

Arbeitshilfe

Arsentransfer aus Böden in
Nahrungs- und Futterpflanzen –
Gefahrenbeurteilung und Maßnahmen



Vorhaben B 1.10:
Arsentransfer aus belasteten Böden in Nahrungs- und
Futterpflanzen des Länderfinanzierungsprogramms Wasser, Boden,
Abfall, Teil Boden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft
Bodenschutz (LABO)

IMPRESSUM

- Herausgeber:** **Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)**
www.labo-deutschland.de
- Vorhaben:** B 1.10: Arsentransfer aus belasteten Böden in Nahrungs- und Futterpflanzen
Gefördert durch das Länderfinanzierungsprogramm
Wasser, Boden, Abfall, Teil Boden
- Ansprechpartner:** Dr. Ingo Müller (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie)

Bearbeitung

- Auftragnehmer:** ahu AG Wasser · Boden · Geomatik
Kirberichshofer Weg 6
52066 Aachen
www.ahu.de
- Technische Universität Dresden
Institut für Allgemeine Ökologie und Umweltschutz
Pienner Straße 7
01735 Tharandt
www.tu-dresden.de
- Autoren:** Carolin Kaufmann-Boll, Dr. Silke Höke, Dr. Silvia Lazar (ahu AG)
Dr. Carsten Brackhage, Prof. Dr. E. Gert Dudel (TU Dresden)
- Titelfoto:** ahu AG
- Stand:** 15. Mai 2013

Danksagung

Das Vorhaben wurde von Herrn Dr. Ingo Müller, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie betreut und von einem Arbeitskreis begleitet. Wir bedanken uns herzlich für die eingebrachten Anregungen und Erfahrungen aus der Praxis.

Für die Bereitstellung von Materialien wird Herrn Josef Nießing, Kreis Borken, Frau von der Heydt, Herrn Hartmut Schirg und Herrn Joachim Zimmermann, Regierungspräsidium Freiburg, Herrn Steffen Schürer, Landesdirektion Chemnitz, sowie Herrn Prof. Dr. Tim Mansfeldt, Universität zu Köln, und Prof. Dr. agr. Jörg Rinklebe, Bergische Universität Wuppertal, gedankt.

Mitglieder des projektbegleitenden Arbeitskreises

Dr. Walter Martin, Bayerisches Landesamt für Umwelt

Dr. Ingo Müller, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Dr. Heinz Neite, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Dr. Thomas Nöltner, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg

Dr. Jens Utermann, Umweltbundesamt

INHALTSVERZEICHNIS

1	ANLASS UND ZIEL	4
2	RECHTLICHE ANFORDERUNGEN	6
	2.1 Bodenschutzrecht	6
	2.2 Futtermittel- und Lebensmittelrecht	8
3	GEFAHRENPOENZIAL UND TRANSFERWEGE ZUR PFLANZE	11
	3.1 Verhalten von Arsen im Boden	12
	3.2 Arsen in Pflanzen	17
	3.3 Transferwege vom Boden zur Pflanze	19
4	EMPFEHLUNGEN ZUR ERFASSUNG VON VERDACHTSFLÄCHEN UND GEFAHRENBEURTEILUNG	21
	4.1 Erfassung von Verdachtsflächen	21
	4.1.1 Wesentliche Fallgestaltungen	22
	4.1.2 Erfassungsmethoden	24
	4.2 Orientierende Untersuchung	25
	4.3 Vertiefende Sachverhaltsermittlung im Rahmen einer Detailuntersuchung	27
	4.3.1 Validierung, Exposition und Transferwege	28
	4.3.2 Bodenuntersuchungen	29
	4.3.3 Pflanzenuntersuchungen	33
	4.4 Probenahme, Vorbehandlung und Analytik	34
5	EMPFEHLUNGEN ZUR GEFAHRENABWEHR	36
	5.1 Information	37
	5.2 Abgrenzung von Belastungsgebieten und Anwendung gebietsbezogener Regelungen	37
	5.3 Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen	37
	5.4 Überwachung	44
	5.5 Nicht geeignete Maßnahmen	45
6	LITERATUR	46
7	ARBEITSHILFEN WIRKUNGSPFAD BODEN – NUTZPFLANZE	49
8	GESETZE UND VERORDNUNGEN	50
	ANHANG 1: HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR LANDWIRTE UND GÄRTNER	51
	ANHANG 2: BEWERTUNGSSCHEMA ZUR ABGRENZUNG VON GEBIETEN MIT ERHÖHTEN ARSENGEHALTEN IN BÖDEN DER STADT BOTTROP (ISB 2010)	52
	ANHANG 3: PRAXISBEISPIEL AUS BADEN-WÜRTTEMBERG ZUR ERFASSUNG VON GEBIETEN MIT ARSEN-BELASTUNGEN IM BODEN	53
	ANHANG 4: PRAXISBEISPIEL ZUR UNTERSUCHUNG VON PFLANZENPROBEN IM KREIS BORKEN, NORDRHEIN-WESTFALEN	54

1 ANLASS UND ZIEL

Das Halbmetall Arsen ist für die Giftigkeit einiger seiner anorganischen Verbindungen bekannt. Der Übergang von Arsen aus dem Boden in Pflanzen ist aus der Sicht des Verbraucherschutzes von großer Bedeutung: Zum einen werden Pflanzen unmittelbar vom Menschen verzehrt (z.B. Obst und Gemüse), zum anderen dienen sie als Grundlage für die Herstellung von Lebensmitteln (z.B. Brotweizen) oder als Futter für Lebensmittel liefernde Tiere (Gras, Futtergetreide).

Aufgrund des komplexen Verhaltens von Arsen in der Umwelt ist die Abschätzung potenzieller Gefahren schwierig. Liegen Arsenanreicherungen in landwirtschaftlich genutzten Böden vor, steht der Bodenschutzvollzug vor erheblichen praktischen Herausforderungen, um den Regelungen zu Arsen-Höchstgehalten Rechnung zu tragen.

Arsen in Bodenpartikeln und Staub lagert sich an der Pflanze ab (Verschmutzungspfad) oder es kann in gelöster Form über die Wurzel von der Pflanze aufgenommen werden (Systemischer Pfad). Inwieweit eine Aufnahme über die Wurzel erfolgt und das Arsen auch in oberirdischen Teilen der Pflanze verteilt und angereichert wird, ist bislang nicht eindeutig zu erfassen. Aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren wurde noch kein befriedigender, allgemein gültiger Zusammenhang zwischen Arsengehalten in Böden und Pflanzen(-teilen) gefunden. Dies betrifft insbesondere die gelösten, löslichen oder mobilisierbaren Anteile (ermittelt über verschiedene Extraktionsverfahren), unterschiedliche Pflanzenarten und -sorten sowie wechselnde biogeochemische Milieubedingungen. Bekannt ist jedoch, dass aus arsenbelasteten Stau- und Grundwasserböden erhebliche Arsenmengen in das Bodenwasser freigesetzt werden können und damit insbesondere an solchen Standorten das Risiko eines Arsentransfers in Nahrungs- und Futterpflanzen besteht.

Die vorliegende Arbeitshilfe

- gibt weiterführende Hilfestellungen für die Gefahrenbeurteilung im Hinblick auf einen Übergang von Arsen vom Boden in Nahrungs- und Futterpflanzen;
- zeigt praktische Lösungsmöglichkeiten für den Fall nötiger Maßnahmen für Grünland- und Ackernutzung auf;
- basiert auf dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand (Literatur), auf vorhandenen Erfahrungen und Handlungsempfehlungen der Vollzugsbehörden sowie auf den Ergebnissen exemplarischer Feld- und Gefäßversuche an drei Standorten in verschiedenen Bundesländern;
- knüpft an die Ergebnisse des LABO-Vorhabens B 4.07 an, in dem das Mobilisierungspotenzial von Arsen in Böden in Abhängigkeit vom Redoxpotenzial an zwölf Standorten in sechs Bundesländern untersucht wurde (Overesch et al. 2008).

Die Arbeitshilfe richtet sich an Verwaltungsbehörden im Bereich Bodenschutz und in der landwirtschaftlichen Beratung. Weiterhin sind Landwirtschaftskammern sowie Planungs- und Ingenieurbüros angesprochen, die mit der Gefahrenbeurteilung und der Entwicklung von Handlungskonzepten beauftragt sind. Gegenstand dieser Arbeitshilfe sind flächenhaft vorkommende Arsenbelastungen in Böden mit Nahrungs- und Futterpflanzenanbau. Punktuelle Altlablagerungen und Altstandorte (z.B. ehemalige Industrie- und Militäranlagen) sowie andere lokale Sonderstandorte werden nicht behandelt.

Die folgenden Symbole kennzeichnen



Zusammenfassungen



Weiterführende Informationen



Handlungsempfehlungen

Diese Arbeitshilfe wurde im Vorhaben B 1.10 „Arsentransfer aus belasteten Böden in Nahrungs- und Futterpflanzen“ des Länderfinanzierungsprogramms Wasser, Boden, Abfall, Teil Boden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) erarbeitet. Weitere Ergebnisse des Vorhabens, z.B. Ergebnisse exemplarischer Feld- und Gefäßversuche, sind dem Abschlussbericht zum Vorhaben zu entnehmen (Kaufmann-Boll et al. 2012).

2 RECHTLICHE ANFORDERUNGEN

2.1 Bodenschutzrecht

Das Bodenschutzrecht, bestehend aus dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG 1998), der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999) und den Bodenschutzgesetzen der Länder, regelt die Gefahrenbeurteilung von Arsenbelastungen für den Pfad Boden – Nutzpflanze. Die Werteregulungen der BBodSchV berücksichtigen den Schadstofftransfer vom Boden in pflanzliche und tierische Produkte.

Auf Flächen mit Arsengehalten, welche die bodenschutzrechtlichen Prüfwerte überschreiten, ist eine weitergehende Sachverhaltsermittlung zum möglichen Transfer vom Boden in die Nutzpflanze erforderlich, um den Gefahrenverdacht auszuräumen oder zu bestätigen. Auch bereits vorliegende Erkenntnisse zu Überschreitungen der erlaubten Höchstgehalte in Pflanzen (s. Kap. 2.2) sind hierbei einzubeziehen.

Bei Überschreitung der bodenschutzrechtlichen Maßnahmenwerte sind im Regelfall Maßnahmen der Gefahrenabwehr einzuleiten. Gemäß § 4 Abs. 3 BBodSchG kommen dafür neben Dekontaminations- auch Sicherungsmaßnahmen in Betracht, die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern. Soweit dies nicht möglich oder unzumutbar ist, sind sonstige Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen durchzuführen. Auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen kommen zur Gefahrenabwehr vor allem Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen durch Anpassung der Nutzung und der Bewirtschaftung von Böden sowie Veränderung der Bodenbeschaffenheit in Betracht. Über die getroffenen Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen sind Aufzeichnungen zu führen. Zudem ist mit der landwirtschaftlichen Fachbehörde Einvernehmen herbeizuführen (siehe § 5 Abs. 5 BBodSchV).

Die Maßnahmen sind nach der Belastungshöhe, der Schadstoffverfügbarkeit und dem wesentlichen Transferpfad zu differenzieren. Wenn die vorliegenden Informationen nicht für eine abschließende Beurteilung oder für die passgenaue Ausrichtung der zu ergreifenden Maßnahmen ausreichen, sind nach den Gegebenheiten des Einzelfalls unter Umständen weitere repräsentative Bodenuntersuchungen zu veranlassen. Eventuell können ergänzend Pflanzenuntersuchungen sinnvoll sein, wobei eine sorgfältige Planung und Konzeption erforderlich ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu gewinnen.

Die Beurteilung von Arsenbelastungen in Böden hängt sowohl von den Gesamtgehalten als auch von der Pflanzenverfügbarkeit des Arsens ab. Die Werteregulungen der BBodSchV sind in Abbildung 2-1 aufgeführt. Für Böden unter ackerbaulicher Nutzung und in Nutzgärten mit „**zeitweise reduzierenden Verhältnissen**“ gilt ein herabgesetzter Prüfwert. Zeitweise reduzierende Verhältnisse sind dort zu erwarten, wo lang andauernd Feuchtigkeit bzw. Wassersättigung und zugleich hohe Gehalte (leicht abbaubarer) organischer Substanz im Boden vorliegen. Dies ist in Auenböden, Gleyen, Marschen, Pseudogleyen und deren Übergangsformen sowie in Mooren (Hoch- und Niedermoore, Erd- und Mulmmoore) der Fall. Vor allem bei mehrwöchiger Vernässung arsenführender Bodenhorizonte während der Vegetationsperiode im Sommerhalbjahr muss mit einer erhöhten Mobilisierung des Arsens gerechnet werden.

Neben schädigenden Wirkungen auf die menschliche Gesundheit durch schadstoffbelastete pflanzliche Nahrungsmittel sind bei der Bewertung von Arsen bzgl. des Wir-

kungspfad des Boden - Nutzpflanze auch phytotoxische Effekte zu berücksichtigen. Das Risiko von Ertragsdepressionen hängt von der Pflanzenart und -sorte ab und sollte im Einzelfall anhand des wissenschaftlichen Kenntnisstandes geprüft werden. Eine Beurteilung von Ertragsdepressionen anhand von Arsenkonzentrationen im Boden oder in der Pflanze (vgl. LABO 1998¹) ist aufgrund der bisher nicht hinreichend belegten Abhängigkeiten nicht möglich, insbesondere weil Stresswirkungen auf Pflanzen von vielen Faktoren abhängen (z.B. auch von Bodenbelastungen mit Schwermetallen) und zudem die Ertragsminderung oftmals nur gering ausfällt.

Beurteilung der Arsenkonzentration in Böden im Hinblick auf den Transfer in Pflanzen	
Ackerbau, Nutzgarten	Grünlandflächen
<p>Prüfwert Pflanzenqualität: 200 mg kg⁻¹ TM (KW)</p> <p>In Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt hierfür ein Prüfwert von 50 mg kg⁻¹ TM (KW)</p> <p>Prüfwert Wachstumsbeeinträchtigungen: 0,4 mg kg⁻¹ TM (AN)</p>	<p>Maßnahmenwert Futtermittelqualität: 50 mg kg⁻¹ TM (KW)</p>
<p>TM = Trockenmasse Feinboden KW = Königswasserextrakt AN = Ammoniumnitratextrakt</p>	

Abbildung 2-1: Prüf- und Maßnahmenwerte für den Wirkungspfad Boden – Nutzpflanze/Kulturpflanzen (BBodSchV (1999), Anhang 2, Nr. 2)

Neben den gefahrenbezogenen Werteregulungen begrenzen die Vorsorgewerte der BBodSchV den Bereich unbedenklicher Schadstoffgehalte im Boden. Für Arsen sind in der derzeit gültigen BBodSchV aus dem Jahre 1999 keine Vorsorgewerte verankert.

Gebietsbezogene Vorgehensweise bei flächenhaften Arsenbelastungen in Böden

Liegt der Verdacht auf flächenhaft schädliche Bodenveränderungen durch Arsen vor, sind gemäß Bodenschutzrecht Untersuchungen und ggf. Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erforderlich. Zur Vereinfachung des Bodenschutzvollzuges und zur Reduzierung des Untersuchungsaufwandes bietet sich eine gebietsbezogene Vorgehensweise an (s. Kap. 5.2). Anhand von Beurteilungskarten können sowohl Einzelfallentscheidungen als auch gebietsbezogene Regelungen (z.B. im Rahmen festgelegter Bodenplanungsgebiete) getroffen werden (Kardel et al. 2011). Neben dem Pfad Boden – Nutzpflanze können im Rahmen gebietsbezogener Regelungen auch der Pfad Boden – Mensch und der Umgang mit Bodenmaterial mit berücksichtigt werden.

¹ Nach LABO (1998) treten bei Vorliegen von Arsen im Boden Ertragsdepressionen bei landwirtschaftlichen Kulturen eher auf als Beeinträchtigungen der Pflanzenqualität. Bei Arsengehalten in Pflanzen, die 3 bis 10 mg kg⁻¹ TM (geometrischer Mittelwert: 5,5 mg kg⁻¹) überschreiten, werden nach Literaturangaben Ertragsdepressionen von über 10 % angegeben (Zusammenstellung bei Sauerbeck 1989, angegeben in Ad-hoc-AG LABO 1998).

2.2 Futtermittel- und Lebensmittelrecht

Im Rahmen des Inverkehrbringens von Nahrungs- und Futtermitteln tragen insbesondere die Hersteller die Verantwortung dafür, dass ihre Produkte keine gesundheits-schädlichen Konzentrationen von Schadstoffen aufweisen und den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Der Landwirt ist somit verpflichtet, eigenverantwortlich die Einhaltung der Anforderungen des Futtermittel- und Lebensmittelrechts sicherzustellen. Die Verpflichtung ergibt sich allgemein für Lebens- und Futtermittel aus Art. 17 Abs. 1 der Verordnung (EG) 178/2002, die unmittelbar in jedem Mitgliedstaat gilt:

„Die Lebensmittel- und Futtermittelunternehmer sorgen auf allen Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen in den ihrer Kontrolle unterstehenden Unternehmen dafür, dass die Lebensmittel oder Futtermittel die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen, die für ihre Tätigkeit gelten und überprüfen die Einhaltung der Anforderungen.“

Auf Flächen mit erhöhten Arsengehalten im Boden ist demnach vom Landwirt durch geeignete Maßnahmen sicher zu stellen, dass aufgrund des Schadstofftransfers vom Boden in die Pflanze keine Verstöße gegen die lebens- und futtermittelrechtlichen Pflichten zu besorgen sind.

Ergänzend zu dieser Eigenkontrolle betreiben die Mitgliedsstaaten im Rahmen der Überwachung und Durchsetzung des Lebensmittel- und Futtermittelrechts ein System amtlicher Kontrollen.

