Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier)**

## 1 Weidenutzung

Weidenutzung		
Ursache der Verschmutzung	Mögliche Maßnahmen	Konsequenzen / mögliche Umsetzungshemmnisse
<p>Narbenschäden durch starke Trittbelastung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiere nehmen Schmutzanteile beim Fressen auf</li> <li>• Hufe und Klauen verschmutzen das noch verbleibende „gute“ Futter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Weidegang bei Regen – Tieren auf befestigter Platte oder im Laufstall Auslauf gewähren</li> <li>• Kurze Weidephasen mit stark verringerter Besatzdichte</li> <li>• Viehbesatzdichte reduzieren Wechsel der Tierart (keine Pferde oder Schafe wegen artbedingt tiefem Verbiss, soweit sie zur Nahrungsmittelproduktion herangezogen werden)</li> <li>• Nach- oder Übersaat</li> <li>• Platzwechsel der Weidetore und Tränkestellen</li> <li>• Unterstand (Hütte) mit befestigter Bodenplatte, Ausweichen auf trockenere Weideflächen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialkosten und Arbeitsaufwand können die Umsetzung erschweren.</li> <li>• Zusätzliche Bodenversiegelung für das Anlegen eines befestigten Auslaufes steht dem Bodenschutzziel entgegen, möglichst sparsam mit Böden umzugehen.</li> </ul>
<p>Zu tief abgefressene Grasnarbe</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wechsel der Tierart (Keine Pferde oder Schafe wegen artbedingt tiefem Verbiss, soweit sie zur Nahrungsmittelproduktion herangezogen werden, stattdessen Rinder.)</li> <li>• Viehbesatz reduzieren und mehr Weidefläche zuteilen</li> <li>• Wechsel des Weidesystems (anstelle von Portions- oder Umtriebsweide jetzt Mähstandweide)</li> <li>• Durch Einkalkulieren von genügend Weiderest (ca. 20% des Futteraufwuchses) Verbisstiefe steuern (angestrebt sind ca. 3 – 5 cm Nutzungstiefe an der am tiefsten verbissenen Stelle)</li> <li>• Rechtzeitiger Weidewechsel</li> </ul>	

Weidenutzung		
Ursache der Verschmutzung	Mögliche Maßnahmen	Konsequenzen / mögliche Umsetzungshemmnisse
<p>Pferchen von Schafen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterlassen des Pferchens von Schafen auf belasteten Flächen</li> </ul>	

## Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

<b>Weidenutzung</b>		
<b>Ursache der Verschmutzung</b>	<b>Mögliche Maßnahmen</b>	<b>Konsequenzen / mögliche Umsetzungshemmnisse</b>
Beweidung im Winterhalbjahr – Ganzjahresweide	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzicht auf Beweidung im zeitigen Frühjahr, im Herbst oder im Winterhalbjahr</li> <li>• Ergänzungsfütterung, zur Vermeidung tiefen Verbisses</li> <li>• Kürzen der täglichen Weidezeit</li> <li>• Wechsel der Tierart, um tiefen Verbiss zu begrenzen oder zu verhindern</li> <li>• Verzicht auf ganzjährige Freilandhaltung auf belasteten Flächen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boden im Winter wesentlich feuchter, so dass das Verschmutzungsrisiko ansteigt.</li> <li>• Geringer Futteraufwuchs in den kühleren Jahreszeiten ist stärker über den systemischen Pfad belastet.</li> </ul>
Freilandhaltung von Hühnern (Direkte Bodenaufnahme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzicht auf Freilandhaltung</li> <li>• ggf. Bodenüberdeckung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aus marktwirtschaftlicher Sicht oder aus Gründen artgerechter Tierhaltung kann evtl. nicht oder nur schwer auf Freilandhaltung verzichtet werden.</li> </ul>
Nasse Witterung, Starkregen (Aufspritzen von Boden („Splash“) und Verschmutzen des Aufwuchses)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Auftrieb auf vernässte, nicht tragfähige Böden</li> <li>• Kein Auftrieb von Tieren unmittelbar nach Starkregenfällen</li> <li>• Generell: Narbenpflege zur Gewährleistung einer dichten Narbe, so dass Splash verringert bzw. vermieden wird</li> </ul>	
Erhöhte Kupfer-Gehalte im Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterlassen des Weidens von Schafen auf Cu-belasteten Flächen</li> </ul>	