Nachstehende Pflichten für Lebensmittel- und Futtermittelunternehmer sind in Art. 18 bis 20 der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 enthalten (vgl. Elsäßer et al. 2007). Ergänzende Anforderungen finden sich insbesondere in §§ 44 und 44a des Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuchs (LFGB):

- Lebensmittel und Futtermittel, die nicht sicher sind, dürfen nicht in den Verkehr gebracht werden und Futtermittel nicht an der Lebensmittelgewinnung dienende Tiere verfüttert werden.
- Die Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln und Futtermitteln, von der Lebensmittelgewinnung dienenden Tieren und allen sonstigen Stoffen, die dazu bestimmt sind oder von denen erwartet werden kann, dass sie in einem Lebensmittel oder Futtermittel verarbeitet werden, ist in allen Produktions- Verarbeitungs- und Vertriebsstufen sicherzustellen.
- Erkennt ein Lebensmittel- oder Futtermittelunternehmer oder hat er Grund zu der Annahme, dass ein von ihm erzeugtes, verarbeitetes, hergestelltes oder vertriebenes Lebensmittel bzw. Futtermittel die Anforderungen an die Lebensmittel- bzw. Futtermittelsicherheit nicht erfüllt, leitet er unverzüglich Verfahren ein, um das Produkt vom Markt zu nehmen und unterrichtet die zuständigen Behörden.

Regelungen für Futtermittel

Futtermittel, die den zulässigen Höchstgehalt nach Anhang I der Richtlinie 2002/32/EG überschreiten, dürfen gemäß § 23 Abs. 1 der Futtermittelverordnung (FuttMV) nicht verfüttert und nicht in den Verkehr gebracht werden. In dem durch EU-Verordnungen fortlaufend geänderten Anhang I der Richtlinie 2002/32/EG, auf deren jeweils geltende Fassung § 23 Abs. 1 FuttMV verweist, ist für Arsen als unerwünschter Stoff für die meisten Einzel- und Alleinfuttermittel ein Höchstgehalt von 2 mg kg⁻¹ (bezogen auf die Frischmasse bei 12 % Wassergehalt) festgelegt (vgl. Tab. 2-1).

Tabelle 2-1: Arsen-Höchstgehalte für unerwünschte Stoffe in der Tierernährung nach Anhang I der Richtlinie 2002/32/EG, zuletzt geändert durch Verordnung (EU) Nr. 107/2013

Produkt	Höchstgehalt in mg kg ⁻¹ Futter bezogen auf 88 % Trockenmasse*	Höchstgehalt in mg kg ⁻¹ Futter bezogen auf 100 % Trockenmasse
Futtermittelausgangserzeugnisse, ausgenommen Grünmehl, Luzernegrünmehl und Klee grünmehl sowie getrocknete (melassierte) Zuckerrüben- schnitzel	2,0 4,0	2,3 4,5
Alleinfuttermittel für landwirtschaftliche Nutztiere	2,0	2,3
Ergänzungsfuttermittel, ausgenommen Mineralfuttermittel	4,0	4,5

* Die Höchstgehalte beziehen sich auf den Gesamtarsengehalt (gem. VO (EG) Nr. 574/2011)

Nach dem Futtermittelrecht gilt das **Verdünnungsverbot**, d.h. eine Verschneidung belasteter mit unbelasteten Futtermitteln ist nicht zugelassen. Weiterhin ist bei überschrittenen Höchstgehalten das Verfüttern auf dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb ausgeschlossen.

Regelungen für Lebensmittel

Zur Beurteilung der Pflanzenqualität im Hinblick auf das Inverkehrbringen von Lebensmitteln ist die Verordnung zur Festsetzung von Höchstgehalten für bestimmte Kontaminanten heranzuziehen. Die Europäische Kontaminanten-Verordnung Nr. 1881/2006 legt für einige Schadstoffe wie z.B. Cadmium, Quecksilber und Dioxine toxikologisch vertretbare Höchstgehalten fest, nicht aber für Arsen. Die Deutsche Kontaminanten-Verordnung (Kmv) legt derzeit ebenfalls keinen Wert zur Begrenzung der Arsengehalte in Lebensmitteln fest. Auch existieren für Arsen keine unverbindlichen Richtwerte, die für eine orientierende Bewertung herangezogen werden könnten. Ursächlich sind analytische Schwierigkeiten, denn die humantoxikologische Relevanz von Arsen ist bekannt. Auf EU-Ebene werden aktuell Höchstgehalten für Arsen in Lebensmitteln diskutiert. Bis eine Europäische Regelung vorliegt, sind keine nationalen Festlegungen zu erwarten.

Auch wenn die gesetzlichen Vorgaben derzeit keine Höchstgehalten für Arsen in Lebensmitteln beinhalten, ist von den Herstellern und denjenigen, die Lebensmittel in Verkehr bringen, dafür zu sorgen, dass ihre Produkte keine gesundheitsschädlichen Arsenkonzentrationen enthalten. In diesem Zusammenhang ist in Gebieten mit erhöhten Arsengehalten in Böden der Gefahr einer Aufnahme von Arsen in pflanzliche Lebensmittel besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist, um bei Bedarf **vorsorgende Maßnahmen** zum Schutz der Verbraucher zu ergreifen. Diese sind angezeigt, wenn ein erhöhtes Risiko, z.B. aufgrund einer Mobilisierung des Arsens im Boden oder durch die Verschmutzung mit belastetem Bodenmaterial besteht. Hier bieten sich z.B. Überwachungsmaßnahmen, Verhaltens- und Handlungsempfehlungen für Verbraucher, Landwirte, Direktvermarkter und Gartenbesitzer an (s. Kap. 5).



Handelsrelevante Höchstgehalten von Arsen

China hat Grenzwerte für anorganisches Arsen in Reis und für Arsen-Gesamtgehalten in anderen Getreidearten in Höhe von jeweils $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ festgesetzt. (Quelle: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science).

3 GEFAHRENPOENZIAL UND TRANSFERWEGE ZUR PFLANZE

Viele Arsenverbindungen sind giftig und wirken krebserzeugend oder krebefördernd. Natürliche Arsengehalte in Böden liegen in Deutschland in der Regel zwischen 2 und 20 mg kg⁻¹. Hohe Arsenkonzentrationen bis > 1.000 mg kg⁻¹ können in Böden aufgrund von geogenen Anreicherungen (z.B. vererzten Gesteinen) und pedogenen Umverlagerungen (z. B. Verlagerung von Humus, Eisen- und Manganoxiden, Ton) sowie von weiteren natürlichen Anreicherungsprozessen (z. B. Anreicherung über den oberflächennahen Zustrom von As-haltigem Grundwasser) naturbedingt auftreten.

Darüber hinaus gelangt Arsen aber auch durch anthropogene Aktivitäten in die Böden, z. B. als Folge von Einträgen aus der Luft (z.B. Verbrennung arsenhaltiger Kohle, Hüttenindustrie) sowie bei der Anwendung arsenhaltiger Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel, Industrie- und Abwasserschlämme auf. Auch durch historischen oder aktuellen Bergbau und militärische Altlasten mit Kampfmittelentsorgung sind Arsenbelastungen in Böden entstanden.

Naturbedingt wie auch anthropogen bedingt erhöhte Arsenkonzentrationen können aufgrund von Erosionsprozessen und Sedimenttransport auch von der eigentlichen Quelle weit entfernte Flächen betreffen; hier sind insbesondere die Auenböden zu nennen.

In Deutschland werden viele der flächenhaft mit Arsen belasteten Standorte landwirtschaftlich genutzt, so dass ein Übergang von Arsen aus dem Boden in die Pflanze zur Beeinträchtigung der Qualität von Nahrungs- und Futtermitteln führen kann. Um Gefährdungen von Tier und Mensch durch eine Aufnahme von Arsen zu vermeiden, sind die Regelungen zu Höchstgehalten im Futter- und Lebensmittelrecht bei der Erzeugung von Futterpflanzen, aber auch von Nahrungspflanzen einzuhalten (s. Kap. 2).

Das Gefahrenpotenzial für Nutzpflanzen ergibt sich aus

- dem Freisetzungspotenzial von im Boden gebundenen Arsen, → Kap. 3.1
- der Möglichkeit der Aufnahme und Anreicherung von Arsen in Pflanzen und des Verbleibs in den zum Verzehr oder zur Verfütterung genutzten Pflanzenteilen sowie → Kap. 3.2
- der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den dafür maßgeblichen Transferwegen vom Boden zur Pflanze. → Kap. 3.3



Eigenschaften und Toxizität von Arsen (As)

Das Halbmetall Arsen ist als Spurenelement in allen Umweltkompartimenten verbreitet. Die Toxizität reicht von akuten Vergiftungen bis hin zur Wirkung als Karzinogen. In Böden und wässrigen Phasen tritt es überwiegend in Form zweier Arsen-Sauerstoffverbindungen, dem Arsenat(V) und dem Arsenat(III) (früher auch Arsenit) auf. Aufgrund der Kanzerogenität wird As in die höchste Gefährdungsklasse eingestuft (EU-Klasse 1, Klasse A der US EPA). Arsenate sind in ihrem chemischen Verhalten den Phosphaten sehr ähnlich.

Arsenat(V): H_2AsO_4^- Arsenat(III): H_2AsO_3^-

Toxische Eigenschaften verschiedener Arsenspezies:

- Die toxischste As-Spezies, das flüchtige Arsin (AsH_3), kommt in natürlichen Systemen allenfalls in äußerst geringen Konzentrationen und nur unter stark reduzierenden Bedingungen vor.
- Arsenat(III) blockiert die Funktion wichtiger Enzyme. Die hohe Toxizität ist auch dadurch bedingt, dass Arsenat(III) im physiologischen pH-Bereich als gut biomembran-durchgängiges, ungeladenes Molekül vorliegt.
- Arsenat(V) blockiert den Energiehaushalt von Organismen.
- Organische As-Verbindungen haben in Böden und anderen Umweltmedien meist einen geringeren Anteil am Gesamt-As als die anorganischen Spezies. Sie sind in der Regel flüchtiger, jedoch sind die bisher bekannten Verbindungen weniger toxisch als anorganische Spezies.
- Elementares As weist nur eine geringe Toxizität auf.



3.1 Verhalten von Arsen im Boden

Die Mobilität wie auch Toxizität von Arsen wird wesentlich von der Oxidationsstufe seiner Verbindungen bestimmt. So weist Arsen(III) im Boden eine höhere Mobilität und Toxizität auf als Arsen(V). Unter Belüftung wird das vorherrschende Arsen(V) im häufigen Boden-pH-Bereich zwischen pH 3 und 9 stärker im Boden gebunden als Arsen(III). Der größte Anteil des Arsens ist dann meist in amorphen oder kristallinen Eisenoxiden eingeschlossen, teilweise aber auch an Aluminiumoxide, Tonminerale und organisches Material gebunden. In diesem Fall fungiert der Boden als Arsen-Senke und das Arsen ist in der Regel nicht oder nur schwer pflanzenverfügbar. Es kann aber durch mikrobiellen Abbau der organischen Substanz und durch Wurzelausscheidungen (z.B. organischer Säuren) für die Pflanze verfügbar werden. Unter reduzierenden Bedingungen ist kurz- bis mittelfristig ebenfalls eine Mobilisierung mit anschließender Aufnahme durch die Pflanzen möglich.

Reduzierende Bedingungen treten in Böden auf, wenn organische Substanz etwa durch Überstau mit Wasser oder Bodenverdichtung unter Luftabschluss gerät, wie zeitweilig in grund- und stauwasserbeeinflussten Böden. Aber auch durch Vergraben und Versiegeln können reduzierende Bedingungen entstehen. Als Motor für Redoxprozesse wirken die Mikroorganismen im Boden. Zum Beispiel wird unter Luftabschluss Eisen(III) zu löslichem Eisen(II) reduziert, d.h. Eisenoxide werden aufgelöst, gebundenes Arsen(V) in die Bodenlösung freigesetzt und zu Arsen(III) umgewandelt. Hier wirken die Eisenoxide als Arsen-Quelle.



Einfluss

Einflussgrößen für die Freisetzung von im Boden gebundenen Arsen

- Redoxpotenzial und Faktoren, die die Redoxprozesse steuern: Dauer der reduzierenden Bedingungen, Gehalt und Qualität organischer Bodensubstanz als Elektronendonator, Nitrat- und Manganionen als Elektronenakzeptoren und Bodentemperatur
- Bindungsformen des Arsens bzw. Art, Menge und Stabilität (amorph ⇔ kristallin) des Sorbenten: vorrangig Eisenoxide, nachrangig auch Aluminium- und Manganoxide, Sulfide, Calcium-Minerale, Tonminerale, organische Substanz (Huminstoffe)
- Bodenreaktion (pH-Wert)
- Art, Konzentration und Wertigkeit (Ionenstärke) von Konkurrenz-Ionen in der Bodenlösung (insbesondere Phosphat, gelöste niedermolekulare organische Substanzen, (Hydrogen-)Karbonate, z. T. Molybdat und Sulfat). Die Ionenstärke der Bodenlösung beeinflusst Arsen(V), kaum aber Arsen(III).

Wichtigste Freisetzungsprozesse

- Auflösung der Hauptsorbenten (in der Regel Eisenoxide) über mikrobielle Reduktion und Überführung von adsorbiertem sowie eingeschlossenem Arsen in die Lösungsphase
- Reduktion von Arsen(V) in die mobilere Redoxspezies Arsen(III)
- Mikrobieller Abbau organischer Substanz
- Beteiligung weiterer mikrobieller und (bio-)chemischer Prozesse, die das Redoxpotenzial verändern, sowie pH-Änderungen



Vertiefende Informationen

Abschlussberichte der Projekte B 4.07 und B 1.10 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“, als Download unter: <http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de>

Feld- und Gefäßversuche haben gezeigt, dass Reduktionsprozesse im Boden jedoch nicht immer nach dem beschriebenen Schema (d.h. der Redoxhierarchie) ablaufen, so dass Arsen(III) auch unter Belüftung die Hauptspezies in der Bodenlösung bilden kann. Umgekehrt kann Arsen(V) selbst bei Redoxpotenzialen < -200 mV einen Großteil des gelösten Arsens ausmachen. Verschiedene Bodentypen (Auenböden ⇔ Niedermoorböden) verhalten sich sehr unterschiedlich (Overesch et al. 2008). Es ist nicht möglich, allein vom Redoxpotenzial auf die Freisetzung des im Boden gebundenen Arsens und damit auf die Arsenverfügbarkeit für Pflanzen zu schließen. Hinzu kommt, dass sich Redoxpotenzial und pH-Wert gegenseitig beeinflussen, so dass die Löslichkeit von Arsen neben dem Redoxpotenzial auch vom Boden-pH-Wert abhängig ist. Die geringste Löslichkeit besitzen Arsenverbindungen in gut durchlüfteten Böden und im neutralen pH-Wert-Bereich bei etwa pH 7. Zur Orientierung kann die Abbildung 3-1 dienen. Hieraus wird auch deutlich, dass in Böden unter zunehmend reduzierenden Bedingungen, dem pH-Wert eine steigende Bedeutung zukommt: während die Arsenmobilität belüfteter Böden erst bei Absinken des pH-Wertes unter pH 3 deutlich zunimmt, findet in Böden unter reduzierenden Bedingungen eine Freisetzung schon bei Absinken unter pH 6 statt.

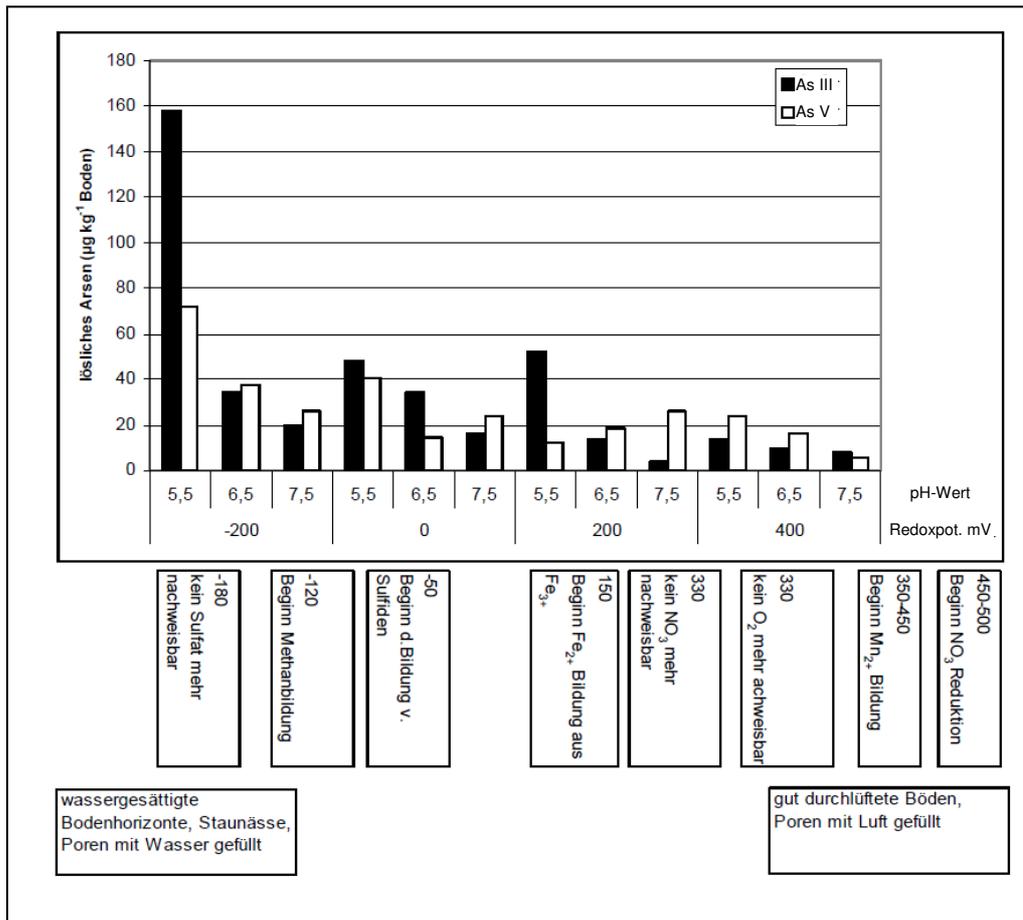


Abbildung 3-1: Verhalten der für die Pflanzenaufnahme wichtigen anorganischen Arsen-Spezies in Abhängigkeit vom pH-Wert und vom Redoxpotenzial der Böden (Arsen in der Bodenlösung)
(Quelle: LfULG Sachsen 2008 nach Scheffer & Schachtschabel 1989; Rowell 1994; Marin et al. 1993, stark verändert)

In Böden, die durch einen häufigen Wechsel von Vernässung und Trocknung geprägt sind, überwiegen oft die Prozesse, die zu einer Arsenfestlegung führen. Die Bindung des Arsens erfolgt hier vor allem in den Trockenphasen an amorphen und kristallinen Eisenoxiden und ist vergleichsweise stabil. Bei hohen Eisenoxidgehalten im Boden wird das aus reduktiv aufgelösten Eisenoxiden freigesetzte Arsen offenbar durch verbleibende Oxide rasch wieder gebunden. Treten hohe Arsenkonzentrationen in oberflächennahen Grundwässern auf, findet durch diese Bindung eine Arsen-Anreicherung in belüfteten Bodenhorizonten statt. Der Boden ist dann in der Regel als Senke des Arsens anzusehen.

Eine andere Situation zeigt sich in arsenbelasteten Auenböden, die durch die Ablagerung von Sedimenten aus dem Erzbergbau und der Erzverarbeitung geprägt sind. Diese Sedimente weisen nicht notwendigerweise auch hohe Eisengehalte auf. In diesen Böden ist das Arsen vorrangig an amorphen Eisenoxiden gebunden und damit weniger stabil im Boden fixiert. Hier kann bei reduzierenden Bedingungen eine Mobilisierung des Arsens in das Bodenwasser stattfinden, selbst wenn nur eine geringe Arsen-Kontamination des Bodens vorliegt. Dies gilt insbesondere für Standorte mit einer hohen Arsensättigung der Eisenoxide bzw. mit hohem Anteil an organischer Substanz

(Fritzsche et al. 2006). In stark kontaminierten Auenböden können zum Teil aber auch sehr stabile Bindungsformen angereichert sein, z.B. über die Sedimentation schwer löslicher Sulfide aus dem Erzbergbau (Overesch et al. 2008).

Die Bindungsform des Arsens im Boden und deren Stabilität ist somit entscheidend für die Mobilisierung und den davon abhängigen systemischen Transfer in Pflanzen. Die Vergesellschaftung des Arsens mit Eisenoxiden ist neben Redoxpotenzial und pH-Wert sowie der Qualität und Quantität der organischen Substanz der wichtigste löslichkeitsbestimmende Parameter für die Beurteilung des Freisetzungspotenzials von Arsen aus Böden.

Wassersättigung führt in humosen Oberböden meist zu einer höheren Arsen-Mobilität als in den Unterbodenhorizonten von grund- oder stauwassergeprägten Böden. Reduktionsprozesse werden maßgeblich von Mikroorganismen gesteuert und sind von der Qualität bzw. Abbaubarkeit der organischen Bodensubstanz abhängig. Vor allem leicht verfügbare organische Substanzen, die innerhalb von Tagen, Wochen oder Monaten umgesetzt werden, wirken fördernd. Zudem verursacht organische Substanz die Bildung löslicher Arsen-Komplexe (s. weiterführend Overesch et al. 2008). Darüber hinaus ist die Bodentemperatur ein wichtiger Faktor für die Aktivität der Mikroorganismen und die Löslichkeit von Sauerstoff in der wässrigen Phase, so dass bei Frost und durch Austrocknung auch die Reduktion von Eisenoxiden reduziert bzw. nicht mehr nachweisbar ist. Als Schwellenwert für mikrobielle Reduktionsprozesse wird eine Temperatur von 5 °C angesehen. Unterhalb davon stellen sich im Boden auch bei Wassersättigung aufgrund der geringen mikrobiellen Aktivität in der Regel keine reduzierenden Verhältnisse ein (Rabenhorst 2005). Bis etwa in den Bereich des Temperaturoptimums vieler Mikroben (25 – 30 °C) nimmt die Freisetzung ggf. exponentiell zu.

Für die Beurteilung der Gefährdung eines Arsentransfers vom Boden in Nutzpflanzen spielt der Boden als Arsenquelle eine Rolle, wenn es in der Vegetationsperiode zu längeren Vernässungsphasen kommt. Unter günstigen Bedingungen für mikrobielle Umsetzungsprozesse kann bereits ein Zeitraum von wenigen Tagen genügen, damit sich reduzierende Bedingungen einstellen und eine Arsenfreisetzung in das Bodenwasser ermöglicht wird. In der Vegetationsperiode ist dann ein Transfer in Nutzpflanzen möglich. Insbesondere bei mehrwöchiger (Wieder-) Vernässung arsenführender Bodenhorizonte im Sommerhalbjahr ist mit einer problematischen Mobilisierung des Arsens zu rechnen.

Bei sehr hohen Arsengehalten im Boden können auch Desorptionsprozesse ohne Redox-Beteiligung zu einer relevanten Freisetzung von Arsen in die Bodenlösung führen (Overesch et al. 2008).

Aus dem Verhalten von Arsen im Boden lässt sich die Gefährdung im Hinblick auf eine Freisetzung ableiten und zusammenfassend darstellen (s. Abb. 3-2).

Hohe Freisetzungsgefährdung	<p>Böden bzw. Bodenhorizonte mit Arsenanreicherungen und zeitweise reduzierenden Bedingungen, d.h. mit regelmäßigem Überstau durch Grundwasser oder Überflutung bei Hochwasser oder Starkregen oder Bodenverdichtung sowie</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gehalten an organischer Substanz (> 3 Masse-%) Hier kann bereits bei einer kurzfristigen Wassersättigung (wenige Tage) das im Boden gebundene Arsen freigesetzt werden, sofern gleichzeitig geringe Mangan- und Nitratgehalte vorliegen. Eisen wird erst als Elektronenakzeptor genutzt, wenn kein Nitrat und Mangan mehr zur Verfügung steht. ▪ einem C/N-Verhältnis < 20 bzw. einem hohen Anteil leicht verfügbarer organischer Substanz Leicht verfügbare organische Substanz wird innerhalb von Tagen, Wochen und Monaten umgesetzt. Dadurch sind die Lebensbedingungen für Mikroorganismen begünstigt, die die Reduktionsprozesse bei Bodentemperaturen > 5°C maßgeblich steuern. ▪ ausgeprägter Versauerungstendenz Unter reduzierenden Bedingungen und dabei auftretenden pH-Werten unter pH 6 kann Arsen verstärkt freigesetzt werden, bei gut durchlüfteten Böden erst bei pH 3. ▪ geringen Eisenoxidgehalten ▪ Arsen, das vorrangig an redox-labilen Eisenoxiden gebunden ist <p>Eine Aufnahme von Arsen in Pflanzen ist nur zu erwarten, wenn zeitweise reduzierende Bedingungen während der Vegetationsperiode vorherrschen (z.B. bei Frühjahr- und Sommerhochwasser). Im Winter ist hingegen vorrangig ein Transfer ins Grundwasser relevant.</p>
Geringe Freisetzungsgefährdung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gut durchlüftete Böden bzw. Bodenhorizonte ▪ Böden bzw. Bodenhorizonte mit zeitweise reduzierenden Bedingungen und geringen Gehalten an organischer Substanz (< 1,5 Masse-%) und geringer Versauerungsneigung Unter bestimmten Bedingungen (z.B. Nitratnachlieferung) sind auch bei langfristiger Wassersättigung (> 6 Monate) noch positive Redoxpotenziale zu erwarten. Erst bei Redoxpotenzialen unter ca. + 200 mV ist mit einer beginnenden Reduktion von Eisenoxiden zu rechnen. Auch unter reduzierenden Bedingungen ist bei pH-Werten von pH 6 bis 7,5 nur eine mäßige Freisetzung zu erwarten.

Abbildung 3-2: Freisetzungsgefährdung von im Boden gebundenem Arsen

3.2 Arsen in Pflanzen

In den oberirdischen Teilen von Nahrungspflanzen wurden bisher in der Regel geringe Arsengehalte nahe der analytischen Nachweisgrenze festgestellt, selbst dann, wenn die Pflanzen auf arsenbelasteten Böden wachsen. Hier spiegeln sich geringe Löslichkeit und die Sorptionseigenschaften der Böden wider, die in durchlüfteten Böden insbesondere bei hohen Gehalten von Tonmineralen und Eisenoxiden eine Freisetzung des Arsens verhindern. Darüber hinaus können Fällungsprozesse an Wurzeln (z.B. „Eisen-Plaqué“-Bildung) durch ein verändertes Milieu in der belüfteten Rhizosphäre die Arsenaufnahme verhindern. Von feuchten bis nassen Standorten ist jedoch bekannt, dass über die Wurzel aufgenommenes Arsen in maßgeblichen Konzentrationen in Grünlandpflanzen auftreten kann (Ebert 2005).



Arsen in Pflanzen

- Die Aufnahme ist abhängig von Art und Sorte: Kräuter > Gräser (Kaufmann-Boll et al. 2012, LfL Sachsen 2006a, Overesch et al. 2007); Sortenunterschiede bei Getreidearten sind bekannt (LfULG Sachsen 2008).
- Die Aufnahme kann durch eine erhöhte Phosphor-(Phosphat-)Verfügbarkeit im Boden, z.B. nach P-Düngung und durch Eisenbeläge an Wurzeln behindert werden.
- Die Aufnahme ist in der Regel in gut durchlüfteten Böden reduziert.
- Bei Störungen der pflanzlichen Homöostase (d.h. des „inneren Gleichgewichtes“) durch Stressfaktoren (Arsen in der Bodenlösung, Wasserstau, Nährstoffmangel, Verschiebung der artspezifischen Nährelementverhältnisse (N:P:K-Stöchiometrie), Befall mit mikrobiellen Krankheitserregern und Insekten) muss mit einem verstärkten Transfer in die Pflanzen gerechnet werden.
- Pflanzenteile enthalten bei praxisüblicher, bedarfsgerechter Düngung unterschiedlich viel Arsen, zumeist in der Reihe: Wurzel > Blätter > Stängel > Früchte, Körner.
- Die meisten Nahrungs- und Futterpflanzen besitzen keine ausgeprägten Toleranzmechanismen; besonders empfindlich sind Leguminosen (einige bisher geprüfte Arten).
- In den meisten Pflanzen liegen hauptsächlich anorganische Arsenspezies vor (As(III), As(V)). Es können aber auch methylierte Arsenspezies überwiegen. Dabei können sich die Anteile verschiedener toxischer Arsenspezies in der Pflanze bzw. den einzelnen Pflanzenteilen während des Wachstums ändern.

Der Grad der Aufnahme von Arsen in Pflanzen hängt stark von der Pflanzenart ab. Reaktionen und Umverteilungsprozesse innerhalb der Pflanze können die Arsengehalte in einzelnen Pflanzenteilen oder Ernteprodukten verändern. In der Regel weisen Wurzeln höhere Gehalte als oberirdische Pflanzenteile auf. Bei Grünland können die Arsengehalte im oberirdischen, gewaschenen Pflanzenmaterial – d.h. aufgrund einer systemischen Aufnahme – von Mai bis Juli/August um über 100 % zunehmen (Overesch et al. 2007). Die Gehalte in Pflanzen liegen im Allgemeinen bei $< 1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$, können aber z.B. in Gräsern auf Abraumhalden alter Arsengruben im Extremfall $> 3.000 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ erreichen (Alloway 1999). Die Konzentration in den oberirdischen Organen ist aber immer geringer als im Boden, d.h. es erfolgt keine Anreicherung gegenüber dem Boden.

Grünlandpflanzenarten unterscheiden sich bezüglich ihrer Arsenaufnahme aus dem Boden deutlich. Gräser nehmen deutlich weniger Arsen auf als andere krautige Pflanzen (hier als „Kräuter“ bezeichnet). Diese beeinflussen die systemische Arsenbelastung des gesamten Grünlandbestandes daher stärker (LfL Sachsen 2006a). Weil für die bisher im direkten Vergleich geprüften Arten in Gräsern geringere Gehalte nachgewiesen wurden, ist auch die Artenzusammensetzung und im Besonderen das Verhältnis von anderen krautigen Pflanzen zu einkeimblättrigen Gräsern ein Einflussfaktor für den Arsentransfer über die Wurzel. Kritische Zeiten im Vegetationsverlauf mit einem erhöhten Arsentransfer unter reduzierenden Bedingungen lassen sich nicht ableiten; generell enthalten ältere Pflanzenteile in der Regel mehr Arsen als Jüngere. Stärker wirkt sich jedoch das Bodenmilieu auf die systemische Aufnahme aus (Redox-Bedingungen, pH-Wert, KAK, Eisengehalt, Kohlenstoff- und Nitratvorrat). Gerade im Grünland, aber auch beim Feldfutterbau wird die systemische Arsenaufnahme der Pflanzen allerdings zumeist durch den Verschmutzungspfad überdeckt.

Eine Sortenabhängigkeit hinsichtlich der Schwermetall- und Arsenaufnahme ist in vielen Studien für Reis (*Oryza sativa*) beschrieben, lässt sich aber auch für andere Getreidearten wie Sommergerste und Winterweizen belegen. In umfangreichen Gefäß- und Feldversuchen mit diesen Arten in Sachsen zeigten sich sortenabhängige Unterschiede in den Arsenkonzentrationen der Gesamtpflanze von bis zu 44 %. Der Arsengehalt im Korn war im Verhältnis zur Pflanze und besonders zur Wurzel sehr gering und überschritt unter den gegebenen Milieubedingungen Grenzwerte nur sehr vereinzelt. In Feldversuchen konnte gezeigt werden, dass die Mykorrhizierung des Saatgutes, d.h. die Impfung mit Pilzen, zu einem Anstieg des Arsengehaltes der Gerste im Feldversuch führt, während mäßige Phosphorgaben, als Unterfußdüngung vor der Aussaat gegeben, den Gehalt erheblich – jedoch nicht generell – senken können (LfULG Sachsen 2008).

Besonders empfindlich im Hinblick auf Arsentoxizität sind Bohnen und andere Leguminosen. Aufnahme und Toxizität hängen auch von der jeweils in der Bodenlösung vorliegenden Arsenspezies ab; bei Bohnenwurzeln verlief die Aufnahme und Konzentration in der Abfolge Arsenat(V) > Arsenat(III) > Monomethylarsonsäure > Dimethylarsinsäure (Alloway 1999). Auch für Kopfsalat werden erhöhte Aufnahmen aus dem Boden berichtet (Marschner et al. 2010).

Bei der Beurteilung von Arsenkonzentrationen in Pflanzen ist mit Blick auf die Belastungsursache zu beachten, dass Arsen auch lokal durch Einträge aus der Luft direkt auf und in Pflanzenmaterial gelangen kann (z.B. Immissionen aus Kupferhütten oder Kohlekraftwerken).

3.3 Transferwege vom Boden zur Pflanze

Für die bodenbedingte Arsenbelastung von Pflanzen sind im Wesentlichen über zwei Wirkungspfade relevant:

- **Verschmutzungspfad:** Arsenbelastungen sind bedingt durch an der Pflanze anhaftendes arsenhaltiges Bodenmaterial und/oder durch an Pflanzenoberflächen adsorbiertes Arsen aus dem anhaftenden Boden und/oder durch Direkteinträge aus der Luft.
- **Systemischer Pfad:** Arsen wird über das Wurzelsystem aufgenommen, in der Pflanze verteilt und angereichert.

Welcher dieser beiden Pfade dominiert, ist standort- und nutzungsabhängig. An gut durchlüfteten Standorten ist die Verschmutzung mit anhaftendem Bodenmaterial der maßgebliche Transferweg. An längerfristig wassergesättigten Standorten und bei Pflanzenarten bzw. -sorten, die Arsen aufnehmen und anreichern, kann neben der Verschmutzung eine systemische Aufnahme über die Pflanzenwurzel erfolgen.

Der Ausgasungspfad spielt für die im Boden vorherrschenden anorganischen Arsenverbindungen keine Rolle. In untergeordnetem Umfang können durch mikrobielle Aktivität flüchtige organische Arsenverbindungen gebildet werden. Auch sie spielen jedoch für die Gefahrenbeurteilung keine Rolle.



Faktoren für den Arsenübergang Boden – Nutzpflanze

Verschmutzungspfad

- Arsengehalt im Oberboden
- Verschmutzungsgrad des Ernteprodukts (Grad der Verschmutzung mit anhaftendem Bodenmaterial in % an der Futtertrockenmasse)

Systemischer Pfad (Wurzelaufnahme)

- Gehalt an verfügbarem Arsen in der gesamten Wurzelzone
- Intensität der Arsenfreisetzung
- P- und N-Gehalt sowie Basensättigung im Boden
- Pflanzenart und -sorte

In der Regel vorherrschender Pfad für

Futtermittel, insbesondere
Grünlandaufwuchs und Feldfutterbau

Nahrungsmittel,
aber auch Futtergetreide

1. Verschmutzungspfad

Vor allem bei bodennah wachsenden Grundfuttermitteln wie Grünlandaufwuchs oder Klee-grasgemischen des Feldfutterbaus ist die Verschmutzung mit anhaftendem Bodenmaterial der maßgebliche Transferweg. In diesem Fall hängt der Arsengehalt in der Nutzpflanze vom Arsengehalt im Oberboden und dem Verschmutzungsgrad des Ernteproduktes ab.

Der Verschmutzungsgrad liegt in der Praxis in der Regel im Bereich von 2 bis 4 % (LfL Bayern 2005), schwankt häufig auch zwischen 1 und 6 % und kann in einigen Fällen auch Werte über 10 % annehmen (LUA NRW 2006). Im Mittel der guten fachlichen Praxis ist ein Verschmutzungsgrad von ca. 3 % anzunehmen (Elsässer et al. 2004).

Der Verschmutzungsgrad wird vom Zustand der Narbe und von der Erntetechnik und deren spezifischer Einstellung (z.B. Schnitthöhe) bestimmt.