<b>Weidenutzung</b>		
Schädliche stoffliche Bodenveränderungen (allgemein)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Milchviehweiden: Wechsel der Produktionsrichtung von Milch zu Fleisch</li> <li>• Nutzungsaufgabe, wenn Gefahrenabwehr mit anderen Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen nicht erfolgen kann.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schadstoffe können auf belasteten Standorten in hohen Konzentrationen in der Milch enthalten sein. Im Fleisch, speziell im Muskelfleisch, werden Schadstoffe kaum angereichert, so dass eine Vermarktung unter Einhaltung der Lebensmittel-Höchstgehalte möglich ist. Jedoch müssen Innereien, fettreiche Gewebe und Knochen, in denen Anreicherungen stattfinden können, aus der</li> </ul>

<b>Weidenutzung</b>		
		<p>Lebensmittelherstellung ausgesondert werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maßnahme aufgrund betriebsspezifischer produktionstechnischer Ausrichtung nicht kurzfristig realisierbar</li> <li>• Vermarktungsmöglichkeiten für Fleischprodukte, die auf schadstoffbelasteten Flächen produziert werden, sind fraglich.</li> </ul>

Tabelle A - 11: Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier bei Weidenutzung (nach LUA NRW, 2006)

## 2 Wiesennutzung

<b>Wiesennutzung (Schnittnutzung von Grünland)</b>		
<b>Ursache der Verschmutzung</b>	<b>Mögliche Maßnahmen</b>	<b>Konsequenzen / mögliche Umsetzungshemmnisse</b>
Zu tiefe Einstellung von Mäh- oder Werbegeräten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höher mähen (minimale Nutzungstiefe sollte bei 5 cm, besser 7 cm liegen)</li> <li>• Sorgfältiges Einstellen der Ladewagen-Pickup sowie der übrigen Werbegeräte (Schwader, Wender)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evtl. Kauf angepasster Geräte bzw. von Geräten mit Höhenverstellung</li> </ul>
Zu häufiges Wenden /Schwaden des Schnittguts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zügiges Anwelken mit hoher Schlagkraft, Einsatz von Mähgutaufbereitern</li> <li>• Übergang zu Konservierungsverfahren, bei denen rascheres Einfahren möglich ist (z.B. Heubelüftung an Stelle von Bodenheubereitung, Feuchtsilagebereitung mit Einsatz von Siliermitteln)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effekt beschleunigter Trocknung beim Einsatz von Mähgutaufbereitern beruht auf höherem Zellsaftaustritt; diese zuckerhaltigen Pflanzensäfte lassen evtl. Schmutzteilchen besser anhaften</li> <li>• Für Heubelüftung ist die Installation teurer Anlagen erforderlich</li> </ul>
Zu hohe mechanische Belastungen der Grasnarbe (Fahrspuren)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Befahren nur bei ausreichender Tragfähigkeit des Bodens</li> <li>• Anpassung der Bereifung (Reifeninnendruck, Aufstandsfläche)</li> <li>• Erhöhung der Schlagkraft reduziert die Überfahrten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Schlagkraft meist mit höherem Gewicht der Maschinen und Geräte verbunden, wodurch sich Bodenverdichtungen ergeben können (Beeinträchtigung der Wasserinfiltration in den Boden ist möglich)</li> </ul>
Lücken im Grünlandbestand <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiere nehmen Schmutzanteile beim Fressen auf</li> <li>• Verschmutzen des Aufwuchses durch „Splash“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Häufigere Nutzung und Nach- oder Übersaat mit standortangepassten Arten und Sorten führt zur dichterem Grasnarben, welche die kinetische Energie beim Aufprall der Regentropfen auf die Bodenoberfläche vermindert</li> <li>• Anpassung der Düngung</li> <li>• Höherer Schnitt (mind. 5 cm, besser 7 cm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Veränderung der Nutzungsfrequenz steht evtl. dem Nutzungszweck entgegen (hohe Nutzungsfrequenz lässt meist keine Heuwerbung zu)</li> </ul>
Ungünstige Bestandzusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unkrautbekämpfung mit nachfolgender Nach- oder Übersaat mit standortangepassten Arten und Sorten</li> <li>• Anpassung von Düngung und Nutzung zur Förderung gewünschter Grünlandarten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln ist evtl. untersagt</li> </ul>
Nasses oder feuchtes Grünfutter / regnerische Witterung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besseres Abtrocknen des Bestandes durch Wahl eines späteren Schnittzeitpunktes am Tag</li> <li>• Verzicht auf Nutzung an Regentagen oder wenn trotzdem</li> </ul>	

## Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

<b>Wiesennutzung</b> (Schnittnutzung von Grünland)		
	erforderlich, dann zumindest mit hoher Schnitthöhe	
Nasse oder feuchte Standorte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ggf. Nutzungsaufgabe Dränieren der Flächen bzw. Pflege der vorhandenen Dränagen und Vorfluter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In geschützten Gebieten neue Dränagen nicht erlaubt Auswirkungen auf den Gebietsabfluss und auf die Hochwasserbildung beachten</li> </ul>
Nasssilagebereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Längeres Anwelken des Futters auf dem Feld, Verzicht auf Nutzung im Herbst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In der Regel steigen die Aschegehalte im Futter vom ersten bis zum letzten Schnitt eines Jahres an; der nicht genutzte Aufwuchs fördert jedoch Mäusebesatz und Schneeschimmel</li> </ul>
Heubereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anstelle von Bodentrocknung mit langer Feldphase Übergang zur Heubelüftung mit deutlich verkürzter Feldphase</li> <li>Futterentnahme mittels Heu-Reinigungsgerät</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heubelüftungsanlagen und Reinigungsanlagen sind nicht praxisüblich und können nur mit hohem Finanzaufwand eingebaut bzw. eingesetzt werden</li> </ul>
Futtereinlagerung in Flachsilos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Überfahren des Futters vermeiden oder nur mit sauberen Schlepperreifen</li> <li>Futter vor dem Silo auf befestigter Bodenplatte zwischenlagern und mittels Verteilgerät oder Radlader einlagern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzierte Schlagkraft Zusätzlicher Personalbedarf</li> </ul>
Futtereinlagerung in Hochsilos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zwischenlagerung des Futters vor Gebläsebeschickung nur auf befestigter und sauberer Bodenplatte bzw. Befüllung über Dosiergerät</li> </ul>	
Anlage von Behelfssilos auf Böden mit erhöhten Schadstoffgehalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verzicht auf Behelfssiloanlagen auf Böden mit stofflichen Belastungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Längere Transportwege vom Feld zum Silo oder das Anlegen von befestigten Silos verursachen Kosten</li> </ul>

<b>Wiesennutzung</b> (Schnittnutzung von Grünland)		
<p>Schädliche stoffliche Bodenveränderungen (allgemein)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Milchviehfütterung: Wechsel der Produktionsrichtung von Milch zu Fleisch</li> <li>• Nutzungsaufgabe, wenn Gefahrenabwehr mit anderen Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen nicht erfolgen kann</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schadstoffe können auf belasteten Standorten in hohen Konzentrationen in der Milch enthalten sein. Im Fleisch, speziell im Muskelfleisch, werden Schadstoffe kaum angereichert, so dass eine Vermarktung unter Einhaltung der Lebensmittel-Höchstgehalte problemlos möglich ist. Jedoch müssen Innereien, fettreiche Gewebe und Knochen, in denen Anreicherungen stattfinden können, aus der Lebensmittelherstellung ausgesondert werden</li> <li>• Maßnahme aufgrund betriebsspezifischer produktionstechnischer Ausrichtung nicht kurzfristig realisierbar</li> <li>• Vermarktungsmöglichkeiten für Fleischprodukte, die auf schadstoffbelasteten Flächen produziert werden, sind fraglich</li> </ul>

Tabelle A - 12: Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier bei Wiesennutzung (nach LUA NRW, 2006)