Für Nahrungspflanzen ist der Verschmutzungspfad im Hinblick auf eine Arsenbelastung häufig nicht relevant. Anhaftender Boden wird durch Putzen, Waschen und Schälen weitgehend entfernt. Nur an bodennah wachsenden, verzehrbaren Pflanzenteilen (z.B. Erdbeeren ohne Strohhunterlage) können Reste von Bodenmaterial verbleiben (LUA NRW 2006).

2. Systemischer Pfad

In wassergesättigten Böden kann es zur Mobilisierung des im Boden gebundenen Arsens in die Bodenlösung kommen und Arsen kann über die Wurzel in Nahrungs- und Futterpflanzen aufgenommen und dort angereichert werden. Für das Ausmaß der Gefährdung entscheidend sind der Arsengehalt im Boden, die Intensität der Freisetzungprozesse (vgl. Kap. 3.1), ggf. der Zustrom arsenhaltigen Wassers aus anderen Bereichen, die Pflanzenart bzw. -sorte und die Phosphor- und Stickstoffversorgung.

4 EMPFEHLUNGEN ZUR ERFASSUNG VON VERDACHTSFLÄCHEN UND GEFAHRENBEURTEILUNG

Für die gängigen Arbeitsschritte der Untersuchung und Bewertung von stofflichen Bodenbelastungen nach den Anforderungen des Bodenschutzrechts (insb. §§ 3 und 4 BBodSchV) enthalten die folgenden Abschnitte Informationen und Empfehlungen, die sich speziell auf arsenbelastete Flächen mit Anbau von Nahrungs- und Futterpflanzen (ohne Altablagerungen und Altstandorte) beziehen:

- Erfassung von Verdachtsflächen → Kap. 4.1
- Orientierende Untersuchung → Kap. 4.2
- Vertiefende Sachverhaltsermittlung im Rahmen einer Detailuntersuchung zur abschließenden Gefährdungsabschätzung → Kap. 4.3
- Probenahme, Vorbehandlung und Analytik → Kap. 4.4

Für weitere detaillierte Hinweise zum Untersuchungsablauf wird auf die einschlägigen Merkblätter und Leitfäden für den Pfad Boden-Nutzpflanze verwiesen (s. Kap. 7).

4.1 Erfassung von Verdachtsflächen

Die Möglichkeit des Übergangs von Arsen vom Boden in Ernteprodukte besteht in Gebieten mit Arsenanreicherungen im Oberboden (Verschmutzungspfad) sowie mit Arsenanreicherungen im Boden bei zeitweise reduzierenden Verhältnissen durch Grund- oder Stauwassereinfluss (systemischer Pfad).

Die wichtigsten Quellen des Arsens in Böden sind in Tabelle 4-1 aufgeführt. Rückstände aus der früheren Anwendung arsenhaltiger Pflanzenschutzmittel sind in Deutschland in besonderem Maße von Obst- und Weinbauflächen bekannt.

Tabelle 4-1: Arsenquellen und Vorkommen in Böden

Vorkommen in Böden und Gewässern	
Anthropogene Quellen	Natürliche Quellen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bergbau (natürliche Quellen mit beachten) ▪ Metallverhüttung, insbes. Kupfer, Eisen, Zink, Blei und Arsen ▪ Kohleverbrennung ▪ Glasherstellung ▪ Textil-/Lederindustrie ▪ Holzschutzmittel ▪ arsenhaltige Pflanzenschutzmittel und Dünger ▪ Kampfmittel (auch entgiftete, entsorgte) ▪ Arzneimittel ▪ Bewässerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arsenminerale (Arsenopyrit, FeAsS; Realgar, AsS; Cobalit, CoAsS etc.) bzw. bekannte Arsen führende Vererzungen und deren Umgebung (bergbauliche Aktivitäten mit beachten) ▪ Eisenoxide mit gebundenem Arsen ▪ arsenhaltiges Grundwasser
→ häufig Arsen-Anreicherung in Oberböden	→ häufig Arsen-Anreicherung in Unterböden, teilweise bis in Oberböden reichend

4.1.1 Wesentliche Fallgestaltungen

Anhaltspunkte im Sinne von § 9 Abs. 1 BBodSchG für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung durch den Übergang von Arsen vom Boden in Nutzpflanzen, d.h. für mögliche Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen können in folgenden Fällen vorliegen, die sich auch überlagern können:

Fall A **Böden aus Ausgangssubstraten mit erhöhten Arsengehalten oder mit hohen immissionsbedingten Arseneinträgen**

- Lage innerhalb des oberflächigen Ausstrichs von Vererzungen und bestimmten Sedimentgesteinen z.B. Röttone im Oberen Buntsandstein, Unterer Lettenkeuper, Formationen des Oberen und Unteren Muschelkalks
- Lage im Bereich von Sauren Magmatiten und Metamorphiten oder Carbonat- und Tongesteinen (vgl. Utermann et al. 2008) bzw. deren Verwitterungsprodukten
- Lage im Bereich von umgelagerten arsenreichen Materialien, z.B. eiszeitliche Verwitterungsdecken, Flussablagerungen oder Kolluvisole
- Lage im Bereich von Einträgen arsenhaltiger Stäube über die Luft, z.B. aus Arsen- und Kupferhütten oder Kohlekraftwerken

In Gesteinen können Arsengehalte bis zu 900 mg kg⁻¹ TM auftreten (Alloway 1999). Im Bereich von Vererzungen kann dieser Wert um ein Vielfaches übertroffen werden. Ent-

sprechende Regionen liegen z.B. im Erzgebirge und Erzgebirgsvorland in Sachsen, im Harz und am Harzrand in Niedersachsen und in Baden-Württemberg. Bodenanalysen im Bereich arsenführender Ausgangssubstrate in Baden-Württemberg zeigten Arsengehalte bis zu 107 mg kg^{-1} TM (90. Perzentil) (LUBW 2011). In Bereichen intensiver Arsen-Immission wie beispielsweise im Fall der „Gifthütte Geyer“ (Sachsen) können auf über 80 % der Flächen in der Umgebung Arsengehalte von über 140 mg kg^{-1} im Oberboden angetroffen werden (Rank et al. 2000).

Fall B Böden in Flussauen / Auenböden

- Historische Einträge von Arsen aus geogenen Quellen
- Talfüllungen (Böden und Sedimente der Auen und Flussterrassen) unterhalb von durch Vererzungen geprägten Regionen, ehemaligem Bergbau, Metallverhüttung und -verarbeitung sowie angeschlossener chemischer Industrie
- Belastete Sedimente als Quelle des Arsens
- Oberflächennahes Grundwasser bzw. ausgeprägte Grundwasserdynamik

Auenböden zeigen häufig Arsengehalte über den Grenzwerten der Umweltschutzgesetzgebung (Overesch et al. 2008). Betroffen sind z.B. Flussauen der Elbe und der Oker in Niedersachsen (Oker-Aue aufgrund von Silberverhüttung), Auen im Großen Wiesen-, im Elz- und im Glottertal (Schwarzwald) in Baden-Württemberg sowie Auen der Freiburger Mulde, Zwickauer Mulde, Vereinigten Mulde, Zschopau und untergeordnet der Weißeritz, Müglitz, Elster und Pleiße in Sachsen (Auen der das Erzgebirge entwässernden Flüsse mit Bergbau- und Hüttenstandorten und Lagerstätten arsenführender Vererzungen).

Fall C Niederungsböden mit Arsenanreicherungen aus dem Grundwasser

- Arsenquelle im Einzugsgebiet des durchströmenden Grundwassers, z.B. marine Ablagerungen, sulfidische Erzvorkommen, Paläo-Raseneisenerze (Wendland et al. 1999, Banning et al. 2009)
- Oberflächennahes Grundwasser bzw. ausgeprägte Grundwasserdynamik oder Hangzugwasser
- Im Boden entstandene (pedogene) Eisenanreicherungen
 - über ca. 30 g kg^{-1} ; gefunden werden teilweise bis zu 500 g kg^{-1} Eisen (z.B. Overesch et al. 2008, Mansfeldt et al. 2012)
 - Verockerungen, Eisenschüssigkeit (Gso-Horizonte)
 - Raseneisenstein-Konkretionen (Gkso-Horizonte)
 - gebanktes, verfestigtes Raseneisenerz (Gkmo-Horizonte)
 - Bodentypen: Brauneisengley oder eisenreiche Varietäten anderer hydromorpher Böden wie Quellengley, Stagnogley, Nassgley, Niedermoor oder Anmoor
 - Hinweise auf früheren Abbau von Raseneisenerz zur Eisengewinnung

- Freisetzungspotenzial durch reduktive Auflösung von Sorbenten (grund- und stauwasserbeeinflusste Böden)

Verockerungen und Eisenanreicherungen in Böden weisen nicht generell auf eine besondere Anreicherung von Arsen hin, sondern erst im Zusammenspiel mit erhöhten Arsengehalten des durchströmenden Grundwassers. Gesteine, die natürliche Arsenquellen darstellen, lassen sich auffinden, indem die Verbindung zwischen Quelle und Senke, der Mineralbestand, die Arsenkonzentration, das Freisetzungspotenzial, die Redoxbedingungen im Grundwasser und mögliche Arsenausträge überprüft werden (Banning et al. 2009).

Niederungsböden mit natürlichen (geogenen) Eisenanreicherungen aus dem Grundwasser können Arsengehalte bis über $1.000 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ aufweisen (Overesch et al. 2008). Belastete und in der Regel kleine Einzelflächen liegen z.B. im südlichen Münsterland, im Rheinland und im Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen) sowie im Erdinger, Freisinger und Dachauer Moos (Bayern) und im Ortenaukreis (Baden-Württemberg).



Niedermoor mit eisenschüssigem Horizont
(Foto: Kaufmann-Boll)



Verockerung in einem Entwässerungsgraben
(Foto: Geologischer Dienst NRW 2010)

4.1.2 Erfassungsmethoden

Zur Erfassung von Gebieten mit Anhaltspunkten für das Vorliegen von schädlichen Bodenveränderungen durch Arsen bieten sich für die in Kapitel 4.1.1 genannten Fallgestaltungen folgende Datengrundlagen an:

- Bodenkundliche Karten (z.B. Bodentyp, Grundwasserstand)
- Rohstoff- und Lagerstättenkarten, Karten von Gangmineralisationen, bergbauliche Erkundungsuntersuchungen
- Geologische Karten (z.B. zur Abgrenzung von Bereichen mit oberflächennahen arsenreichen Substraten oder holozäner Talauen als Belastungsgebiete bergbaulicher und industrieller Boden- und Sedimentbelastungen)
- Flächenhafte Darstellungen der Metallgehalte in Böden, z.B. Bodenbelastungskarten
- Bodenschätzung (z.B. Eisenschüssigkeit)

- Moorkarten
- Historische Karten und Bücher bzgl. des historischen Rohstoffabbaus, z.B. von Raseneisenstein
- Informationen zur (historischen) Arsenbelastung von Oberflächengewässern und oberflächennahen Grundwässern
- Informationen zur Arsenbelastung von Flusssedimenten

Spielen lokalspezifische Arsenquellen (s. Tab. 4-1) eine Rolle, sind weitere Datengrundlagen hinzuzuziehen. In der Stadt Bottrop (Nordrhein-Westfalen) liegt ein Bewertungsschema zur Abgrenzung von Gebieten mit geogen/pedogen erhöhten Arsengehalten aufgrund von Anreicherungen aus dem Grundwasser in Böden vor, das an andere regionale Gegebenheiten angepasst und ergänzt werden kann (z.B. um überschwemmungsbedingte Einträge, s. Anhang 2). Ein regionales Beispiel zur Erfassung von Gebieten mit Arsenbelastungen in Böden ist in Anhang 3 dargestellt.

Zur Ableitung des konkreten Handlungsbedarfs ist eine flächenscharfe Darstellung der Belastungssituation erforderlich. Diese muss den Anforderungen des Vollzugs an die Aussagesicherheit genügen. Bodenkarten erbringen nur dann konkrete Hinweise, wenn die meist kleinflächigen Vorkommen von wasserbeeinflussten und/oder eisenreichen Böden nicht durch Generalisierungen mit anderen Böden zusammengefasst werden. Damit kommen grundsätzlich nur großmaßstäbige Bodenkarten (z.B. 1:5.000) in Betracht für die lokale Erfassung von Verdachtsflächen. Helfen kann eine Befragung der Bodenkartierer nach wasserbeeinflussten, eisenreichen Flächen in Gebieten, die geogen erhöhte Arsengehalte aufweisen (vgl. Geologischer Dienst NRW 2010).

Gebietsbezogene Kartenwerke können z.B. von Seiten der Lebensmittelüberwachung und/oder Futtermittelkontrolle genutzt werden, um gezielte Kontrollen von Ernteprodukten vorzunehmen und das Inverkehrbringen ungeeigneter Chargen zu unterbinden. Beispiele für die Umsetzung sind das Bodenplanungsgebiet Freiberg in Sachsen (Landesdirektion Chemnitz 2011) und das Bodenplanungsgebiet Harz im niedersächsischen Landkreis Goslar (2011).

4.2 Orientierende Untersuchung

Begründen Anhaltspunkte den Verdacht auf das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung durch Arsen, soll die zuständige Bodenschutzbehörde im Sinne von § 9 Abs. 1 BBodSchG eine orientierende Untersuchung durchführen. Ziel der orientierenden Untersuchung ist es, den Gefahrenverdacht anhand von konkreten Anhaltspunkten zu erhärten oder zu verwerfen. Anhaltspunkte für Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen bezüglich des Wirkungspfades Boden – Nutzpflanze im Hinblick auf Arsen sind (nach LfULG Sachsen 2006):

- bekannte schädliche Bodenveränderungen durch Einwirkungen von Arsen an vergleichbaren Standorten;
- Erste Messwerte mit Überschreitungen der Prüf- bzw. Maßnahmenwerte im Boden für die Pflanzen- und Futtermittelqualität nach BBodSchV;
- Überschreitungen der Höchstgehalte der Futtermittelverordnung für Arsen in Futterpflanzen, die kausal auf Bodenbelastungen zurückgeführt werden können;

- erhöhte Arsengehalte in Nahrungspflanzen, die auf Bodenbelastungen zurückgeführt werden können.

Bei der Gefahrenbeurteilung sind die Vorgaben des Anhangs 1 der BBodSchV an die Beprobungsdichte und -tiefen, die Anzahl der Einzelproben für Mischproben, die Abgrenzung von Teilflächen, die Identifizierung von Belastungsschwerpunkten, die Kartierung, die Entnahme von Bodenproben sowie die Untersuchungsverfahren zu beachten. Die Ursachen für Arsenbelastungen in Böden sind insoweit relevant, als gemäß § 4 Abs. 8 BBodSchV bei Böden mit naturbedingt erhöhten Schadstoffgehalten eine schädliche Bodenveränderung nicht allein aufgrund der Gesamtgehalte vorliegt. Entscheidend ist, ob das Arsen durch Einwirkungen auf den Boden in erheblichem Umfang freigesetzt wurde oder wird und ob eine Kontamination des Ernteguts zu besorgen ist, sei es systemisch oder verschmutzungsbedingt. Die konkrete Gefahrensituation ist im Rahmen der weitergehenden Sachverhaltsermittlung zu bestimmen (s. Kap. 4.3).

Die Identifizierung von Belastungsschwerpunkten und Ursachenermittlung sollte anhand von Bodenkarten und einer Kartierung im Feld mit Bodenbeprobung erfolgen. Der Untersuchungsumfang wird wie folgt empfohlen:



Flächenerhebung der maßgeblichen Einflussfaktoren für Arsenanreicherungen:

- Hoher Grundwasserstand, Senken in Auen und Austritte von Hangzugswasser bzw. Geländeform (Makro- und Mikrorelief)
- Organische Anreicherungen anhand von Humusgehalt bzw. organischem Kohlenstoffgehalt sowie Gesamt-Kohlenstoffgehalt
- Eisenanreicherungen anhand von Eisenschüssigkeit, Hydromorphie-Merkmalen oder Eisengehalt
- Geogene und anthropogene Arseneinträge (Quellen, Transportwege und wenn möglich Mengen)
- Bodenart bzw. Korngrößenverteilung

Aus den Bodenkennwerten lassen sich in der Regel noch keine Rückschlüsse über die Arsen-Bindungsformen und die Freisetzbarkeit ableiten. Sie sind jedoch unerlässlich zur Ursachenermittlung und Probencharakterisierung.

Geeignete Indikatoren für Arsenanreicherungen im Boden wie Zeigerpflanzen am Feldrand oder arsenspezifische Pflanzenschäden sind nicht bekannt.



Bestimmung der Arsengesamtgehalte im Boden im Königswasserextrakt gemäß Anhang 1 BBodSchV 1999 (DIN ISO 11466: 06.97)

- Überschreiten die Arsengehalte die Prüfwerte im Hinblick auf die Nahrungs- und Futtermittelqualität (Ackerbau, Nutzgarten) (vgl. Abb. 2-1) ist eine weitere Sachverhaltsermittlung erforderlich.
- Überschreiten die Arsengehalte den Maßnahmenwert im Hinblick auf die Futtermittelqualität (Grünland) (vgl. Abb. 2-1) sind in der Regel Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erforderlich.

**Bestimmung der Arsengehalte im Boden im Ammoniumnitratextrakt (mobile Anteile)** gemäß Anhang 1 BBodSchV 1999 (DIN 19730: 06.97)

- Überschreiten die Arsengehalte den Prüfwert im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen (Ackerbau / Nutzgarten) (vgl. Abb. 2-1) ist eine weitere Sachverhaltsermittlung erforderlich. Für eine sachgerechte Beurteilung bestehen hier besondere Anforderungen an den Probenahmezeitpunkt (s. Kap. 4.4).



Das **Vorhalten von Rückstellproben** ist sinnvoll, um daran ergänzende Analytik zur weiteren Sachverhaltsermittlung in einer Detailuntersuchung vornehmen zu können. Bei der Vorbereitung bzw. Lagerung sind besondere Anforderungen zu berücksichtigen (s. Kap. 4.4).

Um den Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung aufgrund von Arsen durch konkrete Anhaltspunkte zu begründen bzw. diese zu überprüfen, bietet es sich unter Umständen an, erste Pflanzenanalysen und/oder geeignete Analysen zur Arsenfreisetzung aus der Detailuntersuchung (s. Kap. 4.3) in die orientierende Untersuchung vorzuziehen.

Eine modellhafte, überschlägige Abschätzung der Arsenbelastung von Nutzpflanzen, die im Bereich belasteter Flächen angebaut werden, kann mit Hilfe von Regressionsgleichungen zum Arsentransfer Boden – Pflanze vorgenommen werden. Ausgehend von gemessenen Arsengehalten im oberflächennahen Boden ermöglichen sie, die Schadstoffkonzentration in der Pflanze rechnerisch abzuschätzen. Für Arsen in Salat, Kartoffeln, Möhren, Spinat, Weizen und Grünlandaufwuchs sind entsprechende Gleichungen in LUA Brandenburg (2010) angegeben (s. Kap. 7). Bei der Anwendung sind die Belastbarkeit der Regression (Bestimmtheitsmaß) und die eingeschränkte Übertragbarkeit auf andere Pflanzenarten und veränderte Milieubedingungen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Abschätzung können z.B. mit gemessenen Arsengehalten in Pflanzen verglichen werden. Das Ausräumen wie auch das abschließende Bestätigen eines Gefahrenverdachts allein durch eine modellhafte Abschätzung mit den bislang vorliegenden Regressionsgleichungen ist nicht mit hinreichender Sicherheit möglich.

4.3 Vertiefende Sachverhaltsermittlung im Rahmen einer Detailuntersuchung

Die Ursachen für die Arsenbelastung im Boden sind in der Regel aus der orientierenden Untersuchung bekannt. Die Detailuntersuchung zielt darauf ab, belastete Teilflächen räumlich abzugrenzen und dort die Exposition, die Transferwege sowie das Freisetzungspotenzial für Arsen zu ermitteln sowie den Übergang in die Ernteprodukte zu überprüfen. Der Untersuchungsumfang sollte sich nach der Größe der Verdachtsfläche und der eingeschätzten Gefährdung richten und kann ggf. schrittweise erweitert werden. Die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen vertiefenden Spezialuntersuchungen kommen insbesondere in Betracht, wenn einfache Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen wie z.B. das Herausnehmen von Flächen aus der landwirtschaftlichen Nutzung unverhältnismäßig sind, oder komplexe Wirkungszusammenhänge geklärt werden sollen, um nachfolgende Maßnahmen der Gefahrenabwehr ausrichten und begründen zu können.

4.3.1 Validierung, Exposition und Transferwege

Um die Ergebnisse der orientierenden Untersuchung zu validieren, sollten Bereiche mit Prüf- oder Maßnahmenwertüberschreitungen durch ergänzende, flächenrepräsentative Beprobungen untersucht werden. Dabei wird empfohlen,

-  die kleinräumige Variabilität der Voraussetzungen für die Anreicherung und Freisetzung von Arsen, z.B. kleinräumig wechselnde Redoxbedingungen (Ver-nässung) und Sorptionsbedingungen (z.B. Ockerlinsen), im Hinblick auf die Auswirkungen im Erntegut zu berücksichtigen und
-  auf der Basis der Ergebnisse der orientierenden Untersuchung ein in der Fläche und in der Tiefe (Horizonte) angepasstes Beprobungsschema zu wählen.

Für die Beurteilung der Exposition und Transferwege sind folgende Erhebungen innerhalb von belasteten Teilflächen einer Verdachtsfläche sinnvoll – zur Risikobeurteilung wie Ableitung von ggf. erforderlichen Maßnahmen zur Reduzierung des Schadstoffübergangs:

-  Fruchtarten der Ackerflächen und Nutzgärten sowie als Nahrungsmittel vermarktete Pflanzenteile
-  Bewirtschaftungsform und -intensität von Grünlandflächen (Mähwiese ↔ Wei-de), Artenzusammensetzung (Verhältnis von Gräsern zu Kräutern, dominante Kräuter) sowie Viehbesatz
-  Verschmutzungsgrad der Ernteprodukte mit einer der folgenden Methoden:
 - a) Abschätzung nach Konventionen (LUA Brandenburg 2010):
 - Annahme eines bodenbürtigen Verschmutzungsanteils von **3 %**, sofern keine konkreten Anhaltspunkte für einen besonders geringen oder hohen Verschmutzungsgrad vorliegen (analog zur Ableitung der Maßnahmenwerte der BBodSchV), d.h. der Pflanzenkonzentration sind bei der Beurteilung 3 % der im Boden ermittelten Schadstoffkonzentration (Königswasserextraktion) hinzu-zuaddieren
 - Annahme eines bodenbürtigen Verschmutzungsanteils von **1 %** und Addition von 1 % des königswasserextrahierbaren Bodengehaltes zum Pflanzengehalt, sofern aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen ein geringer Verschmutzungsgrad zu erwarten ist, z.B. bei Portionsweiden, dichter Grasnarbe, fehlender Maulwurfsaktivität, geringem Viehbesatz, Einsatz verschmutzungs- armer Erntetechnik
 - Annahme eines bodenbürtigen Verschmutzungsanteils von **6 %** und Addition von 6 % des königswasserextrahierbaren Bodengehaltes zum Pflanzengehalt, sofern aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen ein überdurchschnittlich starker Verschmutzungsgrad zu erwarten ist, z.B. bei Standweiden, zerstörter Grasnarbe, hoher Maulwurfsaktivität, hohem Viehbesatz, verschmutzungsintensiven Ernteverfahren oder Verschmutzung während der Fut- tereinlagerung.

- b) Bestimmen des Verschmutzungsanteils über die Mineralstoffzusammensetzung des Bodenmaterials im Vergleich zum Pflanzenmaterial (K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al), hilfsweise auch über den Rohaschegehalt.
- c) Vergleichende Untersuchung von ungewaschenen und gewaschenen Pflanzenproben

Zu b) und c) ist darauf hinzuweisen, dass die entsprechenden Untersuchungen bei Schnittnutzung im tatsächlichen Erntegut und nicht in separat dafür geschnittenen Aufwuchsproben vorgenommen werden sollten, um den praxisüblichen Verschmutzungspfad mit abbilden zu können. Allerdings ist die Variabilität der Verschmutzungen ausgesprochen hoch, wie praxisrelevante Erhebungen in Oberbayern belegen (Elsäßer et al., 2007), so dass aus Einzeluntersuchungen keine Regelannahmen zur Verschmutzung abgeleitet werden können. Bei Beweidung können darüber hinaus durch die regelmäßig zu beobachtende Mitaufnahme von Bodenmaterial Untersuchungen nach b) und c) zu einer Unterschätzung des Transferpfades führen.

Bei Hinweisen auf Gefährdungen kann es sinnvoll sein, Pflanzenuntersuchungen unter Berücksichtigung der Hinweise aus Kap. 4.3.3 und 4.4 vorzuziehen.

4.3.2 Bodenuntersuchungen

Bei Relevanz des systemischen Transferpfades ist das Freisetzungspotenzial des Arsens im Boden zu beurteilen. Zur Untersuchung von belasteten Teilflächen bieten sich Standard- oder vertiefende Untersuchungen an, über deren Einsatz im Einzelfall je nach Flächengröße, Untersuchungsaufwand und erforderlicher Aussagekraft zu entscheiden ist. Kriterien für die Auswahl von Probenahmestandorten und Entnahmetiefen für die Untersuchung der Arsenfreisetzung sind die zuvor ermittelten Bodeneigenschaften wie Arsen-, Eisen- und Humusgehalt.

Als Standard-Untersuchungen lassen sich folgende Erhebungen definieren:



Erhebung der Dauer und Ausprägung reduzierender Bedingungen während der Vegetationsperiode mittels Abschätzung aus Bodenkarten, Grundwasserständen, Informationen über Hochwässer, häufige Sommerniederschläge oder anhand von Feuchtezeigerpflanzen.

→ Schon nach wenigen Tagen unter Wassersättigung ist unter günstigen Bedingungen für mikrobielle Umsetzungsprozesse eine Arsenfreisetzung aus dem Boden zu erwarten (vgl. Kap. 3.1).

Die Messung des Redoxpotenzials ist aufwändig und nicht als Standard-Untersuchung zu empfehlen. Hier könnte alternativ vor Ort eine Farbansprache der Bodenhorizonte mit Hilfe der Munsell-Farbtafeln erfolgen (s. Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz, 2009), die Hinweise auf langfristige reduktive Bedingungen geben kann.

 **Bestimmung der Arsengesamtgehalte im Boden im Königswasserextrakt**
gemäß Anhang 1 BBodSchV 1999 (DIN ISO 11466: 06.97)

- s. Kap. 4.2
- Werden die zulässigen Höchstgehalte von Arsen in Pflanzen überschritten, obwohl die Arsengehalte im Boden unter den Prüf- und Maßnahmenwerten der BBodSchV liegen, können regionale Empfehlungswerte für einzuhaltende Bodenkonzentrationen festgelegt werden.

 **Bestimmung der Arsengehalte im Boden im Ammoniumnitratextrakt (mobile Anteile)** gemäß Anhang 1 BBodSchV 1999 (DIN 19730: 06.97)

- s. Kap. 4.2.

 **Ermittlung der Tiefenverteilung der Arsengehalte im Boden**

- Liegen die Arsenanreicherungen oberhalb des mittleren Grundwasserstandes, ist nicht mit einer maßgeblichen Freisetzung zu rechnen.

 **Bestimmung der pH-Werte**

- Im Bereich der landwirtschaftlichen Ziel-pH-Werte (vgl. z.B. KTBL 2009) besteht in gut durchlüfteten Böden kein erhöhtes Potenzial für eine Freisetzung von Arsen. Hier ist mit einer Freisetzung des besonders toxischen As(III) erst bei extremer Versauerung, d.h. bei $\text{pH} < 3$, zu rechnen (pH-Bereich ohne Pflanzenwachstum). Auch ab $\text{pH} 7,5$ nehmen mit zunehmend höheren pH-Werten im alkalischen Bereich die Mobilität und die Pflanzenverfügbarkeit von Arsen zu. Böden unter reduzierenden Bedingungen reagieren dabei wesentlich sensibler auf Versauerung; so ist hier bereits bei pH-Werten unter $\text{pH} 6$ mit einer verstärkten Freisetzung von Arsen zu rechnen (vgl. Abb. 3-1).

 **Bestimmung der Stickstoff-Gehalte und der C/N-Verhältnisse**

- Ein enges C/N-Verhältnis (< 20) begünstigt im Zusammenspiel mit Vernässung, dass sich reduzierende Bedingungen einstellen, die zu Arsenfreisetzungen führen können.

 **Bestimmung der Gehalte an organischem Kohlenstoff, Eisen und Mangan**

- Mit der Prüfung des Zusammenhangs der Arsenanreicherung mit den Gehalten an organischem Kohlenstoff, Eisen- und Manganoxiden können die Hauptsorbenten des Arsens und der potenziell unter reduzierenden Bedingungen lösliche Anteil ermittelt werden.
- Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens reduzierender Bedingungen, die zur Arsenfreisetzung führen können, ist bei > 3 Masse-% organischer Substanz erhöht, sofern gleichzeitig geringe Mangan- und Nitratgehalte vorliegen. Eine Bestimmung von Nitratgehalten wird jedoch aufgrund der hohen zeitlichen, bewirtschaftungsbedingten Variabilität nicht empfohlen.

Liegen Hinweise vor, dass der systemische Transferpfad eine Rolle spielt, sind auch die Bedingungen für die Aufnahme in Pflanzen beurteilungsrelevant. Empfohlen wird eine



Ermittlung der Phosphat-Versorgungsstufe des Bodens

- Im Bereich der pflanzenbaulich empfohlenen Phosphat-Versorgung (P-Gehaltsklasse C, Düngeempfehlungen vgl. z.B. KTBL 2009) ist keine maßgebliche Erhöhung der Arsenaufnahme durch Pflanzen zu erwarten. Bei Phosphor-Mangelernährung oder extremer Überversorgung ist jedoch eine erhöhte Arsenaufnahme und Akkumulation in Pflanzen wahrscheinlich.

In größeren Problemgebieten sind vertiefende Bodenuntersuchungen zur Arsenfreisetzung im Boden sinnvoll (Durchführung wie Beurteilung der Ergebnisse erfordern spezifische Kenntnisse):



Bestimmung der gering kristallisierten Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen sowie des daran gebundenen Arsens

(Schwertmann 1964, Wenzel et al. 2001)

- Die Untersuchungen dienen zur Prüfung des Zusammenhangs der Arsenanreicherung mit dem Gehalt an Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen. Damit werden die Hauptsorbenten und die dadurch unterschiedliche Freisetzbarkeit ermittelt. Bestimmt wird die Menge der gering kristallisierten (amorphen) Oxide, Hydroxide und Oxidhydrate, d.h. der im Boden gebildeten pedogenen Verbindungen, die sich unter reduzierenden Bedingungen verhältnismäßig rasch auflösen können. Neben der Bestimmung des Eisens, Mangans und Aluminiums wird auch die Messung der Arsengehalte im entsprechenden Extrakt empfohlen, da ein Vergleich mit den Arsengesamtgehalten im Königswasserextrakt erste Hinweise auf die Festigkeit der Bindung im Boden erlaubt.



Bestimmung der gering und der gut kristallisierten Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen sowie des daran gebundenen Arsens

(Mehra & Jackson 1960, Wenzel et al. 2001)

- Die Untersuchungen dienen zur Prüfung des Zusammenhangs der Arsenanreicherung mit dem Gehalt an Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen. Damit werden die Hauptsorbenten und die dadurch unterschiedliche Freisetzbarkeit ermittelt. Bestimmt wird die Gesamtmenge der gering und der gut kristallisierten Oxide, Hydroxide und Oxidhydrate (amorph und kristallin). Die Differenz von der Gesamtmenge und dem gering kristallisierten Anteil kennzeichnet den Gehalt an gut kristallisierten Eisen-, Mangan- und Aluminiumverbindungen, die sich zumeist auch unter reduzierenden Bedingungen nur sehr langsam auflösen. Der Gehalt an gut kristallisierten Verbindungen liefert gemeinsam mit den zugleich im entsprechenden Extrakt ermittelten Arsengehalten erste Hinweise auf das Ausmaß der Immobilisierung im Boden.



Sequenzielle Extraktion der Arsengehalte im Boden nach Wenzel et al. (2001)

- Die Ergebnisse liefern qualitative Hinweise auf die Bindungsformen des Arsens und ermöglichen die Bewertung des Gefährdungspotenzials in Abhängigkeit von der Freisetzbarkeit verschiedener Fraktionen (s. auch Kap. 4.4).



Bestimmung der Arsengehalte in der Bodenlösung durch Abschätzung im wässrigen Säulen- oder Schüttel-Eluat (DIN 19528: 2009, DIN 19529: 2009) oder – in Kombination mit Forschungsansätzen – durch Messen nach Beprobung mit Saugkerzen

- Ermittelt werden die in der Bodenlösung vorliegenden Anteile des Arsens, d.h. ein Teil des pflanzenverfügbaren Arsens.

4.3.3 Pflanzenuntersuchungen

Die beschriebenen Bodenuntersuchungen zur Freisetzung von Arsen liefern nur potenzielle Hinweise auf den Übergang in die Nutzpflanze. Für eine abschließende Gefahrenbeurteilung – jedoch spätestens als Grundlage für die Festlegung von Maßnahmen – sollten sowohl bei Relevanz des Verschmutzungspfads als auch in wechselfeuchten und staunassen Bereichen zur Klärung einer systemischen Aufnahme repräsentative und regelmäßige Pflanzenuntersuchungen durchgeführt werden:



Ermittlung der Arsengehalte im Futtermittel bzw. in dominanten Gräsern und Kräutern

- Überschreiten die Gehalte die futtermittelrechtlichen Höchstwerte, ist die Futtermittelbehörde zu informieren, die die ggf. erforderlichen weiteren Maßnahmen in eigener Zuständigkeit veranlasst. Gemeinsam mit der Bodenschutzbehörde und betroffenen Landwirten können die Verwertungsmöglichkeiten, z.B. eine energetische Verwertung, geprüft und geeignete Maßnahmen abgestimmt werden. Dabei sollten die Arsengehalte in den anfallenden Rückständen berücksichtigt werden.



Ermittlung der Arsengehalte in verzehrbaren Pflanzenteilen von Nahrungsmitteln

- Zeigen sich erhöhte Gehalte, ist die Lebensmittel- bzw. Verbraucherschutzbehörde einzuschalten, die ggf. erforderlichen weiteren Maßnahmen in eigener Zuständigkeit veranlasst. Gemeinsam mit der Bodenschutzbehörde und betroffenen Landwirten können die Verwertungsmöglichkeiten, z.B. Verfütterung, geprüft und geeignete Maßnahmen abgestimmt werden.



Regelmäßige Vor-Ernte-Untersuchungen

Im Rahmen der Eigenkontrolle kann der Erzeuger durch eine Vor-Ernte-Untersuchung den Arsengehalt in der Gesamtpflanze oder in Pflanzenteilen bestimmen lassen. Damit kommt der Erzeuger seiner Pflicht zur Eigenkontrolle nach dem Lebensmittel- und Futtermittelrecht nach. Liegen Ergebnisse von Vor-Ernte-Untersuchungen vor, sollten sie in der Detailuntersuchung berücksichtigt werden. Zur Nutzung vorliegender Daten und Erkenntnisse bietet sich eine Zusammenarbeit der Bodenschutzbehörde mit der Futtermittelkontrolle an.

- Das Kontrollergebnis liefert einen Anhaltspunkt, ob eine Überschreitung des Höchstgehaltes für Futtermittel vorliegt oder, je nach Einzelfall, erhöhte gesundheitsschädliche Gehalte im Nahrungsmittel vorliegen. Damit kann der Landwirt die Vermarktungsfähigkeit seines Produkts einschätzen.