### 3 Ackerfutterbau

Ackerfutterbau		
Ursache der Verschmutzung	Mögliche Maßnahmen	Konsequenzen / mögliche Umsetzungshemmnisse
Silomais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung standfester Sorten zur Vermeidung von Lager der Pflanzen</li> <li>• Höhere Stoppel stehen lassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silomais ist aufgrund großer Pflanzenmasse, seiner Höhe und der großen Masse im Verhältnis zur Oberfläche eine günstige Frucht im Hinblick auf geringe Verschmutzungsanteile</li> </ul>
Feldgras, Klee gras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Walzen nach der Ansaat, Herstellen ebener Bodenoberfläche</li> <li>• Silomaisanbau anstelle von Feld-/Klee gras</li> <li>• Hoher Schnitt (mind. 5 cm, besser 7 cm)</li> <li>• Sorgfältiges Einstellen der Ladewagen-Pickup sowie der übrigen Werbegeräte (Schwader, Wender)</li> <li>• Abtrocknen des Bestandes durch Wahl eines späteren Schnitzeitpunktes am Tag</li> <li>• Verzicht auf Nutzung an Regentagen oder wenn, dann mit großer Schnitthöhe (&gt; 7 cm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feld- und Klee gras sind als bodennah wachsende Kulturen generell stärker verschmutzungsgefährdet</li> </ul>
Futter- und Stoppelrüben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur gewaschen verfüttern, Wechsel zu Silomais, Feld-/Klee gras o.a.</li> <li>• Verwendung von Sorten mit hohem Sitz im Boden</li> <li>• Genereller Verzicht auf Verfütterung von Rübenblatt; wenn Verfütterung vorgenommen werden soll, dann Verzicht auf Feldzwischenlagerung von Rübenblatt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Waschen verursacht sehr hohen Zeitaufwand.</li> </ul>
Ungleichmäßige Bodenbearbeitung oder unebene Äcker	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auf gleichmäßige Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung achten, Einebnen der Flächen durch Walzen</li> </ul>	
Zum Lager neigende Futterpflanzen (auch Zwischenfrüchte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wahl standfester Pflanzenarten bzw. -sorten;</li> <li>• Keine leicht lagernden Zwischenfrüchte (z.B. Erbsen)</li> <li>• Bei lückigen und verschmutzten Beständen ggf. Verzicht auf Futternutzung</li> </ul>	

## Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Tabelle A - 13: Empfehlungen für Maßnahmen zur Verringerung des Schadstofftransfers über den Pfad Boden-Nutzpflanze-Nutztier bei Ackerfutterbau (nach LUA NRW, 2006)

## Anhang 9

### Quellenverzeichnis

- BbgAbfBodG (2009)*: Brandenburgisches Abfall- und Bodenschutzgesetz vom 27. Mai 2009, Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Brandenburg Teil I – Nr. 8 vom 4. Juni 2009
- BBodSchG (1999)*: Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), Zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 9.12.2004 I 3214
- BBodSchV (1999)*: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999. BGBl. I Nr. 36/1999, S. 1554-1582.
- Bek. BBodSchV (1999)*: Bekanntmachung über Methoden und Maßstäbe für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bundesanzeiger Jhrg. 51, Nr. 161a vom 28.08.1999, Bonn.
- BGVV, Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin (Hrsg.) (1997)*: Richtwerte für Schadstoffe in Lebensmitteln. Bundesgesundheitsblatt 20, S. 20-21, Berlin.
- BMU (2008)*: Verbraucherschutz vor Umweltkontaminanten in Lebensmitteln – National: Unverbindliche Richtwerte. Online:  
[http://www.bmu.de/gesundheits\\_und\\_umwelt/lebensmittelsicherheit/verbraucherschutz\\_d/doc/42314.php](http://www.bmu.de/gesundheits_und_umwelt/lebensmittelsicherheit/verbraucherschutz_d/doc/42314.php), August 2008.
- Crössmann, G. (1992)*: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Böden und Pflanzen, Teil II: Untersuchungsergebnisse – Zum Transferverhalten ausgewählter polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) bei gärtnerischen und landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Kommunalverband Ruhrgebiet (Hrsg.), Essen.
- Delschen, T. (1994)*: Beurteilung von PAK und PCB in Kulturböden. Wasser & Boden, 1/1994, S. 54-59.
- Delschen, T.; Hembrock-Heger, A.; Necker, U. (1996)*: Systematische Untersuchungen zum Verhalten von PAK und PCB im System Boden/Pflanze auf der Lysimeteranlage Waldfeucht (1989-1994). In: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Band 13, Essen.
- Delschen, T.; Leisner-Saaber, J. (1998)*: Selbstversorgung mit Gemüse aus schwermetallbelasteten Gärten: Eine Gefährdungsabschätzung auf toxikologischer Basis. Bodenschutz 1/1998, S. 17-20.
- Delschen, T.; Hembrock-Heger, A.; Leisner-Saaber, J.; Sopczyk, D. (1999)*: Verhalten von PAK im System Boden/Pflanze – PAK-Belastung von Kulturpflanzen über den Luft-/Bodenpfad. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 11 (2), 79-87.
- DIN ISO 11466 (1997)*: Bodenbeschaffenheit - Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente.; Berlin Beuth.). ISO 11466:1995
- DIN ISO 18287 (2006)*: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) – Gaschromatographisches Verfahren mit Nachweis durch Massenspektrometrie (GC-MS) (ISO 18287:2006). Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19730 (1997)*: Bodenbeschaffenheit - Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung; Berlin (Beuth). DIN ISO 11466; 06.97
- DIN 38407 F3 (1998)*: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 3: Gaschromatographische Bestimmung von polychlorierten Biphenylen (F 3). Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 38414-20 (1996)*: Norm DIN 38402, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 20: Bestimmung von 6 polychlorierten Biphenylen (PCB) (S 20) Berlin (Beuth).
- Dornberger, U.; Hundt, I.; Möller, F.; Pohl, A.; Schneider, J.; Schulz, V.; Schütze, H.; Wendler, F.; Werner, T. (1997)*: Schadstofftransferfaktoren Boden – Pflanze für typische Brandenburger Böden und Fruchtarten. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des

Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg , Jena, März 1997.

*E DIN-ISO 10382 (1995):* Bodenbeschaffenheit - Probenahme - Teil 2: Anleitung für Probenahmeverfahren; Berlin (Beuth).

*Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.) (1999):*

Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen. Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihrer Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

*EU (2001):* Verordnung (EG) Nr. 466/2001 der Kommission vom 08.03.2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, ABl. L77/1 vom 16.03.2001.

*EU (2002):* Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung. ABl. EG Nr. L 140, S. 10.

*EU (2003):* Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 der Europäischen Kommission vom 25. Juli 2003 zur Änderung der Bedingungen für die Zulassung einer Reihe von zur Gruppe der Spurenelemente zählenden Futtermittelzusatzstoffen. ABl. EG Nr. L 187, S. 11.

*EU (2006):* Richtlinie 2006/13/EG der Kommission vom 3. Februar 2006 zur Änderung der Anhänge I und II der Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über unerwünschte Stoffe in Futtermitteln in Bezug auf Dioxine und dioxinähnliche PCB. ABl. EG Nr. L 32, S. 44.

*EU (2006):* Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 Europäischen Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. ABl. EG Nr. L 364, S. 5.

*FuttMV (2008):* Futtermittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Mai 2007 BGBl. I S. 770, zuletzt geändert durch die Verordnung vom 15. Dezember 2008, BGBl. I S. 2483.

*Günther, P.; Nolting, H.-G. (1996):* Ermittlung von Transferfaktoren für die Pfade Boden-Pflanze und Luft-Pflanze. Abschlußbericht zum F&E-Vorhaben 106 01 048 des Umweltbundesamtes, Berlin, Oktober 1996.

*Hasselbach, G.; von Boguslawski, E. (1991):* Bodenspezifische Einflüsse auf die Schwermetallaufnahme der Pflanzen und Einordnung der Ergebnisse in Bodenschutznormen. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Berichte aus der Ökologischen Forschung, Band 6, S. 126-179.