4.4 Probenahme, Vorbehandlung und Analytik

Kartierungsarbeiten und Probenahmen zur Untersuchung der Freisetzbarkeit des Arsens im Boden (z.B. mobile Anteile durch Ammoniumnitratextraktion) sollten nach Möglichkeit in einem Zeitraum mit potenziell hoher Arsenmobilität durchgeführt werden, d.h. z.B. zu Beginn des Frühjahrs oder nach Überstau bei über mehrere Tage aufgefülltem Bodenwasserspeicher.

Werden Proben aus wassergesättigten (reduzierten) Bodenhorizonten zum Zweck der Bestimmung mobiler Arsen-Anteile durch Ammoniumnitratextraktion entnommen, ist eine Konservierung in feldfrischem Zustand in der Regel nicht erforderlich (Overesch et al. 2008), so dass auf die in Anhang 1 BBodSchV dargelegten Probenahme- und Analysevorschriften verwiesen wird.

Bei Untersuchungen im Rahmen der weitergehenden Sachverhaltsermittlung zum Arsentransfer Boden-Nutzpflanze sind hingegen Besonderheiten zu beachten, die z.T. nicht in standardisierten Verfahren (DIN) abgebildet sind. So kann durch fehlende Probenkonservierung bzw. Probenvorbereitung unter Luftzutritt eine Verfälschung der Ergebnisse bei Speziesuntersuchungen auftreten. Erfahrungen in diesem Zusammenhang zeigen, dass bei Bodenproben auf eine Gefriertrocknung verzichtet werden sollte, weil dabei Bodenpartikel und Eisenoxide zerkleinert werden und die so vergrößerte Oberfläche der Probe die Arsenaustauschbarkeit erhöht (Overesch et al. 2008).

Untersuchungen von sehr eisenreichen Böden von Overesch et al. (2008) haben gezeigt, dass bei der Durchführung einer sequenziellen Extraktion nach Wenzel et al. (2001) bei Gehalten von $> 50 \text{ mg Eisen kg}^{-1} \text{ TM}$ eine mehrfache Oxalateextraktion erforderlich ist, um das gesamte Arsen aus den Eisenoxiden in Lösung zu bringen. Bei organischen Proben bietet sich die Ergänzung um einen Extraktionsschritt mit 0,5 M KOH an, um festzustellen, ob Sulfid-Festphasen bzw. mit hoher Bindungsstärke an die organische Substanz gebundene Anteile bei der Fixierung des Arsens eine Rolle spielen. Dies ist insbesondere an Standorten mit längeren Überflutungsphasen bis zu mehreren Monaten, z.B. in Flutrinnen, relevant (siehe Overesch et al. 2008).

Pflanzenuntersuchungen erlauben zwar einen Blick auf das Schutzgut selbst, sind aber zahlreichen Einflussfaktoren unterworfen und erlauben nur die singuläre Beurteilung der beprobten Charge, des beprobten Aufwuchses bzw. der beprobten Pflanzenteile. Eine grundsätzliche, dauerhafte Aussage zum Schadstofftransfer in Pflanzen kann aus einzelnen Pflanzenuntersuchungen nicht getroffen werden. Bei Pflanzenuntersuchungen sind zudem besondere Anforderungen hinsichtlich der Repräsentativität zu beachten. Weiterführende Informationen über Probenahme, Transport, Dokumentation und Analytik liefern verschiedene Merkblätter (siehe Info-Box). Ein regionales Beispiel für die Durchführung und Bewertung von Pflanzenuntersuchungen im Rahmen einer weiteren Sachverhaltsermittlung ist in Anhang 4 dargestellt.



Arbeitshilfen zur Durchführung von Pflanzenuntersuchungen

- Hinweise zur Durchführung von Pflanzenuntersuchungen in den Handlungsempfehlungen zu Maßnahmen der Gefahrenabwehr bei schädlichen stofflichen Bodenveränderungen in der Landwirtschaft. Anhang 8.5 in Merkblatt 55 des LUA NRW (2006)
<http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen>
- Hinweise zur Vor-Ernte-Beprobung von Getreide in schwermetallbelasteten Gebieten der LfL Sachsen, Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen (2004)
http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/876_1.pdf
- Hinweise zur Probenahme bei wirtschaftseigenem Futter zur Untersuchung auf unerwünschte Stoffe der LfL Sachsen, Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen, Fachbereich Tierische Erzeugung (2008)
http://www.smul.sachsen.de/bful/download//Probenahme_bei_wirtschaftseigenem_Futter.pdf
- Empfehlungen zur Durchführung der Probenahme bei Grundfuttermitteln vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), unveröffentlichter Entwurf (2009)

5 EMPFEHLUNGEN ZUR GEFAHRENABWEHR

Zur Entscheidung, ob Maßnahmen im Hinblick auf das Bodenschutzrecht erforderlich sind, werden zunächst die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze herangezogen. Bei Überschreitung der Maßnahmenwerte sind in der Regel Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu ergreifen, während bei Überschreitung der Prüfwerte zunächst der Bedarf besteht, den Gefahrenverdacht durch weitere Sachverhaltsermittlungen zu belegen oder zu verwerfen (vgl. Kap. 4).

Hat sich der Gefahrenverdacht bestätigt, sind die möglichen Maßnahmen nach § 4 Abs. 3 BBodSchG hinsichtlich Erforderlichkeit, Eignung und Angemessenheit zu prüfen. Gegenstand dieser Arbeitshilfe sind großflächig mit Arsen belastete, landwirtschaftlich genutzte Flächen - und bei der vorgenannten Prüfung treten Sanierungsmaßnahmen, d.h. Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen im Unterschied zu kleinräumigen Belastungen, wie sie im Altlastenbereich auftreten, zumeist in den Hintergrund. Entsprechend räumt § 5 Abs. 5 S. 1 BBodSchV auf belasteten landwirtschaftlich genutzten Flächen den Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen einen Vorzug ein.

Die frühzeitige Einbeziehung der betroffenen Landwirte und der landwirtschaftlichen Fachbehörden erleichtert das Herstellen des nach § 5 Abs. 5 S. 3 BBodSchV erforderlichen Einverständnisses und die Einigung über Art und Umfang der in § 5 Abs. 5 S. 2 verankerten Aufzeichnungspflicht.

Ist eine Gefahrenabwehr mit einfachen Mitteln möglich, können diese Maßnahmen im Sinne von § 3 Abs. 5 S. 2 BBodSchV bereits direkt nach einer orientierenden Untersuchung unter Verzicht auf eine Detailuntersuchung ergriffen werden. Erscheinen diese Maßnahmen hinreichend wirksam, ist dieses Vorgehen auch deshalb empfehlenswert, weil damit in der Regel eine erhebliche Ersparnis an Zeit, Mitteln und Aufwand und eine rasche Umsetzung in der Praxis einhergeht. I

Im Rahmen der Gefahrenabwehr aufgrund großflächiger Arsenbelastung von Böden mit Nahrungs- und Futtermittelanbau kommen in der Regel folgende Maßnahmen in Betracht:

1. Information
2. Abgrenzung von Belastungsgebieten und Anwendung gebietsbezogener Regelungen
3. Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen
4. Überwachung.

Kontrollen, wie z.B. regelmäßige Ernteuntersuchungen, dienen der Absicherung der Wirksamkeit der ergriffenen Maßnahmen mit Blick auf die Gefahrenabwehr. Hinweise hierzu finden sich in Kap. 5.4.

5.1 Information

Empfohlen wird die Information der wahrscheinlich betroffenen **Landwirte, Lebensmittel- und Futtermittelunternehmer** sowie die Klarstellung ihrer aktiven Mitteilungspflichten und Verantwortlichkeiten in Form persönlicher Ansprache über die Landwirtschaftskammer/Landwirtschaftsbehörde und/oder eines Merkblatts. Eine Musterempfehlung liegt in Anhang 1 vor. Bereits ein fahrlässiger Verstoß gegen die Bestimmungen des Lebensmittelrechts stellt eine Straftat dar. Hinsichtlich des Futtermittelrechts kann darauf hingewiesen werden, dass derjenige ordnungswidrig handelt, der fahrlässig oder vorsätzlich gegen die Vorschriften verstößt.

Darüber hinaus sollten **alle betroffenen Behörden** informiert werden. Ist ein größeres Gebiet von Bodenbelastungen betroffen, ist eine intensive Zusammenarbeit zwischen Bodenschutz- und Altlastenbehörde mit den Stellen der Gesundheitsverwaltung, der Abfallrechtsbehörde, der Futtermittelrechtsbehörde, Landwirtschafts-, Lebensmittelrechts- sowie Baurechtsbehörde empfehlenswert.

Nicht zuletzt sind die **betroffenen Gemeinden und Bürger** zu informieren (§ 10 Umweltinformationsgesetz). Die Einbindung und Mitwirkung der Gemeinden sowie die Information ihrer Bürger ist von besonderer Bedeutung. Möglichkeiten bieten Informationsveranstaltungen durch Behördenvertreter, Informationen über die lokale Presse und Merkblätter.

5.2 Abgrenzung von Belastungsgebieten und Anwendung gebietsbezogener Regelungen

Ist eine flächenscharfe Abgrenzung der betroffenen Gebiete nicht bereits in der Detailuntersuchung erfolgt, kann als eine wichtige Maßnahme zum Umgang mit den erhöhten Belastungen die flächen- bzw. parzellenscharfe Abgrenzung der Belastungsgebiete erfolgen. Dies ist eine Voraussetzung für die Anwendung gebiets- oder parzellenbezogener Regelungen. Hilfestellungen zum Vorgehen bei der flächenscharfen Abgrenzung der Belastungsgebiete finden sich in Arbeitshilfen wie z.B. LfULG (2006), LUBW (2011). Die möglichen gebietsbezogenen Regelungen sind im Folgenden unter den Schutz- und Beschränkungs- sowie den Überwachungsmaßnahmen beschrieben.

5.3 Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen

Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen sollen Gefahren, erhebliche Nachteile oder sonstige erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit verhindern oder vermindern. In Frage kommen insbesondere Anpassungen der Nutzung sowie der Bewirtschaftung und ggf. Veränderungen der Bodenbeschaffenheit. Bei der Anordnung von Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen muss gemäß § 5 Abs. 5 BBodSchV ein Einvernehmen mit der zuständigen landwirtschaftlichen Fachbehörde (z.B. Kammer) herbeigeführt werden. Eine frühzeitige behördenübergreifende Abstimmung hinsichtlich der Gefährdung und geeigneter Maßnahmen ist sinnvoll. Neben einer ordnungsrechtlichen Anordnung können auch andere Instrumente zur Umsetzung der Maßnahmen eingesetzt werden, z.B. eine Verpflichtungserklärung oder ein öffentlich-rechtlicher Ver-

trag. Zudem sind gem. § 5 Abs. 5 BBodSchV in diesen Fällen Aufzeichnungen über die getroffenen Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zu führen.

Die Auswahl der Maßnahmen orientiert sich daran, welche(r) Transferpfad(e) (Verschmutzungspfad, Systemischer Pfad) auf der Verdachtsfläche von Bedeutung ist (sind). Sind beide Pfade relevant oder können nicht ausgeschlossen werden, sind integrative Maßnahmen zur Gefahrenabwehr notwendig. Dabei ist jeweils die effizienteste Maßnahmenkombination zu wählen. Ggf. reicht es, Maßnahmen zur Minimierung des Verschmutzungspfades umzusetzen und eine mögliche systemische Aufnahme durch Pflanzenuntersuchungen zu überwachen.

Landwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen im Sinne von Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen dienen dazu, den Transfer von Arsen aus dem Boden in oder auf die Pflanze zu minimieren. Die Möglichkeiten reichen von einer angepassten Anbaustrategie, einem angepasstem Grünlandmanagement bis zu einer Flächenumwidmung. Erfolge können damit insbesondere bei mäßig belasteten Böden erzielt werden (Kardel et al. 2011). Mit unterschiedlichen Strategien im Bereich der Anbauverfahren und der Sortenwahl, insbesondere bei Getreidepflanzen bzw. der Bewuchszusammensetzung von Grünland, kann der Arsengehalt unter den Grenzwert für Futtermittel gesenkt werden.

Auch die Überwachung der Arsengehalte im Ernteprodukt durch den Landwirt und die sich daran anknüpfende Vermarktung stellt die Einhaltung der Höchstgehalte sicher und kann eine Schutzmaßnahme darstellen. Die Gefahrenabwehr sollte immer durch die zuständige Behörde der Futtermittel- und Lebensmittelüberwachung begleitet werden. Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwieweit Schutzziele des Natur- und Gewässerschutzes im Einklang mit den bodenschutzrechtlichen Zielen der Gefahrenabwehr stehen. Im Boden angereichertes Arsen kann z.B. bei Wiedervernässung verstärkt freigesetzt werden. Eine frühzeitige Abstimmung von Maßnahmen hilft, Konflikte zu vermeiden.

Die Abbildung 5-1 zeigt mögliche Maßnahmen für Grünland und Ackerbau im Überblick. Nachfolgend sind landwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen, die sich zur Abwehr von Gefahren durch Bodenbelastung mit Arsen eignen, abhängig von der Landnutzung und den maßgeblichen Transferpfaden ausführlich dargestellt.



Für weiterführende Informationen, auch für Feldfutter- und Gemüseanbau, wird auf das LABO-Konzept zur verschmutzungsarmen Nutzpflanzenernte von Elsässer et al. (2007) verwiesen:
www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen.html

Alle landwirtschaftlich genutzten Flächen		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verminderung der Verschmutzung durch anhaftenden Boden ▪ Düngemittelwahl ▪ am Mobilisierungspotential des Arsen orientierte Düngung und Kalkung ▪ Fördern der Bodendurchlüftung bei nassen Böden ▪ Verzicht auf (Tiefen-)Umbruch bei arsenbelasteten Schichten in Unterboden/-grund ▪ Flächenumwidmung 		
Grünland	Ackerbau, Erwerbsgartenbau	Nutzgärten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz verschmutzungsarmer Erntetechnik ▪ Änderung der Bewuchszusammensetzung ▪ Untersuchung von Aufwuchs/Ernteprodukten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arten- und Sortenwahl ▪ Einsatz verschmutzungsarmer Anbauverfahren ▪ (Vor-) Ernte-Untersuchung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anbau-, Verhaltens- und Verzehrsempfehlungen

Abbildung 5-1: Anpassungs- und Überwachungsmaßnahmen bei Arsen-Belastungen

**Maßnahmen für alle landwirtschaftlich genutzten Flächen
unabhängig vom maßgeblichen Transferpfad**

Auswahl von Düngemitteln mit geringem Arsengehalt, um eine Arsenzufuhr über die zugeführten Materialien zu minimieren.

Dies gilt insbesondere für P-Dünger und Sekundärrohstoffdünger.



Weitgehender Verzicht auf Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft.

Der hohe Anteil leicht verfügbarer organischer Substanz führt zu einer Sorptionskonkurrenz mit Arsen auf den Mineraloberflächen und begünstigt Reduktionsprozesse. Im Boden gebundenes Arsen kann dadurch verstärkt freigesetzt werden.



Verzicht auf Grünlandumbruch und Verzicht auf tieferen Umbruch (Rigolen), um zu vermeiden, dass arsenbelastete Schichten aus dem Unterboden oder Untergrund in den oberflächennahen, für die Pflanzenaufnahme bewertungsrelevanten Bereich eingebracht werden.



Wechsel zum Anbau von Biomasse zur Verwertung außerhalb des Lebens- und Futtermittelsektors, insbesondere zur Energiegewinnung.



Flächenumwidmung, d.h. Naturschutz, Ausgrenzen aus der landwirtschaftlichen Erzeugung oder Umwidmung der Acker- oder Grünlandfläche (z.B. Aufforstung), wenn andere Maßnahmen nicht zur Einhaltung der gesetzlichen Höchstgehalte für landwirtschaftliche Produkte führen.

**Maßnahmen für Grünland (Wiesennutzung)
bei maßgeblichem Anteil des Verschmutzungspfads**

Anwendung geeigneter Bewirtschaftungstechniken mit sehr geringer Pflanzenverschmutzung wie z.B. (vgl. Elsäßer et al. 2007):



Erhalt bzw. Herstellung einer dichten Grünlandnarbe, z.B. durch Befahren nur bei ausreichender Tragfähigkeit, Anpassung der Bereifung und des Reifendrucks, höherer Schnitt bzw. Vermeidung lückenhafter Pflanzenbestände



Anpassung der Fahrgeschwindigkeit, um Staubentwicklung zu minimieren



Maßnahmen gegen Mäuse und Maulwürfe (direkte Bekämpfung der Maulwürfe nicht gestattet wegen Naturschutzrecht)

-  **Erhöhung der Schnitthöhe** beim Mähen über 8 cm; im Herbst Pflegeschnitt (Nachmahd)
-  **Keine Mahd** bei aufgeweichten Böden
-  **Optimieren des Schnittzeitpunkts** (nur bei trockener Witterung)
-  **Heunutzung statt Silagegewinnung** wegen des höheren Verschmutzungsgrades von Silage
-  **Heu- und Silagegewinnung nur von dichten und hohen Aufwüchsen und nur bei trockenem Wetter**

Maßnahmen für Grünland (**Weidenutzung**) bei maßgeblichem Anteil des Verschmutzungspfads

Anwendung geeigneter Bewirtschaftungsformen zur Minimierung von Bodenmaterialaufnahme wie z.B. (vgl. Elsäßer et al. 2007):

-  **Regulierung der Bestandsdichten und der Beweidungszeiten** zum Erhalt einer optimal dichten Grasnabe und zur Vermeidung von Kahlstellen
-  **Verzicht auf Weidegang bei vernässten Böden**, z.B. im Winterhalbjahr und nach Starkregen, um Kahlstellen und erhöhte Verschmutzung von Gras durch aufspritzendes und anhaftendes Bodenmaterial bzw. die Aufnahme durch Weidetiere zu vermeiden
-  **Schnittnutzung statt Weidehaltung** zur Vermeidung der direkten Aufnahme von Bodenmaterial und des möglichen Übergangs in Nahrungsmittel

Maßnahmen für Nutzgärten bei maßgeblichem Anteil des Verschmutzungspfads

Empfehlungen an Erzeuger, Verbraucher und Gartenbewirtschafter
(vgl. Elsässer et al. 2007):



Gründliches Waschen – insbesondere von Wurzelgemüse – vor dem Verzehr und **Entfernen der äußeren Blätter** bei Salatpflanzen, um die Aufnahme von anhaftendem Bodenmaterial zu vermeiden



Auslegen von Stroh-, Vlies- oder Folienunterlagen beim Anbau besonders bodenbehafteter Pflanzen, wie Salat oder Erdbeeren, um eine Verschmutzung von verzehrbaren Pflanzenteilen durch aufspritzendes Bodenmaterial zu verhindern



Verzicht auf den Anbau besonders bodenbehafteter Pflanzen, z.B. Salat, Erdbeeren

Maßnahmen für alle landwirtschaftlich genutzten Flächen bei maßgeblichem Anteil des systemischen Pfads



Einhalten der landwirtschaftlichen Ziel-pH-Werte und Vermeidung hoher Kalkgaben

Hohe Kalkgaben können zu einer erhöhten Arsenmobilisierung und -aufnahme in Pflanzen führen. Bei Arsen ist der Einfluss des pH-Wertes auf die Mobilität nicht immer deutlich und die Wirkung einer pH-Wert-Erhöhung auf die Freisetzung aus dem Boden ist deutlich geringer einzustufen als z.B. bei Cadmium und Zink. Dieser Hinweis kommt insbesondere dann zum Tragen, wenn der Boden mit weiteren Metallen wie z.B. Cadmium belastet ist, für die zunächst Kalkungsmaßnahmen sinnvoll erscheinen. Fachliche Hinweise und Kalkungsempfehlungen finden sich z.B. in aid Infodienst (2009) und KTBL (2009).