*Hein, A.; Sauerbeck, D.; Horst, H.; Brüne, H. (1995):* Die Nickelaufnahme von Pflanzen aus verschiedenen Böden und Bindungsformen und ihre Prognose durch chemische Extraktionsverfahren. Forschungsbericht zum F&E-Vorhaben 107 01 002 des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 33/95, Umweltbundesamt, Berlin.

*Hiller, D.A.; Brümmer, G.W. (1991):* Mikrosondenuntersuchungen zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Berichte aus der Ökologischen Forschung, Band 6, 34-61.

*Hornburg, V.; Brümmer, G. (1989):* Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in Böden. In: Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 59, 727-737.

*Hülster, A.; Müller, J.F.; Marschner, H. (1994):* Soil-Plant transfer of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans to vegetables of the cucumber family. Environ. Sci. Technol. 28, 1110-1115.

*Knoche, H.; Brand, P.; Viereck-Götte, L.; Böken, H. (1999):* Schwermetalltransfer Boden – Pflanze: Ergebnisse der Auswertungen hinsichtlich der Königswasser- und Ammoniumnitrat-Extraktion anhand der Datenbank TRANSFER. UBA-Texte 11/99, Umweltbundesamt, Berlin.

*LABO, Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (1998):* Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfades Bodenverunreinigungen/Altlasten-Pflanze. In: Rosenkranz, D.; Einsele, G.; Bachmann, G.; Harreß, H.-M. (Hrsg.): Handbuch Bodenschutz, 28. Lfg. XII/98, Kz. 9009, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

*LÖLF, Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-*

- Westfalen (Hrsg.) (1992):* Beurteilung von PAK und PCB in Kulturböden. Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Band 7, Recklinghausen.
- LUA BB, Landesumweltamt Brandenburg (2000):* Die Bodenbelastung brandenburgischer Haus- und Kleingärten durch Schadstoffe. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft Nr. 48, Potsdam.
- LUA BB, Landesumweltamt Brandenburg (2003):* Untersuchung und Bewertung von altlastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen: Wirkungspfad Boden – Pflanze – Tier. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft Nr. 81, Bodenschutz und Altlastenbearbeitung 2, Potsdam.
- LUA NRW, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2000):* Weitere Sachverhaltsermittlung bei Überschreitung von Prüfwerten nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze. Merkblatt Nr. 22, Essen.
- LUA NRW, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2001):* Verzehrsstudie in Kleingärten im Rhein-Ruhrgebiet. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 14, Essen.
- LUA NRW, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2006):* Handlungsempfehlungen zu Maßnahmen der Gefahrenabwehr bei schädlichen stofflichen Bodenveränderungen in der Landwirtschaft, Merkblatt 55, Essen.
- LVVG & IB Feldwisch, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft, Aulendorf & Ingenieurbüro Feldwisch, Bergisch-Gladbach (2007):* Maßnahmenkonzept zur verschmutzungsarmen Nutzpflanzenernte - Handlungsempfehlungen für die Bodenschutzbehörden für Bewirtschaftungsbeschränkungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen bei schädlichen Bodenveränderungen. Abschlussbericht zum LABO-Projekt B 4.023 im Auftrag des Länderfinanzierungsprogramms Wasser, Boden und Abfall und der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz.
- Matthies, M.; Trapp, S. (1994):* Transfer von PCDD/F und anderen organischen Umweltchemikalien im System Boden-Pflanze-Luft, Teil III. Transferfaktoren Boden-Pflanze und Luft-Pflanze. UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 6 (5), 297-303.
- Mazath, E. (1993):* Anwesenheitszeiten sowie Anbau- und Verzehrsgewohnheiten von Kleingärtnern am Beispiel der Kleingartenanlage Gelsenkirchen-Süd. Studie des Fachgebietes „Arbeitssicherheit und Umweltmedizin“ der Bergischen Universität GH Wuppertal (unveröffentlicht).
- Sauerbeck, D. (1989):* Der Transfer von Schwermetallen in die Pflanze. In: Behrens, D.; Wiesner, J. (Hrsg.): Beurteilung von Schwermetallkontaminationen im Boden – DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, S. 281-316, Frankfurt a.M.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1989):* Lehrbuch der Bodenkunde. Verlag Ferdinand Enke, 12. Aufl., Stuttgart.
- SHmV (2007):* Schadstoff-Höchstmengenverordnung BGBl. I 1562; 05.07.2006, zuletzt geändert durch Artikel 1 V. v. 18.07.2007 BGBl. I S. 1471
- Souci, S.W.; Fachmann, W.; Kraut, H. (1986):* Die Zusammensetzung der Lebensmittel – Nährwert-Tabellen. Herausgegeben im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten von der Deutschen Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, München, 3. Aufl., Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Steffens, T.; Ihme, W.; Wichmann, H.E. (1991):* Aufenthalts- und Verzehrsgewohnheiten in der Kleingartenanlage „Erholung“ in Herne. Studie des Fachgebietes „Arbeitssicherheit und Umweltmedizin“ der Bergischen Universität GH Wuppertal (unveröffentlicht).
- Trapp, S. (1992):* Modellierung der Aufnahme anthropogener organischer Chemikalien in Pflanzen. Diss. TU München.
- Trapp, S. (1995):* Model for Uptake of Xenobiotics into Plants. In: Trapp, S.; McFarlane, C. (Hrsg.): Plant Contamination - Modeling and Simulation of Organic Chemical Processes. CRC Press, Boca Raton, 107-151.
- Trapp, S.; Matthies, M. (1994):* Transfer von PCDD/F und anderen organischen Umweltchemikalien im System Boden-Pflanze-Luft, Teil II. Ausgasung aus dem Boden und Pflanzenaufnahme. UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 6 (3), 157-163.