Unterstützung einer guten Bodendurchlüftung zur Vermeidung von Staunässe bzw. Erhöhung des Redoxpotenzials insbesondere in Bodenhorizonten, in denen sich Arsenanreicherungen befinden, z.B. durch:

- Vermeidung von Bodenverdichtungen; bei Nässe möglichst nicht Befahren
- Beseitigung von Verdichtungshorizonten z.B. durch Anbau von tiefwurzelnden Zwischenfrüchten wie z.B. Gelbsenf
- Lockernde Bodenbearbeitung

Maßnahmen für Grünland bei maßgeblichem Anteil des systemischen Pfads



Meiden älterer bodennaher Pflanzenteile im Futter, da bodennahe ältere Blätter besonders hohe Arsengehalte aufweisen können, z.B. das 25-fache im Vergleich zum reifen Korn (LfULG Sachsen 2008).



Reduzieren des Kräuteranteils im Grünlandbestand, wenn in der Detailuntersuchung der Futtermittelhöchstgehalt in dominanten Kräutern überschritten wird.

Durch eine Änderung der Grünlandzusammensetzung mittels Nachsaat entsprechender Gräser und/oder Grünlandpflegemaßnahmen (angepasste N-Düngung, Schnitthäufigkeit) kann der Arsengehalt des Grünfutters insbesondere auf kräuterreichen Flächen verringert werden. Kräuter reichern im Mittel dreimal so viel Arsen an wie Gräser (LfL Sachsen 2006a).

Maßnahmen für Acker und Erwerbsgartenbau bei maßgeblichem Anteil des systemischen Pfads



Auswahl von Sorten, die wenig Arsen aufnehmen und anreichern

Bei der Artenwahl (z.B. Weizen, Gerste) ist der Landwirt häufig nicht frei in seiner Entscheidung. Leichter möglich ist die Wahl einer bestimmten Sorte. Mit einer gezielten Sortenwahl kann die Aufnahme von Arsen aus dem Boden vermindert werden. Es sollten jeweils aktuelle Sortenempfehlungen bei den Landwirtschaftsbehörden angefragt werden. Hinweise für geeignete Sommergerste- und Weizensorten finden sich in LfULG Sachsen (2008). Ergebnisse weiterer Untersuchungen von Arsen in Getreidesorten auf sächsischen Testflächen werden 2012 erwartet.



Einhalten der pflanzenbaulich empfohlenen Phosphat-Versorgung, Vermeidung von P-Mangel und hohen P-Gaben

Sowohl bei Phosphor-Mangelernährung als auch bei einer Überversorgung ist eine erhöhte Arsenaufnahme und Akkumulation in Pflanzen wahrscheinlich. Bei Unterversorgung und pflanzenverfügbarem Arsen im Boden ist ein Transfer zu erwarten, da Phosphor und Arsen bei der Aufnahme durch die Wurzel konkurrieren. Bei Überversorgung kann das zugeführte Phosphat im Boden das Arsen von seinen Bindungsplätzen verdrängen und damit verfügbar machen.



Einhalten der pflanzenbaulich empfohlenen Stickstoff-Versorgung

Im Bereich der landwirtschaftlichen Düngeempfehlungen ist keine gesteigerte Arsenaufnahme durch Pflanzen zu erwarten. Es werden Dünger mit relevantem Nitratanteil empfohlen. Von reiner Harnstoffdüngung wird abgeraten (vgl. Kaufmann-Boll et al. 2012).

5.4 Überwachung

Zur Klärung der Frage, ob bei erhöhten Arsengehalten im Boden eine landwirtschaftliche Nutzung gewährleistet werden kann, sind Überwachungsmaßnahmen sinnvoll; insbesondere wenn der Gefahrenverdacht im Einzelfall nicht geprüft werden kann oder Unsicherheiten bei der Beurteilung bestehen. Auch für Flächen mit einer hohen Ertragsfähigkeit, wie z.B. Auenböden, stellt sich die Frage nach der wirtschaftlichen Zumutbarkeit, wenn die Nutzung deutlich extensiviert oder die Flächen aus der Nutzung genommen werden sollen. Wenn eine Umwidmung von Flächen zur Bioenergiegewinnung nicht in Frage kommt oder der Arsentransfer nicht hinreichend sicher durch angepasste Bewirtschaftung ausgeschlossen werden kann, sollte die Qualität der Futtermittel und Ernteprodukte dauerhaft anhand von repräsentativen Proben (BVL 2009) überwacht werden.

Diese regelmäßige Überwachung der erzeugten Futter- und Nahrungsmittel durch den Bewirtschafter dient zugleich der Absicherung der rechtlichen Pflicht zur Einhaltung der Höchstgehalte in den Ernteprodukten (vgl. Kap. 2.2). Zur Beurteilung der generellen Eignung belasteter Teilflächen für eine schadstoffarme Pflanzenproduktion ist daher zu empfehlen, gemeinsam mit der zuständigen Bodenschutzbehörde und der Lebensmittelbehörde (z.B. bei Belastung mit weiteren Metallen wie z.B. Cadmium) bzw. Futtermittelbehörde ein geeignetes Beprobungsprogramm abzustimmen (s. Hinweise in Kapitel 2.2). Die in Kap. 4.4 dargestellten Anforderungen an die Probenahme und Untersuchung sind dabei zu beachten.

Die in einigen Bundesländern von Landwirten, die belastete Flächen bewirtschaften, regelmäßig durchgeführten (Vor-) Ernte-Untersuchungen (z.B. im sächsischen Bodenplanungsgebiet Freiberg) ergänzen die Kontrolltätigkeit der Lebens- und Futtermittelüberwachung und tragen zur Sicherung der Qualität von Getreide und zum besseren Verbraucherschutz bei (Kardel et al. 2011). Bereits vor dem Ernte- bzw. Mahdtermin kann festgestellt werden, welche Vermarktungsmöglichkeiten für die Produkte bestehen. In Abhängigkeit vom Ergebnis einer langjährigen Überwachung kann ggf. auch über eine Entlassung von (Teil-) Flächen aus dem Gefahrenverdacht entschieden werden oder – bei Bestätigung der Arsenbelastung in den Pflanzen – eine Anpassung der Bewirtschaftung oder Nutzungsumwidmung in Betracht gezogen werden.

5.5 Nicht geeignete Maßnahmen

Die Umwandlung von Acker in Grünland ist im Hinblick auf den Transfer von Arsen aus dem Boden in Nutzpflanzen nicht zur Gefahrenabwehr geeignet. Liegen Überschreitungen der Prüfwerte für Arsengesamtgehalte im Boden nach BBodSchV für die Nutzungen Ackerbau, Nutzgarten vor, ist davon auszugehen, dass auch der Maßnahmenwert für Grünland überschritten wird und Maßnahmen erforderlich sind. Die Situation verbessert sich somit nicht.

Arsenbelastungen aufgrund arsenreicher Ausgangsgesteine, belasteter Auenböden oder in Niederungen durch Anreicherungen aus dem Grundwasser liegen in der Regel flächenhaft vor. Daher kommen Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen bei einer Abwägung der Verhältnismäßigkeit in der Regel nicht in Betracht. Die Gebiete sind entweder zu groß oder würden sich im Fall der Niederungsböden erneut mit dem im Grundwasser herangeführten Arsen anreichern.

Nach derzeitigem Stand der Kenntnis können Bodenzusätze nicht als allgemein wirksames Mittel bei Belastung mit Arsen empfohlen werden. Eine Verminderung der Mobilität des bodengebundenen Arsens durch Zugabe von eisenhaltigen Materialien als Sorbenten käme zwar aufgrund der engen Bindung von Arsen an Eisenoxide in Betracht, hat bislang aber nicht immer zur gesicherten Verringerung der Pflanzenaufnahme geführt (Marschner et al. 2010). Als Ursachen werden unterschiedliche Bindungsmechanismen im Boden, selektive elementspezifische Aufnahme durch Pflanzen, aber auch die Zufuhr bestimmter Schadstoffe mit den Sorbenten diskutiert (MUNLV, AAV & LUA NRW 2003). Zudem ist gerade bei zeitweise reduzierenden Bedingungen im Boden die Auflösung zugeführter Eisenoxide zu bedenken. Nach Zugaben von Aluminium, Zink, Schwefel, Kalk und organischen Materialien zeigten sich unterschiedliche Ergebnisse (Alloway 1999).

Sanierungsmaßnahmen der Phytoextraktion können für landwirtschaftlich genutzte Standorte nicht empfohlen werden, da eine maßgebliche Reduzierung der Arsengehalte im Boden erst nach langen Zeiträumen (>> 100 Jahre) zu erwarten ist.

Als Ergebnis von Untersuchungen eines breiten Spektrums an Grünlandpflanzenarten ist der Verzicht auf das Silieren von Grünschnitt mit dem Ziel, besonders toxische Arsenpezies in der Pflanze zu verringern, nicht sinnvoll (LfL Sachsen 2006a).

6 LITERATUR

- aid Infodienst (2009): Kalkung zur Qualitätssicherung. Flyer von Fachgruppe „Bodenversauerung in der Landwirtschaft des Bundesverbandes Boden und VDLUFA-Fachgruppe „Pflanzenernährung, Produktqualität und Ressourcenschutz“. 0322/2009.
http://www.aid.de/shop/pdf/0322_2009_kalkung_flyer.pdf
- Alloway, B. J. (Hrsg.) (1999): Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. Springer, Berlin.
- Banning, A.; Coldewey, W.G. & Göbel, P. (2009): A procedure to identify natural arsenic resources, applied in an affected area in North Rhine-Westfalia, Germany. *Environmental Geology* 57: 775-787.
- DIN 19528 (2009): Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen.
- DIN 19529 (2009): Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg.
- DIN 19730 (1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung.
- DIN ISO 11466 (1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente (ISO 11466: 1995).
- Ebert, T. (2005): Untersuchungen über die Arsenaufnahme von Grünlandpflanzen auf belasteten Böden im Erdinger Moos. Diplomarbeit an der Universität Koblenz-Landau.
- Elsäßer, M.; Feldwisch, N.; Nußbaum, H.; Ehrmann, O. (2007): Maßnahmenkonzept zur verschmutzungsarmen Nutzpflanzenernte. Im Auftrag der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Projektnummer B 4.03 im Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden, Abfall.
www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen.html
- Fritzsche, A., H. Dienemann and E. G. Dudel (2006): Arsenic fixation on iron-hydroxide-rich and plant litter-containing sediments in natural environments. *Environmental Geology* 51(1): 133-142.
- Geologischer Dienst NRW (2010). Bodenkundliche Untersuchung, Probenahme und Analytik von Flächen mit prognostizierter Arsenanreicherung. Dezember 2010.
- IFUA (2008): Arsen in Böden im Südwesten des Kreises Borken – Weitere Sachverhaltsermittlungen; Projektbericht; IFUA-Projekt-GmbH, 05/2008, Gutachten im Auftrag des Kreises Borken.
- ISB (2010): Ausweisung von Gebieten mit erhöhten Arsengehalten in Böden der Stadt Bottrop. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der Stadt Bottrop.
- Kardel, K.; Rank, G.; Klose, R.; Müller, I. & Schürer, S. (2011): Umgang mit Arsen- und Schwermetallbelastungen in den Auenböden des Freistaates Sachsen. *Bodenschutz* 1/11.

- Kaufmann-Boll, C.; Höke, S.; Brackhage, C. & Dudel, E. G. (2012): Abschlussbericht zum Vorhaben B 1.10 Arsentransfer aus belasteten Böden in Nahrungs- und Futterpflanzen des Länderfinanzierungsprogramms Wasser, Boden, Abfall, Teil Boden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).
- KTBL (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. – Darmstadt. 14. Auflage
- LABO Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (1998): Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad des 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.
- Landesdirektion Chemnitz (2011): Verordnung der Landesdirektion Chemnitz zur Festlegung des Bodenplanungsgebietes „Raum Freiberg“ vom 10. Mai 2011. Sächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt Nr. 6 vom 14. Juli 2011. http://www ldc.sachsen.de/download/Download_6/GVBI_14072011_VO_BPG_FG.pdf
- Landkreis Goslar (2011): Verordnung des „Bodenplanungsgebietes Harz im Landkreis Goslar“ (BPG-VO). Neufassung vom 31. März 2011. http://www.landkreis-goslar.de/media/custom/1749_769_1.PDF?1301559005
- LfL Bayern (2005): Jahresbericht 2004. März 2005. http://www.lfl.bayern.de/publikationen/iab/jahresbericht/11683/linkurl_0_0.pdf
- LfL Sachsen (2006a): Arsentransfer Boden – Pflanze – Untersuchungen zum Arsentransfer Boden – Pflanze auf Grünlandstandorten. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 14/2006. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-1162991515997-65633>
- LfULG Sachsen (2008): Arsentransfer Boden-Pflanze – Entwicklung von Maßnahmen zur Verhinderung des Arsentransfers im System Boden-Pflanze. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 32: 1-37. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1229936128313-35174>
- LUA NRW (2006): Handlungsempfehlungen zu Maßnahmen der Gefahrenabwehr bei schädlichen stofflichen Bodenveränderungen in der Landwirtschaft. Merkblatt 55. <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/merkbl/merk55/merk55.pdf>
- Mansfeldt, T.; Schuth, S.; Häusler, W.; Wagner, F.E.; Kaufhold, S. & Overesch, M. (2012): Iron oxide mineralogy and stable iron isotope composition in a Gleysol with petrogleyic properties. J. Soil Sediments 12: 97–114.
- Marschner, B.; Müller, I.; Haag, R.; Stolz, R.; Stempelmann, I (2010): Maßnahmen zur Gefahrenabwehr bei großflächigen schädlichen Bodenveränderungen (SBV) insbesondere unter gärtnerischer Nutzung; Forschungsvorhaben (10/2003 – 12/2008) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV): http://www.lanuv.nrw.de/boden/bodenschutz/Abschlussbericht%20MUNLV_07_09_2010.pdf
- Mehra, O.P. & Jackson, M.L. (1960): Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Minerals 7: 317-327.
- MUNLV, AAV & LUA NRW (2003): Fachgespräch „Maßnahmen bei großflächigen schädlichen Bodenveränderungen – Wirkungspfad Boden – Pflanze und Direktpfad Boden – Mensch – am 30. September und 1. Oktober 2003 beim BEW Essen. Dokumentation.

- Overesch, M.; Rinklebe, J.; Broll, G.; Neue, H.-U. (2007): Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany). *Environ. Pollut.* 145: 800-812.
- Overesch, M.; Düster, L.; Greef, K.; Rinklebe, J. & Mansfeldt, T. (2008): Ermittlung und Beurteilung des Mobilisierungspotenzials von Arsen in Böden. Abschlussbericht des Projekts B 4.07 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“. Dezember 2008. http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LA_BO/B_4.07/Abschlussbericht_Projekt_B_4_07.pdf
- Rabenhorst, M.C. (2005): Biologic zero: a soil temperature concept. *Wetlands* 25: 616–621.
- Rank, G.; Kardel, K.; Weidensdörfer, C. (2000): Die Schwermetallgehalte der Böden im Raum Ehrenfriedersdorf – Geyer für die Bewertung der Gefährdungspfade Boden – Mensch, Boden – Nutzpflanze und Boden – Sickerwasser nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV); Sachstandsbericht des Landesamtes für Umwelt und Geologie, Freiberg; http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/ehf_beri.pdf
- Schwertmann, U. (1964): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 105: 194-202.
- Utermann, J.; Fuchs, M; Düwel, O. (2008): Flächenhafte Hintergrundwerte für Arsen, Antimon, Beryllium, Molybdän, Kobalt, Selen, Thallium, Uran und Vanadium in Böden Deutschlands aus länderübergreifender Sicht. BGR-Bericht Archiv-Nr.: 0127492.
- Wendland, A.; Rank, G. & Barth, A. (1999): Verteilung des Arsens in den Rotliegendesedimenten Sachsens. In: Rosenberg, F.; Röhling, H.G. (Hrsg.): Arsen in der Geosphäre. Bd. 6. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, S. 93-100.
- Wenzel, W.; Kirchbaumer, N.; Prohaska, T.; Stingeder, G.; Lombi, E.; Adriano, D.C. (2001): Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta* 436, S. 309-323.

7 ARBEITSHILFEN WIRKUNGSPFAD BODEN – NUTZPFLANZE

BVL – Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2009): Empfehlungen zur Durchführung der Probenahme bei Grundfuttermitteln. Entwurf vom 15.04.2009. BVL 102-3252-2.