*Trapp, S.; Matthies, M. (1996):* Dynamik von Schadstoffen - Umweltmodellierung mit CemoS. Springer Verlag, Heidelberg.

*Trapp, S.; Matthies, M.; Kaune, A. (1994):* Transfer von PCDD/F und anderen organischen Umweltchemikalien im System Boden-Pflanze-Luft, Teil I. Modellierung des Transferverhaltens. UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 6 (1), 31-40.

*Trapp, S.; Matthies, M.; Reiter, B. (1998):* Überprüfung und Fortentwicklung der Bodenwerte für den Boden-Pflanze-Pfad – Teilprojekt „Transferfaktoren Boden-Pflanze“. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 107 02 005 des Umweltbundesamtes, Mai 1998.

*Traub, H., Koch, M., Lück, D., Win, T., Lehnik-Habrink, P., Schultze, K. (2002):* Evaluierung von Verfahren für die Untersuchung von Böden nach § 8 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG). Bericht zum UBA-Forschungsvorhaben 000303, UBA-Texte 32/03, Berlin, August 2002.

*UBA (1999):* Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten – Ableitung und Berechnung von Prüfwerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung für den Wirkungspfad Boden – Mensch aufgrund der Bekanntmachung der Ableitungsmethoden und -maßstäbe im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28. August 1999 – Teil 2: Ergänzende Ableitungsmethoden und –maßstäbe bei weiteren Stoffen (flüchtige Stoffe). Umweltbundesamt (Hrsg.), Grundwerk XII/99, Kz. B 060, Erich Schmidt Verlag, Berlin, Dezember 1999.

*VDI (1991):* VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1A: Maximale Immissionswerte für Nickel zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere. VDI-Richtlinie Nr. 2310, Bl. 30, Ausgabe 07/91.

*VDI (1992):* VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1A: Maximale Immissionswerte für Thallium zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere. VDI-Richtlinie Nr. 2310, Bl. 29E, Ausgabe 01/92.

*VDLUFA-Methodenbuch (1996):* VDLUFA-Methodenbuch (1996): Band VII: Methodenbuch der Umweltanalytik, VDLUFA-Verlag Darmstadt.

*Winkler, R.; Scheunert, I. (1993):* Transfer von chlorierten Kohlenwasserstoffen in Pflanzen. Abschlußbericht zum F&E-Vorhaben 107 02 004/08 des Umweltbundesamtes, Berlin, Januar 1993.

*Zeien, H.; Brümmer, G.W. (1991):* Chemische Extraktionen zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Berichte aus der Ökologischen Forschung, Band 6, 62-125.