Elsäßer, M.; Feldwisch, N.; Nußbaum, H.; Ehrmann, O. (2007): Maßnahmenkonzept zur verschmutzungsarmen Nutzpflanzenernte. Im Auftrag der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Projektnummer B 4.03 im Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden, Abfall.
www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen.html

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2007): Anbauempfehlungen für schwermetallbelastete Böden zur Gewährleistung der Lebensmittel- und Futtermittelqualität. Merkblatt. Oldenburg. 15.06.2007.

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2008): Hinweis zur verschmutzungsarmen Grünfuternte und zum Grünlandmanagement im Oberharz. Merkblatt. Oldenburg, Januar 2008.

LfL Bayern (2010): Arbeitshilfe zur Untersuchung und Bewertung des Pfades Boden – Nutzpflanze bei schädlichen Bodenveränderungen/Altlasten auf landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzten Flächen (unveröffentlichter Entwurf).

LfL Sachsen (2006b): Hinweise und Empfehlungen zum Umgang mit arsen- und schwermetallbelasteten landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden – Schwermetalle und Arsen. <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/2302.htm>

LfL Sachsen, Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen (2004): Hinweise zur Vor-Ernte-Beprobung von Getreide in schwermetallbelasteten Gebieten der Stand: Mai 2004 http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/876_1.pdf

LfL Sachsen, Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen, Fachbereich Tierische Erzeugung (2008): Hinweise zur Probenahme bei wirtschaftseigenem Futter zur Untersuchung auf unerwünschte Stoffe Stand: Mai 2008. [http://www.smul.sachsen.de/bful/download/Probenahme bei wirtschaftseigenem Futter.pdf](http://www.smul.sachsen.de/bful/download/Probenahme_bei_wirtschaftseigenem_Futter.pdf)

LfULG Sachsen (2006): Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des Bodenschutzrechtes in Gebieten mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten; Materialien Bodenschutz, LfUG Dresden http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Handlungsempfehlung_Stand_05_2006.pdf

LUA Brandenburg (2003): Untersuchung und Bewertung von altlastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen - Wirkungspfad Boden – Pflanze – Tier. Fachbeiträge des Landesumweltamtes
<http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2320.de/luabd81.pdf>

LUA Brandenburg (2010): Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden – Nutzpflanze. Materialien zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg 4.1.
http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2334.de/luabd4_1.pdf

LUA NRW (2006): Handlungsempfehlungen zu Maßnahmen der Gefahrenabwehr bei schädlichen stofflichen Bodenveränderungen in der Landwirtschaft. Merkblatt 55.
<http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/merkbl/merk55/merk55.pdf>

LUBW Baden-Württemberg (2001): Arbeitshilfe zur Bearbeitung von Verdachtsflächen/altlastverdächtigen Flächen und schädlichen Bodenveränderungen/Altlasten nach BBodSchG. Reihe Bodenschutz 6. http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/17002/arbeitshilfe_bearbeitung_verdachtsflaechen.pdf?command=downloadContent&filename=arbeitshilfe_bearbeitung_verdachtsflaechen.pdf

LUBW Baden-Württemberg (2011): Arbeitshilfe zum Umgang mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten im Boden. Anforderungen unterschiedlicher Rechtsbereiche. Erfassen, Bewerten, Handeln. Prüfwertableitung, Gefährdungsabschätzung. Gebietsbezogener Ansatz der Bearbeitung. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/6638/>

8 GESETZE UND VERORDNUNGEN

BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 16, 502-510.

BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 36, 1554-1582.

KmV (2010): Kontaminanten-Verordnung vom 19. März 2010. BGBl. I S. 287.

Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung (EU-Futtermittelrichtlinie). Amtsblatt. Nr. L 140 vom 30.05.2002 S.10.

UIG (2004): Umweltinformationsgesetz vom 22. Dezember 2004. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 73, S. 3704.

Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit. Amtsblatt Nr. L 31/1.

Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Europäischen Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. Amtsblatt Nr. L 364/5.

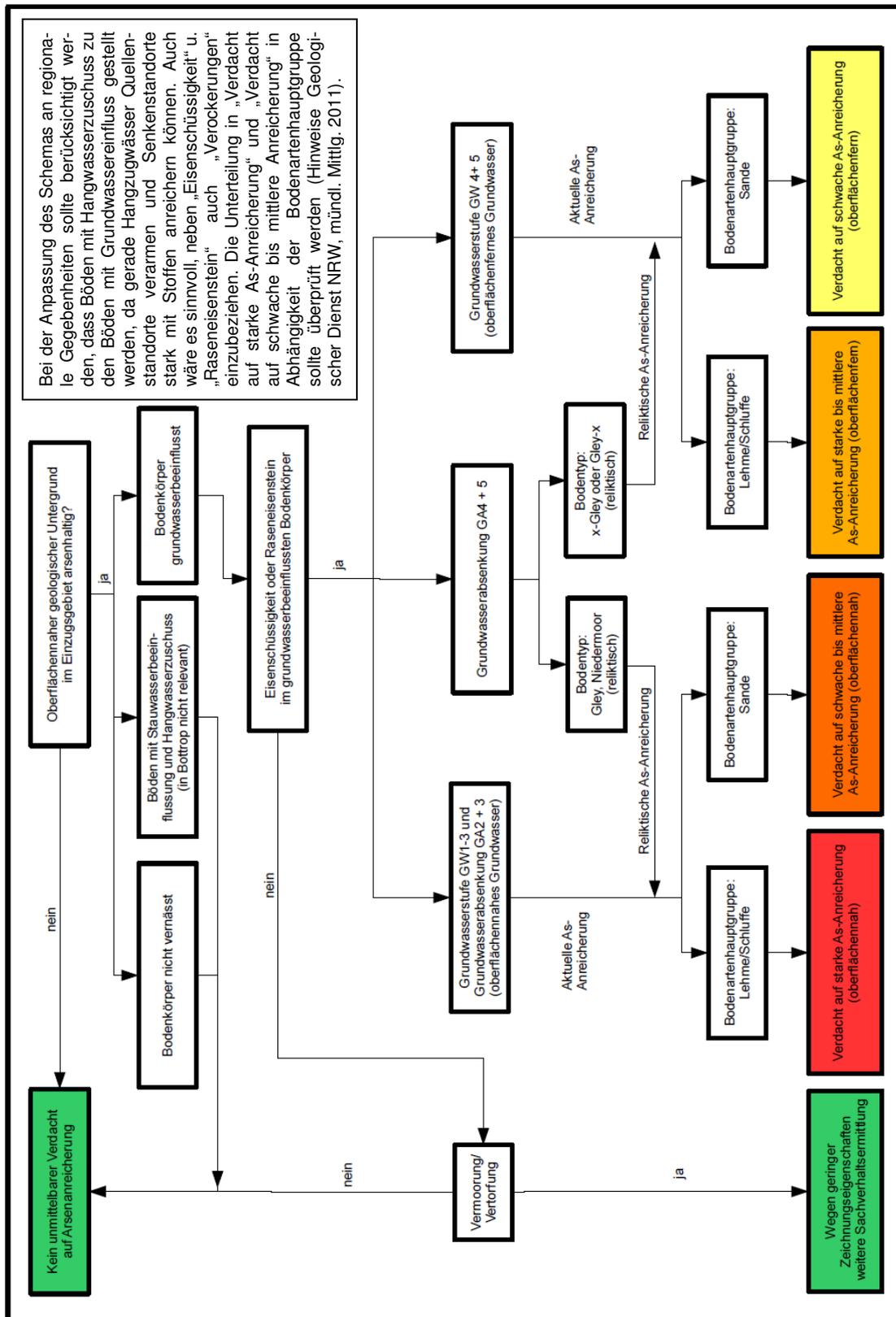
VERORDNUNG (EU) Nr. 574/2011 DER KOMMISSION vom 16. Juni 2011 zur Änderung des Anhangs I der Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments; Amtsblatt L 159/7; zuletzt geändert durch Verordnung (EG) Nr. 227/2012 (ABl. L 91 vom 29.03.2012 S. 1)

ANHANG 1: Handlungsempfehlungen für Landwirte und Gärtner

Die folgenden Handlungsempfehlungen richten sich an Landwirte (Eigentümer und Pächter), Futtermittelhersteller und Gärtner. Sie können unter der Adresse www.labo-deutschland.de heruntergeladen werden. Angeboten wird eine druckfertige Fassung im PDF-Format und eine WORD-Fassung.

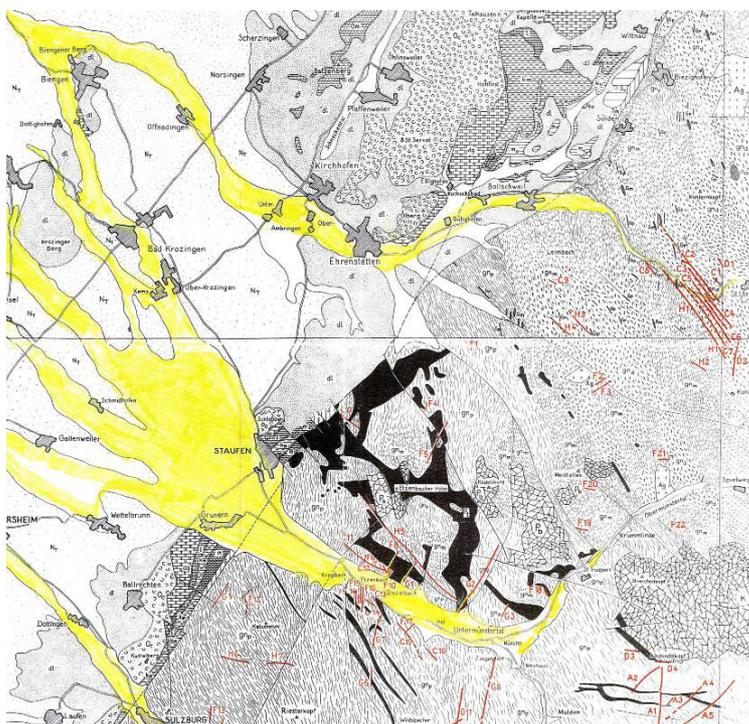
Die WORD-Fassung eignet sich als Grundlage für individuelle Handlungsempfehlungen der Bodenschutz- und/oder Landwirtschaftsbehörden der Länder und Landkreise. Das Dokument kann z.B. um Informationen zu regionalspezifischen Arsenquellen oder Maßnahmen sowie um Kontaktadressen ergänzt werden. Auch individuelle behördliche Logos und Fotos können eingefügt werden. Das Impressum ist anzupassen.

ANHANG 2: Bewertungsschema zur Abgrenzung von Gebieten mit erhöhten Arsengehalten in Böden der Stadt Bottrop (ISB 2010)



ANHANG 3: Praxisbeispiel aus Baden-Württemberg zur Erfassung von Gebieten mit Arsen-Belastungen im Boden

Die dritte Strophe des „Badnerlieds“ besingt den Schwarzwald als Bergbauregion, welche Rolle er bis ins 18., teilweise 20. Jahrhundert innehatte. Von dieser Epoche künden noch die zahlreichen Stollen, Pingen, Verhaue, Halden, Pochen, Schmelzen und neuerdings Besucherbergwerke, Museen etc. Als Kehrseite dieser Wertschöpfung früherer Generationen fand vor allem während des 2. Jahrtausends unserer Zeitrechnung ein Materialtransport durch Gewässer (Erosion) aus diesen Altstandorten/ -ablagerungen in die Böden der unterliegenden Talauen (Sedimentation) statt; dies hat großflächige Kontaminationen mit Schwermetallen und Arsen verursacht. Gegen Ende der 1980er Jahre wurde der Sachverhalt entdeckt und verstärkt ab den 1990er Jahren erfolgten zahlreiche Untersuchungen, um die Informationsgrundlage zu verbessern. Unabhängig davon, ob der Bergbau in keltischer, römischer oder jüngerer Zeit umging, bestätigt sich in diesen Bereichen der Verdacht auf erhöhte Schwermetallgehalte im Boden mittlerweile in aller Regel. Es handelt sich dabei vorrangig um Bereiche der Talfüllungen von Sulzbach, Neumagen, Möhlin, Grosser Wiese, Glotterbach, Kinzig nebst einiger Seitenflüsse u.a.m. Als Schadstoffe sind neben Arsen auch Blei, (Zink) und Cadmium von besonderer Bedeutung und in ihrer Relevanz für die jeweiligen Nutzungen und Wirkpfade zu prüfen.



Karte der Erzgänge (rot) überlagert mit unterliegenden Talfüllungen (gelb).

Quelle: Metz, R.; Rein, G. & Schürenberg, H. (1958) Erläuterungen zur geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Südschwarzwaldes mit Erz- und Mineralgängen. Schauenburg-Verlag.

Ansprechpartner: Herr Joachim Zimmermann, Herr Albrecht Weiser, Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung Umwelt, Referat Gewässer und Boden

ANHANG 4: Praxisbeispiel zur Untersuchung von Pflanzenproben im Kreis Borken, Nordrhein-Westfalen

Anhand einer digitalen Bodenbelastungskarte (BBK) für den Außenbereich des Kreises Borken konnten Areale mit geogen bzw. pedogen erhöhten Arsengehalten identifiziert werden, wobei insbesondere der Südwesten des Kreisgebietes betroffen war. Die in der Folge durchgeführten weiteren Sachverhaltsermittlungen zeigten, dass aufgrund der geringen Pflanzenverfügbarkeiten im Hinblick auf die damals untersuchten ackerbaulich genutzten Flächen der Gefahrenverdacht in Bezug auf Wachstumsbeeinträchtigungen zwar ausgeräumt werden konnte; in zwei Fällen musste dennoch aufgrund der Gesamtgehalte an Arsen ein Gefahrenverdacht in Bezug auf die Pflanzenqualität als erhärtet angesehen werden. Diesem sollte durch fachlich angemessene Pflanzenuntersuchungen nachgegangen werden. Zudem waren in einigen Fällen auf aktuell als Grünland genutzten Flächen schädliche Bodenveränderungen festzustellen, wobei diese Einschätzung auch vor dem Hintergrund der festgestellten geringen Pflanzenverfügbarkeiten von Arsen gilt, da auf Grünland dem Verschmutzungspfad, insbesondere was Arsen anbetrifft, eine vorrangige Bedeutung zukommt. Als eine Konsequenz wurden orientierende Pflanzenuntersuchungen durchgeführt.

Die Auswahl der zu untersuchenden Flächen erfolgte durch den Kreis Borken in Abstimmung mit der Landwirtschaftskammer. Es wurden acht Standorte berücksichtigt, die sämtlich in Bereichen mit gemessenen bzw. nach BBK prognostizierten Maßnahmen- bzw. Prüfwertüberschreitungen bezüglich des Halbmetalls Arsen liegen. Die Gewinnung der Pflanzenproben erfolgte jeweils als Mischprobe aus mindestens fünf Pflanzenindividuen (Mais) bzw. aus Mischproben über eine Vielzahl an Individuen (Gras), die über die zu betrachtende Fläche verteilt entnommen wurden. Die Arsengehalte wurden in ungewaschenen Proben gemessen (IFUA 2008).

Probennummer Pflanzen	Pflanzenart	Arsen-Gehalt in der Pflanze [mg/kg] ¹⁾	Arsen-Gehalt im Boden [mg/kg] ²⁾	Höchstmengegehalt nach FMV [mg/kg] ¹⁾
As-1-G	Gras	4,8	13-97	2*
As-2-G	Gras	20,5	110	
As-4-G	Gras	0,49	110	
As-5-M	Mais	< 0,25	k.A.	
As-6-G	Gras	0,92	110	
As-7-G	Gras	0,40	19	
As-8-M	Mais	< 0,23	64	
As-9-M	Mais	< 0,25	86	

¹⁾ bezogen auf 88% Trockenmasse

²⁾ bezogen auf 100% Trockenmasse; angegeben sind die Gehalte der Untersuchungsflächen im Rahmen der weiteren Sachverhaltsermittlungen (IFUA 2008); die Ammoniumnitratgehalte nach DIN 19730 waren sämtlich unter der Bestimmungsgrenze von < 0,2 mg/kg

* Einzelfuttermittel

Auf der Grundlage des aktuellen Kenntnisstandes sind zumindest bei Grünlandnutzung Überschreitungen des Höchstmengengehaltes für Arsen im beweideten / verfütterten Gras möglich, die – wie die Gegenüberstellung der hier ermittelten Pflanzen- und Bodengehalte nahelegen – nicht auf Basis der Konzentrationen an Arsen im Boden vorhergesagt oder auch nur abgeschätzt werden können. Die Eigentümer der beprobten Flächen wurden zeitnah informiert.

Das weitere Vorgehen wurde vom Kreis Borken (Fachbereich Natur und Umwelt als Untere Bodenschutzbehörde sowie der Futtermittelüberwachung im Fachbereich Tiere und Lebensmittel) mit der Landwirtschaftskammer abgestimmt. Es wurde eine Handlungsempfehlung „Arsen in Böden – Hinweise zum Umgang mit naturbedingt erhöhten Arsengehalten im Oberboden des Kreis Borken“ erstellt. Hierin werden der Landwirtschaft Informationen zur Arsenproblematik und Empfehlungen zur verschmutzungsarmen Nutzpflanzenernte gegeben. Es werden keine Verbote oder Nutzungseinschränkungen ausgesprochen. Auf die Eigenverantwortlichkeit der Landwirte für die Futtermittelqualität wird hingewiesen. Die Handlungsempfehlungen wurden an alle Eigentümer von landwirtschaftlichen Flächen verschickt, für die die BBK erhöhte Arsengehalte im Oberboden prognostiziert. Da die tatsächlichen Nutzer nicht ermittelt werden konnten, wurden die Eigentümer gebeten, die Broschüre ggf. auch an Pächter weiter zu geben.

Auf zwei öffentlichen Informationsveranstaltungen Frühjahr 2011 wurde die Landwirtschaft über die BBK sowie die Handlungsempfehlungen informiert. Anschließend konnten offene Fragen diskutiert werden.

Ansprechpartner: Herr Josef Nießing, Kreis Borken, Fachbereich Natur und Umwelt